

珠江口盆地东北陆架边缘斜坡带晚中新世—第四纪层序模式与单向迁移水道

姜 静^{1,2}, 张忠涛³, 李 浩², 罗 祎¹, 田洪训², 刘汉尧²

[1. 中国大洋矿产资源研究开发协会, 北京 100860; 2. 中国地质大学(北京) 海洋学院, 北京 100083;

3. 中国海洋石油(中国)有限公司 深圳分公司研究院, 广东 深圳 518000]

摘要:综合二维和三维地震、测井和古生物等资料,在珠江口盆地东北陆架边缘斜坡带晚中新世以来发育的地层中识别出2个二级层序(CS1和CS2)、8个三级层序(S1—S8)以及3种主要的沉积体系:陆架边缘斜坡单向迁移水道、陆架边缘斜坡前积体和陆架边缘三角洲。从外陆架至下斜坡,陆架边缘斜坡单向迁移水道主要由4种水道类型构成:①局部受限的外陆架单向迁移复合水道;②宽浅且非受限或局部受限的外陆架—陆架坡折带侵蚀型水道复合体;③深切且受限的斜坡垂—侧向加积型单向迁移水道;④U形且非受限或局部受限的下斜坡垂向加积型复合水道体系。根据层序界面、层序内部结构以及沉积体系构成等特征的变化,总结出2种不同的体系域构成模式:①粤海组—万山组由广泛发育的陆架边缘单向迁移水道组成的不同于Exxon经典层序地层的类型;②第四系由高角度陆架边缘前积体充填和斜坡水道组成的层序类型。研究区晚中新世以来的陆架边缘斜坡层序和沉积演化,受到海平面变化、构造运动、沉降速率和沉积物供应等多种控制因素的共同影响。

关键词:单向迁移水道;斜坡前积体;陆架边缘三角洲;沉积体系;体系域;层序;珠江口盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Late Miocene to Quaternary sequence architecture and unidirectionally-migrating channels in the northeastern continental slope, Pearl River Mouth Basin

Jiang Jing^{1,2}, Zhang Zhongtao³, Li Hao², Luo Yi¹, Tian Hongxun², Liu Hanyao²

[1. China Ocean Mineral Resources R & D Association, Beijing 100860, China; 2. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 3. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China]

Abstract: Based on the integrated analysis of 3D and 2D seismic, well-logging and paleontological data, two second-order sequences (CS1 and CS2), eight third-order sequences (S1-S8), as well as three main depositional systems (unidirectionally-migrating channels in continental slope, shelf margin clinoforms, and shelf-edge deltas) have been recognized in the northeastern shelf edge of the Pearl River Mouth Basin. From outer shelf to lower slope, four types of continental slope channels can be identified: (1) the partly confined outer-shelf unidirectionally migrating composite channels; (2) the broad and shallow outer-shelf to shelf-break erosional composite channels that are unconfined or partly confined; (3) the confined and deeply incised unidirectionally migrating slope channels with vertical and lateral accretion; (4) the U-shaped and unconfined or partly confined vertical accretional composite channels in lower slope. In addition, in view of characteristic variations of sequence boundary, sequence architecture, and depositional system, two types of compositional models of the system tracts have been concluded: (1) the one mainly composed of widespread shelf-margin unidirectionally-migrating channels in the Yuehai and Wanshan Formations, which are quite different from the EXXON sequence model; (2) the one that consists dominantly of the Quaternary high-angle shelf margin clinoforms and slope channels. The sequence architecture and depositional evolution in the continental slope in the study area are controlled by a combination of different factors, such as sea level change, tectonism, subsidence rate, and sediment supply.

Key words: unidirectionally-migrating channel, shelf margin clinoform, shelf margin delta, sedimentary system, systems tract, sequence, Pearl River Mouth Basin

收稿日期:2018-10-14; 修订日期:2019-01-16。

第一作者简介:姜静(1990—),女,博士、工程师,沉积学与层序地层学。E-mail:jiangjing_000@126.com。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91328201)。

层序地层学是源自被动大陆边缘的一门地层学分支学科,其建立的等时地层格架对于沉积体系研究和油气勘探开发都具有十分重要的意义^[1-4]。层序地层学自成立以来经历了30多年不断的发展和完善,随着地震、钻测井等资料品质的提高,陆架边缘有关沉积体系及演化过程的研究和发展,原有的层序地层学模式不断面临新的挑战,当前对层序的划分方案存在很多学派和争议,至今尚未形成统一的标准^[5-10]。有关陆架边缘的沉积作用和沉积过程,一直以来也都是国际上的热点突出问题。珠江口盆地发育了很好的陆架边缘斜坡沉积体系,且具有丰富的高品质3D和2D地震资料,可以清晰地识别出层序的结构和特征,为研究陆架边缘斜坡带的层序模式和沉积体系提供了很好的条件。

近年来,在南海北部神狐海域开展的天然气水合物勘探和开采试验取得重大进展,创造了“持续产气60 d,产气总量 $30.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ ”的世界纪录,引起了广泛的关注^[11-13]。神狐海域的水合物钻探区位于研究区的斜坡一带,本文在对地震、测井、古生物等资料综合解释的基础上,开展研究区的层序地层格架和模式

研究,可以为揭示天然气水合物资源的形成和影响因素,分布预测等提供依据。

1 区域地质背景

珠江口盆地位于南海北部的陆架边缘区,是北部边缘重要的新生代裂陷盆地之一,面积约 $17.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,油气资源含量丰富^[14-16]。珠江口盆地现今呈三隆两拗的格局,走向沿NE-NEE,由北向南依次为北部断阶带、北部拗陷带、中央隆起带、南部拗陷带以及南部隆起带^[14,17-19]。研究区位于珠江口盆地的陆架边缘带,包括白云凹陷、番禺低隆起南部以及东沙隆起西南部(图1)。

珠江口盆地晚中新世以来发育的地层自下而上依次为粤海组、万山组和第四系(图2)。粤海组厚约400~600 m,以广泛发育的一系列平行展布于整个陆架斜坡带的单向迁移水道为特征。万山组在研究区相对较薄,仅100~300 m,在番禺低隆起区以平行反射为主,至白云凹陷北斜坡主要由斜坡水道组成,而东沙

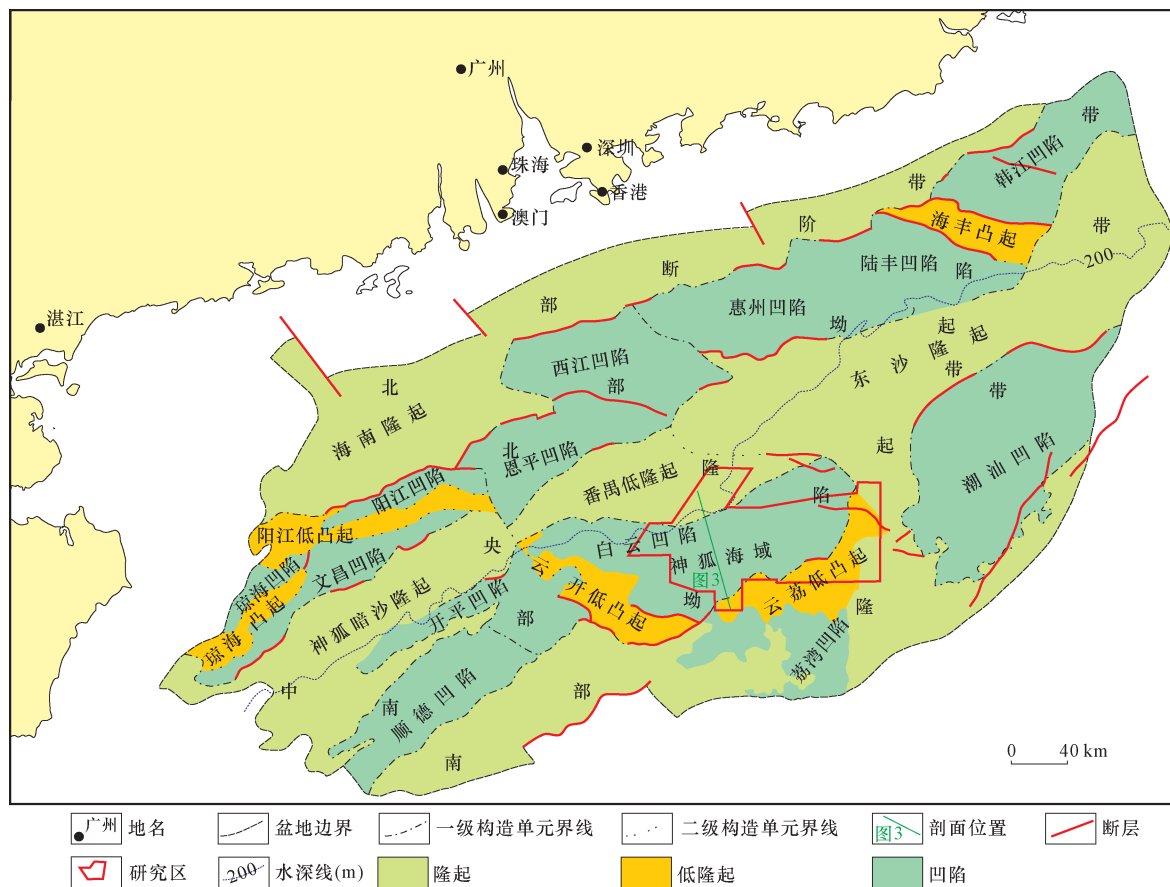


图1 珠江口盆地构造分区和研究区位置(根据中海油深圳分公司研究院资料整理)

Fig. 1 Tectonic division of the Pearl River Mouth Basin and location of the study area
(revised on the basis of data from Shenzhen Branch of CNOOC Ltd.)

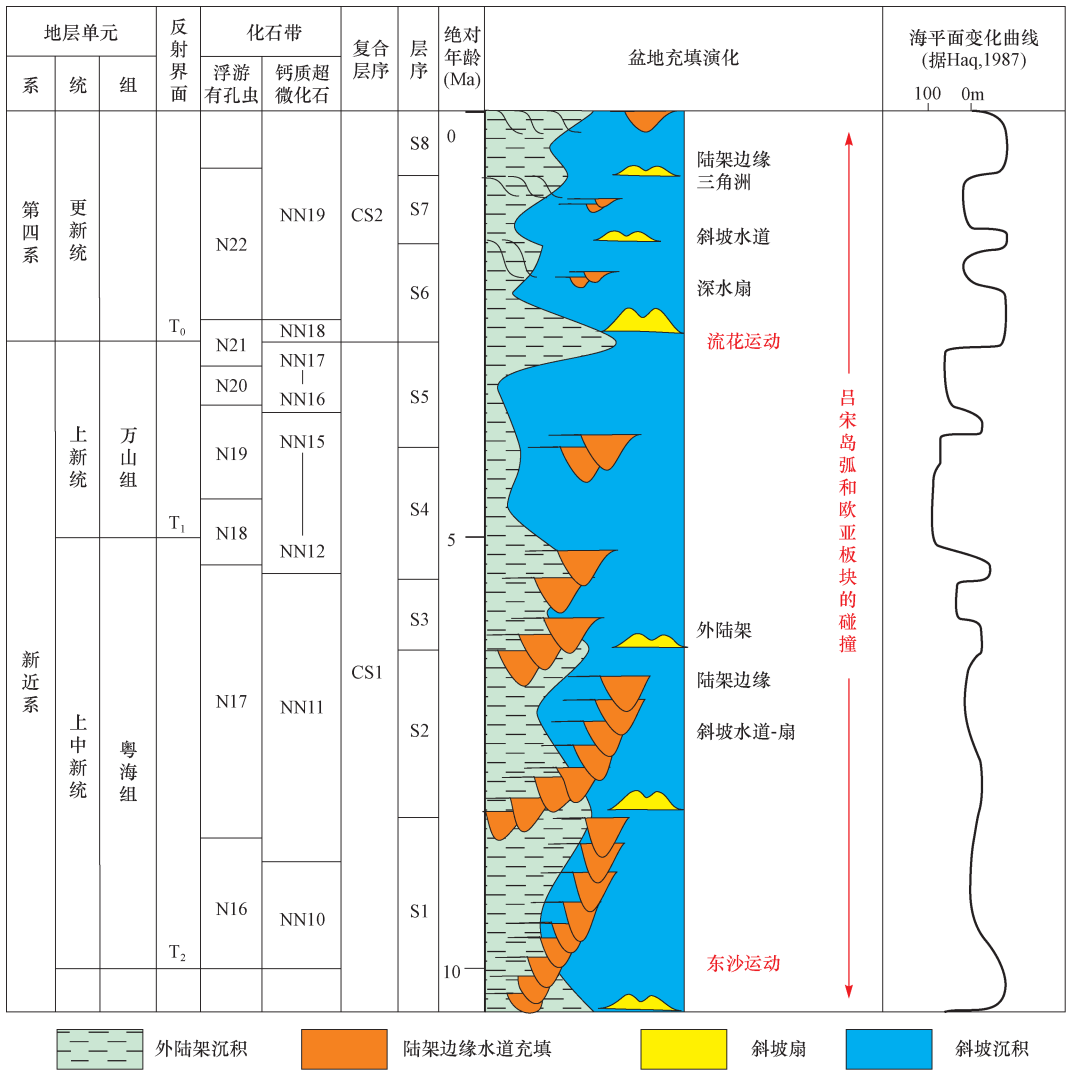


图 2 珠江口盆地晚中新世—第四纪层序划分和盆地充填演化

Fig. 2 Sequence classification and depositional evolution of the Late Miocene to Quaternary in the Pearl River Mouth Basin

隆起附近则因地层遭受剥蚀而大量缺失。第四系相对较厚,陆架坡折带附近可达 500 ~ 700 m,以大规模发育的高角度斜坡前积层为主要特征。

2 层序划分和界面特征

2.1 层序划分方案

综合利用单井分析、连井对比、3D 和 2D 地震资料追踪,在研究区晚中新世—第四纪的地层中识别出 2 个复合层序(CS1 和 CS2)和 8 个层序(S1—S8)(图 2,图 3)。其中,CS1 大致对应粤海组和万山组,CS2 对应第四系,两个复合层序底界面分别是区域不整合面 CSB1 和 CSB2。CS1 内部可进一步划分为 5 个层序,层序对应底界面分别是 SB1—SB5;CS2 内部可划分出 3 个层序,对应底界面为 SB6—SB8。据生物地层资料的标定,研究区内的复合层序持续时间约 3 ~ 7 Ma,可

大致看作二级层序;8 个层序持续的地质时间分别约 0.8 ~ 2.3 Ma,可看作是三级层序^[20]。

2.2 层序界面特征

根据层序划分方案,研究区晚中新世以来发育的 2 个二级层序和 8 个三级层序分别对应二级层序界面 CSB1、CSB2 和三级层序界面 SB1—SB8。这些层序界面的特征主要如下。

2.2.1 二级层序界面

二级层序界面的不整合分布范围广泛,可进行区域性对比,是建立区域性层序地层格架的基本单元^[21]。二级层序的形成常受控于周期性的构造演化,又称为“构造层序”^[22]。研究区在晚中新世以来发育的地层中识别出 2 个区域性(二级)水进—水退旋回,分别对应区域性不整合界面 CSB1 和 CSB2,其形成应

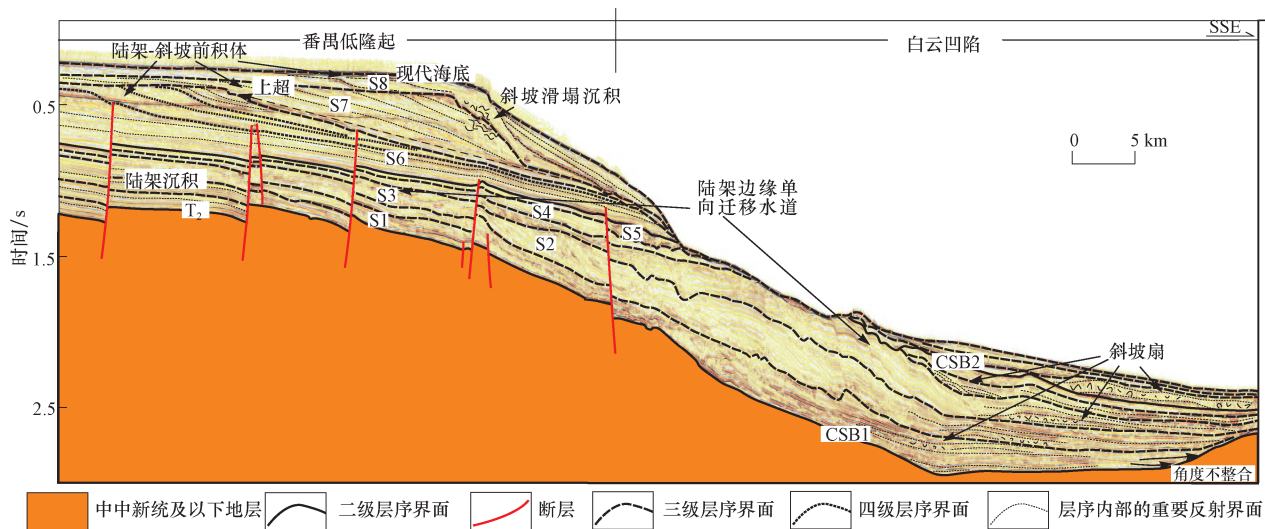


图 3 研究区晚中新世—第四纪层序地层格架(剖面位置见图 1)

Fig. 3 Late Miocene-Quaternary sequence stratigraphic framework of the study area(see Fig. 1 for the location of the profile)

该与构造运动有关^[23],这些界面都可以进行区域性的追踪和对比。

CSB1 对应粤海组的底界面,即中中新世与晚中新世之间的区域不整合面,年龄约 10.5 Ma。该不整合面在云荔低凸起和东沙隆起附近均表现出明显的角度不整合特征,并且在番禺低隆起南部和白云凹陷北斜

坡一带大范围遭受陆架边缘斜坡水道的下切侵蚀。如图 3 所示,CSB1 在云荔低凸起附近与上覆地层呈角度不整合接触,但是在番禺低隆起南部至白云凹陷北斜坡水道集中发育的地区,CSB1 则表现为切割下伏地层,与上覆地层或呈平行接触,或被上覆地层底超于界面之上(图 4a)。

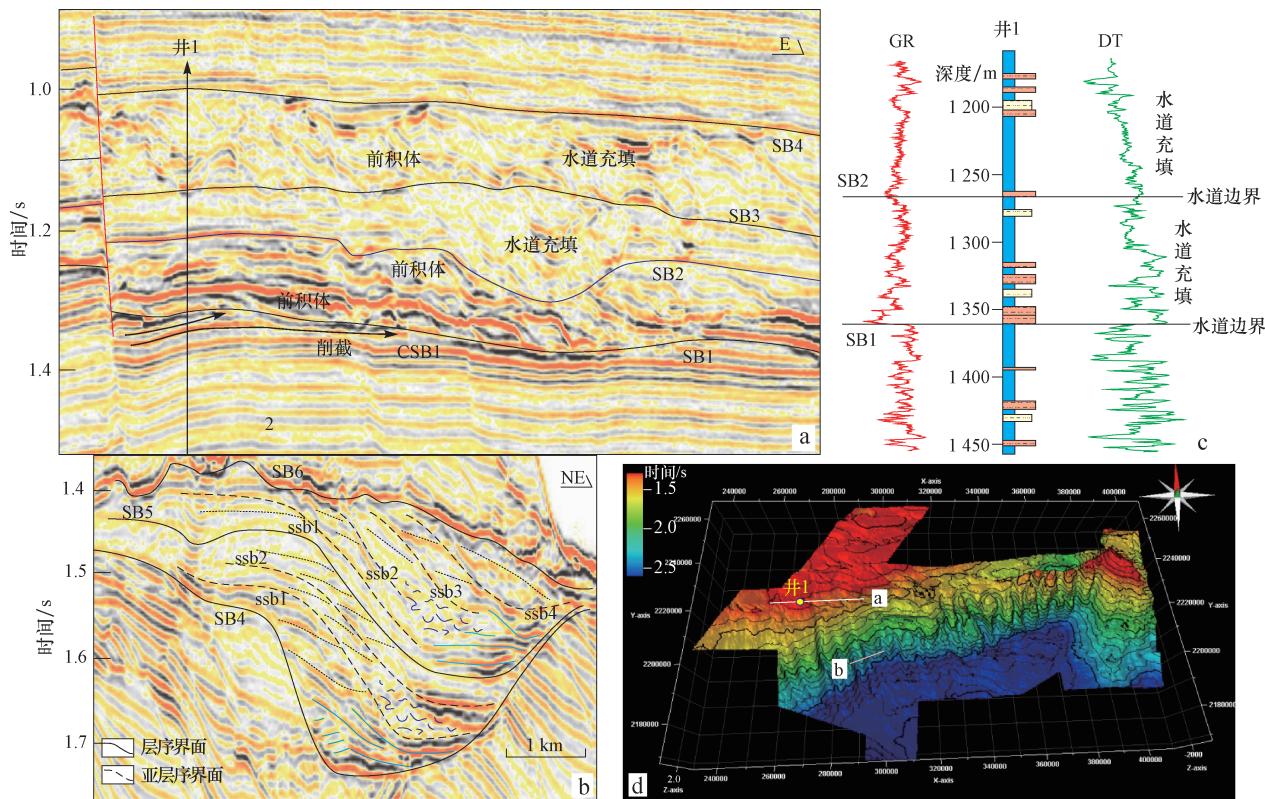


图 4 珠江口盆地东北陆架边缘带层序界面地震反射及测井曲线特征

Fig. 4 Characteristics of sequence boundaries on seismic profiles and well logs at the northeastern shelf margin, Pearl River Mouth Basin
a, b. 典型地震剖面特征,剖面位置见图 4d; c. 典型测井曲线特征,井位见图 4d; d. 研究区 CSB1 界面的时间—构造图

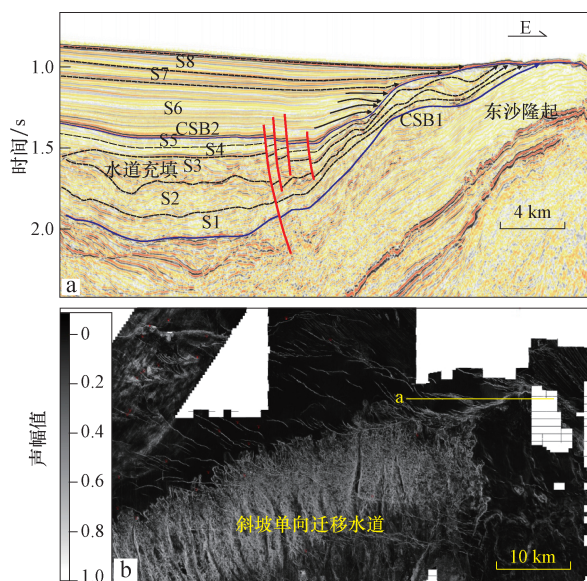


图5 珠江口盆地东北陆架边缘带 CSB2 不整合面地震反射特征

Fig. 5 Seismic reflection characteristics of the unconformity CSB2

at the northeastern shelf margin, Pearl River Mouth Basin
a. 典型地震剖面特征, 剖面位置见图5b; b. 横切 CSB2 不整合面的方差属性切片, 图中颜色偏白偏亮的部分代表界面的不连续特征

CSB2 是第四系的底界面, 上新统和第四系之间的区域性角度不整合面, 年龄约 3 Ma。CSB2 界面在东沙隆起附近呈现出明显的角度不整合特征, 在番禺低隆起南部的陆架坡折带被大范围剥蚀而呈侵蚀不整合特征, 至白云凹陷北斜坡则被几乎覆盖整个斜坡带的水道所切割(图3, 图5)。地震剖面中, 该不整合面在东沙隆起附近表现为强振幅、高连续性反射的结构特征, 界面之下为明显的削蚀, 界面之上为上超不整合(图5)。

2.2.2 三级层序界面

三级层序是层序地层学中的基本层序单元, 持续时间和不整合作用范围都比二级层序要小, 持续时限约 0.5 ~ 3 Ma^[20]。三级不整合面通常是低角度的侵蚀不整合^[22], 关于其成因, 很多学者认为是气候周期引起的基准面变化控制了三级层序的形成和旋回式的交替变化^[24]。研究区内的粤海组—第四系可识别出 8 个三级层序界面(SB1—SB8), 根据其特征大致归为以下两种类型。

1) 明显的水道底部下切不整合面

研究区广泛发育陆架边缘斜坡单向迁移水道, 位于水道底部的下切不整合是区内最典型的层序界面类型之一。虽然研究区的陆架边缘水道不是陆上河流体系向盆地的延伸, 其成因却也与海平面下降有一定的关系。从 S1 至 S8 的层序界面均有水道下切不整合发育, 尤其是 CS1 内的 5 个层序界面 SB1—SB5。这种不整合面也是 CS1 内部划分三级层序界面的一个重要标志, 其中粤海组从外陆架至下斜坡均被这种水道所覆盖。水道底部下切不整合面在地震剖面中表现为连续性差、变动振幅、V 形或 U 形切割等特征, 测井曲线对应箱形或钟形的底界面(图4)。

2) 水退—水进旋回的转换界面

主要发育在第四纪, 是研究区第四纪发育的三级层序界面主要特征(图6), 如 SB7 和 SB8。在地震剖面中表现为强振幅反射、高连续性、削蚀下伏地层、且被上覆地层上超的特征(图6a)。测井曲线上, SB7 附近为一套低伽马值的箱形反射, 反映了水动力条件稳

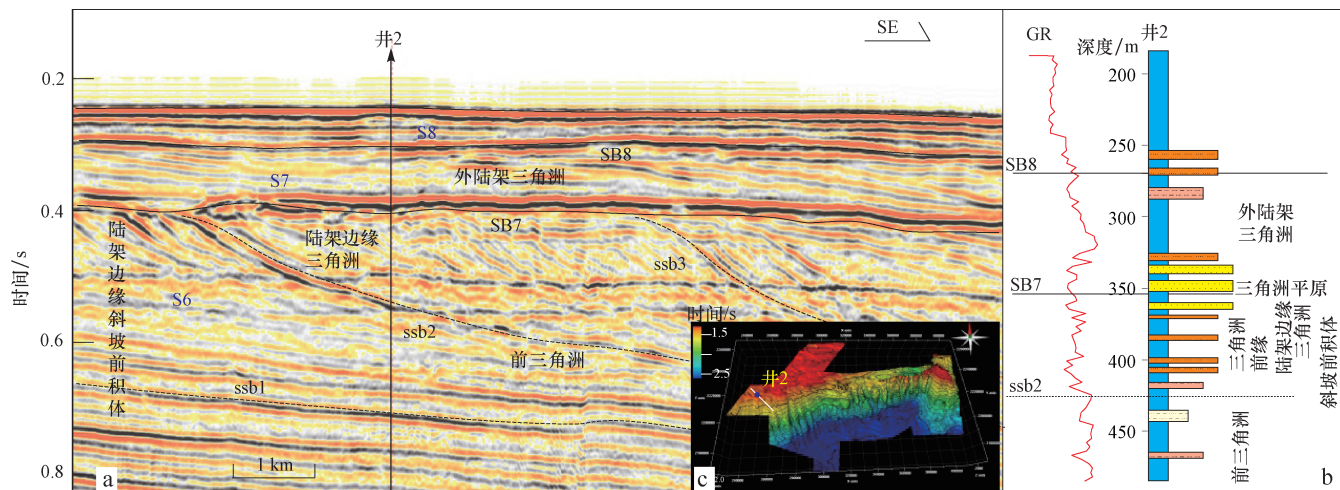


图6 珠江口盆地东北陆架边缘带 SB7 和 SB8 层序界面地震反射及测井曲线特征

Fig. 6 Characteristics of sequence boundaries SB 7 and SB8 on seismic profiles and well logs at the northeastern shelf margin, Pearl River Mouth Basin

a. 典型地震剖面特征, 剖面位置见图6c; b. 典型测井曲线特征, 井位见图6c; c. 研究区 CSB1 界面的时间—构造图

定且物源供应充足之下的快速沉积(图 6b)。SB8 界面位于一套漏斗形反射的顶界面,界面之上为另一套漏斗形反射,反映了研究区在海退之后,快速海侵,之后又开始海退(图 6b)。

2.2.3 四级层序界面

四级层序属于高频层序,持续年限大约 0.1 ~ 0.15 Ma^[24-25]。近些年,为满足减小隐蔽油气藏的勘探风险,优化开发方案等需求,层序地层学的研究也在由盆地规模的分析向储层规模的高精度层序地层学发展^[3]。

研究区第四纪发育的三级层序 S6, S7 和 S8 内部,可以进一步识别出多个水退—水进旋回的转换界面。其中 S6 内部可进一步识别出 3 个四级层序界面,对应 4 个四级层序; S7 内部可识别出 3 个四级层序界面,对应 4 个四级层序; S8 包括 4 个四级层序界面,对应 5 个四级层序。这些层序界面具有相似的特征,都代表了海退至海侵的转换界面,界面之下削蚀下伏的前积层,界面之上为上超,测井曲线上对应一套低伽马值的齿状反射的底部(图 6b)。

研究区晚中新世到上新世的地层大面积被单向迁移水道所覆盖,从中识别出 5 个三级层序,每个层序都代表了一个主要的水道发育期次(水道底部的切割面),并且可以进行全盆追踪。除此之外,在每一期水道的内部,也可以识别出一些四级层序界面,但是进行全盆追踪的难度很大。这些次一级的层序界面在地震剖面上反射振幅弱且连续性差,其识别标志是界面之下的削截和界面之上的微弱上超等反射特征(图 4b),反映了一些小规模的水道切割事件,可能与次一级的海平面下降有关。

3 沉积体系和体系域模式

3.1 沉积体系

3.1.1 陆架边缘斜坡单向迁移水道

研究区从外陆架到下斜坡发育了一系列的单向迁移水道,这些水道从中新世开始在斜坡带发育,晚中新世发育范围扩至最大,外陆架至下斜坡均有发育,上新世至第四纪又退回斜坡带^[10,23,26]。从外陆架向下斜坡追踪发育相对连续完整且受断层影响小的水道 C3,选取不同位置横穿过 C3 的剖面 h1—h8,依次由陆到海,追踪其底部切割、侧向迁移等特征的变化(图 7)。按照水道是否受限、水道的叠置样式、成因、等级、宽深

比和发育背景等主要特征,总结出 4 种类型:① 局部受限的外陆架单向迁移复合水道(h1);② 宽浅且非受限或局部受限的外陆架—陆架坡折带侵蚀型水道复合体(h2;图 4a);③ 深切且受限的斜坡垂—侧向加积型单向迁移水道(h3—h6;图 4b);④ U 形且非受限或局部受限的下斜坡垂向加积型复合水道体系(h7)。

局部受限的外陆架单向迁移复合水道主要发育在外陆架,主要特征是水道底部切割浅且范围小,水道发育位置不固定,多个孤立小水道随机分布或彼此间呈现出侧向迁移的特征,形成复合水道;水道内部沉积物或侧向迁移,或呈杂乱反射。

宽浅且非受限或局部受限的外陆架—陆架坡折带侵蚀型水道复合体发育在外陆架—陆架坡折带,随地形坡度增加,水道切割深度、宽度均有进一步的发展。孤立小水道或复合水道逐渐形成宽浅的水道复合体,水道内部充填具有明显的单向迁移特征。

深切且受限的斜坡垂—侧向加积型单向迁移水道发育在大陆斜坡上,地形坡度较陡的地区。水道底部切割很深,水道复合体之间呈现单向迁移的特征,垂—侧向叠置形成复合水道体系。

U 形且非受限或局部受限的下斜坡垂向加积型复合水道体系发育在下斜坡水道快要结束的位置,最突出的特征是单个小水道垂向加积形成较大的水道复合体,没有侧向迁移或仅有微弱迁移,水道内部充填主要由加积层组成。

3.1.2 陆架边缘斜坡前积体和陆架边缘三角洲

研究区在第四纪发育了大套的高角度前积体,斜坡前积体内部可进一步识别出陆架边缘三角洲体系。如图 6 所示,三级层序 S6 内部发育的三角洲由外陆架向陆架边缘前积,逐渐与斜坡前积体合为一体。综合地震剖面和测井曲线分析,可以识别出 3 种沉积相:底部的前三角洲泥、三角洲前缘前积朵体和顶部的三角洲平原。其中,底部的前三角洲与斜坡前积混为一体。层序 S6 内部的陆架边缘三角洲之上发育了一套外陆架三角洲,说明由 S6 至 S7,海平面下降。

3.2 沉积体系域

综合以上研究,研究区的斜坡层序结构和体系域的沉积构成从晚中新世至第四纪变化很大,不能简单地用 Exxon 层序模式来进行解释。晚中新世,研究区的地层自外陆架至下斜坡,大范围的受到陆架边缘斜坡单向迁移水道影响,导致其内部结构极其复杂,与 Exxon 层序模式有很大的差别。而第四纪因发育了一

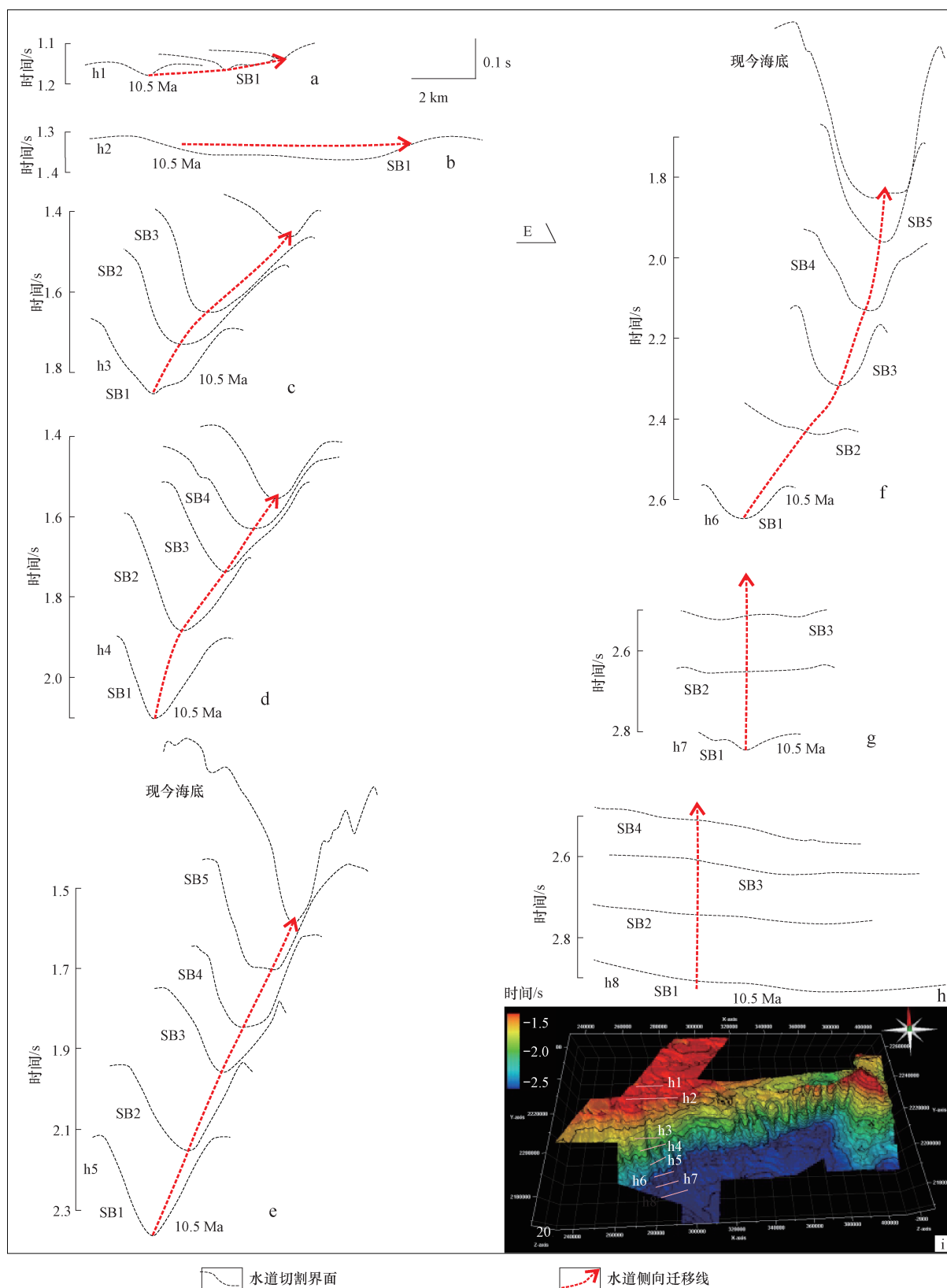


图7 珠江口盆地外陆架-下斜坡水道发育特征及演化

Fig. 7 Outer-shelf to lower-slope characteristics and evolution of the shelf-margin channels, Pearl River Mouth Basin

a. 外陆架水道切割、迁移特征, 剖面位置见图 7i; b. 外陆架-陆架坡折带水道切割、迁移特征, 剖面位置见图 7i; c-e. 斜坡带水道切割、迁移特征, 剖面位置见图 7i; g, h. 下斜坡带水道切割、迁移特征, 剖面位置见图 7i; i. 研究区 CSB1 界面的时间-构造图 (自外陆架至下斜坡不同位置选取横穿过水道 C3 的剖面 h1—h8, 展示其底部切割和侧向迁移特征的变化。)

系列由高角度前积体充填的陆架坡折带,且水道范围大幅度收缩,其层序结构与 Exxon 模式非常相似。据此提出研究区晚中新世以来发育的两种类型的沉积体系域构成模式。

3.2.1 类型 I (S1—S5)

研究区晚中新世至上新世发育的层序(S1—S5)主要由广泛发育的陆架边缘斜坡单向迁移水道和相关的下斜坡扇体系组成。位于上斜坡的水道充填包括重力流滞留沉积、滑塌沉积和侧向前积体,下斜坡至斜坡脚主要是斜坡扇沉积(图 8a)。

低位体系域:层序 S1—S5 的低位体系域主要由外陆架—上斜坡的水道侵蚀不整合和不整合面之上的重力流滞留沉积,以及下斜坡的斜坡扇沉积组成。在低水位至海平面上升的早期,陆架边缘带由于重力流作用加剧而遭受侵蚀,沉积物经水道搬运至下斜坡沉积而形成下斜坡扇,水道内只在底部堆积了少量的重力

流滞留沉积物。

海侵—高位体系域:类型 I 的海侵—高位体系域是由陆架边缘单向迁移水道内部的侧向前积体和滑塌沉积,以及位于下斜坡扇之上的海侵泥岩沉积组成。由于海侵作用使低位体系域的斜坡扇裙之上覆盖了一层海侵泥岩,在地震剖面中表现为扇朵体之上的一套连续性很好的平行—亚平行反射;而在斜坡水道中则充填了厚层的滑塌体和侧向前积体。

3.2.2 类型 II (S6—S8)

第四系的层序 S6—S8 是以发育厚层、高角度的陆架边缘前积体、密集的斜坡水道和下斜坡扇为特征。这种层序发育模式与 S1—S5 完全不同,而且基本可以与 Exxon 层序模式对应^[27]。在 S6—S8 层序内部,可以较为清楚的识别出低位体系域、海侵体系域、高位体系域和下降体系域(图 8b),关于其特征描述如下。

低位体系域:研究区第四系斜坡—下斜坡同样密

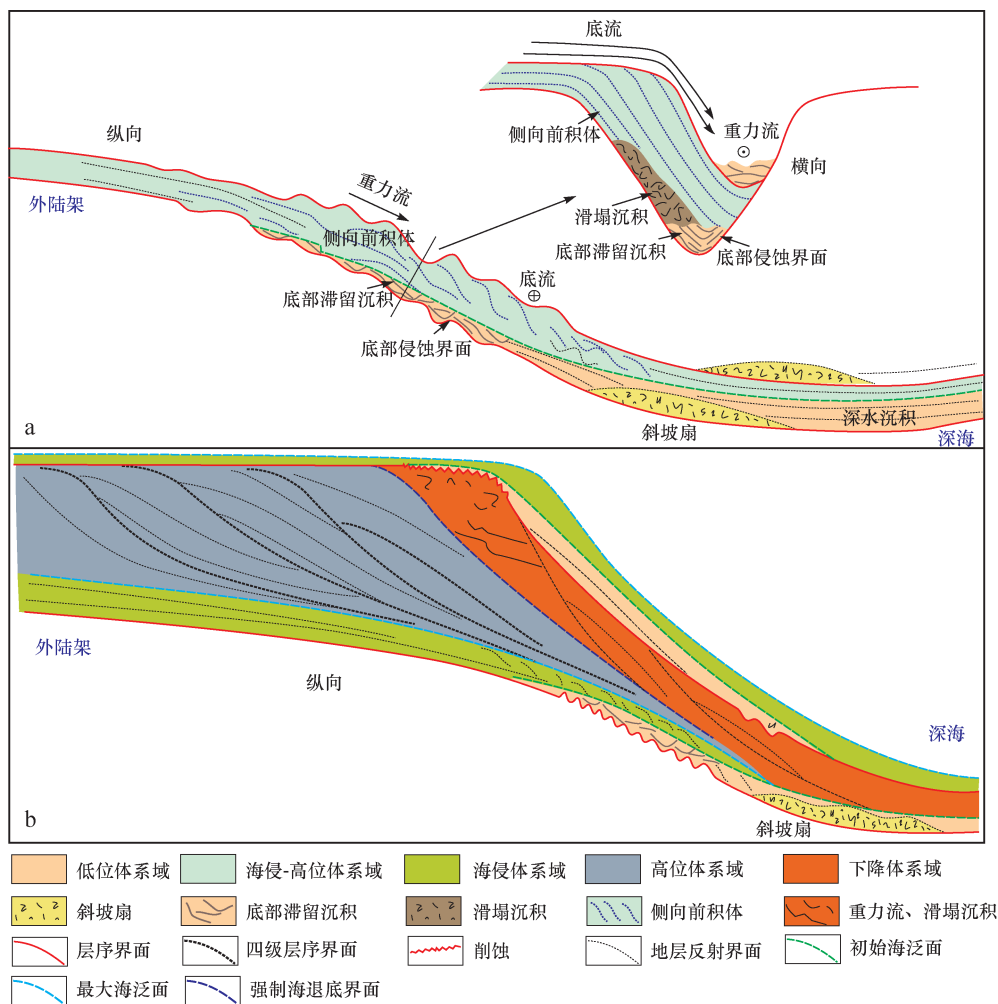


图 8 珠江口盆地东北陆架边缘带体系域构成模式

Fig. 8 Scheme graphs of the systems tracts at the northeastern shelf margin, Pearl River Mouth Basin

a. S1—S5 体系域; b. S6—S8 体系域

集发育了一系列斜坡单向迁移水道和下斜坡扇体,该类型层序的低位体系域也是由低位域早期水道内部的重力流滞留沉积、下斜坡扇沉积,以及低位晚期上超于斜坡之上的低位楔组成。

海侵体系域:随着海平面继续上升,沉积物覆盖于低位体系域之上,并且越过陆架坡折,逐渐向陆地方向上超。研究区的海侵体系域厚度较小,在地震剖面上表现为平行-亚平行反射结构。

高位体系域:主要发育在陆架坡折之上,沉积厚度很大,地震剖面中呈一系列的高角度前积层,测井曲线表现为向上变粗的序列。在高位体系域的高角度前积层内部,可识别出次一级的层序界面,界面之下可观察到削蚀、界面之上为上超。此外,S6的高角度前积层内发育有陆架边缘三角洲。

下降体系域:在经典的 Exxon 层序地层模式中,一个完整的层序包括低位体系域、海侵体系域和高位体系域;但是在高位体系域中,有时可依据强制水退面进一步划分出下降体系域^[28]。因此下降体系域即高水位晚期,沉积基准面开始下降时形成的一套沉积体。随着沉积基准面的下降,前积体呈下降式进积;同时在下陷体系域的退覆式沉积中,可识别出次一级的层序界面,即在基准面整体下降的过程中,仍伴随有几次小规模的上超事件。

4 控制因素

研究区晚中新世以来经历了两大演化阶段,其中出现了两次大的区域性水进-水退旋回,层序结构和体系域构成都相应发生了很大的变化。经与 Haq^[1] 全球海平面变化曲线对比,可以发现 Haq 曲线在晚中新世以来经历了两次主要的海退事件(10.5 Ma 和 3 Ma),分别可与研究区的两个区域不整合面发育的时间对应(图2)。但是研究区在第四纪初期经历了一次明显的海侵,这次海侵事件在 Haq 曲线中没有响应。研究区的三级海平面旋回与 Haq 曲线在数量和时间上也基本可以对比。说明研究区的层序和沉积演化在一定程度上受到全球海平面变化的控制。

同时,研究区的两个区域性不整合面(CSB1 和 CSB2)均表现出角度不整合的特征,且分别与两次构造运动事件(东沙运动和流花运动)发生的时间和影响范围相一致^[29-32],据此推测这两次区域不整合的形成可能受到构造运动的影响。

此外,经对比研究区的沉降速率曲线^[10],晚中新世-上新世沉降速率较低,而第四纪沉降速率较高。

据此推测晚中新世广泛分布的陆架边缘水道的侧向迁移特征可能与该时期相对较低的沉降速率有关,而第四纪发育的厚层高角度前积体则与第四纪的高沉降速率有关。同时,第四纪广泛发育的高角度前积层可能还受益于该时期大量的沉积物供应,并且第四纪的高沉积物供给速率具有一定的全球性,在全球范围的多个地区都观察到这种现象^[33]。

5 结论

1) 研究区晚中新世以来的层序地层格架可以划分为2个代表区域性旋回的二级层序(CS1 和 CS2)和8个三级层序(S1—S8),三级层序内部可进一步识别出次一级的层序。其中,二级层序界面特征以角度不整合和侵蚀不整合为主,三级、四级层序界面则以明显的水道底部下切不整合面和水退-水进旋回的转换界面为主要特征。

2) 研究区自晚中新世以来发育的沉积体系主要有:陆架边缘斜坡单向迁移水道、陆架边缘斜坡前积体和陆架边缘三角洲。其中,陆架边缘斜坡单向迁移水道可概括为4种类型:局部受限的外陆架单向迁移复合水道、宽浅且非受限或局部受限的外陆架-陆架坡折带侵蚀型水道复合体、深切且受限的斜坡垂-侧向加积型单向迁移水道以及U形且非受限或局部受限的下斜坡垂向加积型复合水道体系。陆架边缘斜坡前积体和陆架边缘三角洲发育在第四纪,三角洲由外陆架前积至陆架边缘时,逐渐与斜坡前积体合为一体。

3) 研究区粤海组-第四系总结出2种类型的体系域构成模式。第一种发育在晚中新世-上新世,研究区以广泛发育的陆架边缘单向迁移水道为特征,总结出适用于斜坡水道的特殊的沉积体系域构成模式,与 Exxon 经典层序地层模式有所不同;第二种发育于第四纪,以一系列陆架边缘前积层和由前积体充填的陆架坡折带为特征。

4) 研究区晚中新世以来的层序结构和沉积演化受到海平面变化、构造作用、沉降速率和沉积物供应等多种因素的共同控制。层序发育和演化首先受到全球海平面变化的影响,区域性不整合面的形成受到构造运动和海平面叠加作用的控制,沉降速率和沉积物供应变化控制着沉积相的宏观演化。

参 考 文 献

- [1] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. Science, 1987, 235: 1156-1167.
- [2] 许仕策. 预测勘探目标中的层序地层学理论与实践——以珠江

- 口盆地为例[J]. 中国海上油气(地质), 1999, 13(3): 152–158.
- Xu Shice. Sequence stratigraphic theory and practice in exploration prospect prediction; Examples from the Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas(Geology), 1999, 13(3): 152–158.
- [3] 林畅松, 张燕梅, 刘景彦, 等. 高精度层序地层学和储层预测[J]. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 2000, 7(3): 111–117.
- Lin Changsong, Zhang Yanmei, Liu Jingyan, et al. High resolution sequence stratigraphy and reservoir prediction[J]. Earth Science Frontiers(China University of Geosciences, Beijing), 2000, 7(3): 111–117.
- [4] 朱筱敏. 层序地层学[M]. 山东 东营: 石油大学出版社, 2000.
- Zhu Xiaomin. Sequence stratigraphy[M]. Shandong Dongying: Petroleum University Press, 2000.
- [5] 林畅松, 刘景彦, 刘丽军, 等. 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[J]. 现代地质, 2002, 16(3): 276–281.
- Lin Changsong, Liu Jingyan, Liu Lijun, et al. High resolution sequence stratigraphy analysis: construction of chronostratigraphic sequence framework on facies and reservoir scale[J]. Geoscience, 2002, 16(3): 276–281.
- [6] 肖传桃, 刘莉, 陈志勇. 层序地层学的研究状况及有关理论问题探讨[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2006, 28(6): 1–7.
- Xiao Chuantao, Liu Li, Chen Zhiyong. Discussion on sequence stratigraphy research and theoretical issues related[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(6): 1–7.
- [7] Catuneanu O, Abreu U, Bhattacharya Y P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy[J]. Earth Science Reviews, 2009, 92: 1–33.
- [8] 姜在兴. 沉积体系及层序地层学研究现状及发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 535–541.
- Jiang Zaixing. Studies of depositional systems and sequence stratigraphy—the present and the future[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 535–541.
- [9] 李绍虎. 对国外层序地层学研究进展的几点思考及L-H-T层序地层学[J]. 沉积学报, 2010, 28(4): 735–744.
- Li Shaohu. Thinking of international sequence stratigraphy development and L-H-T sequence stratigraphy[J]. Acts Sedimentologica Sinica, 2010, 28(4): 735–744.
- [10] Lin C S, Jiang J, Shi H S, et al. Sequence architecture and depositional evolution of the northern continental slope of the South China Sea: responses to tectonic processes and changes in sea level[J]. Basin Research, 2018, 30(Suppl. 1): 568–595.
- [11] 沙志彬, 梁金强, 苏丕波, 等. 珠江口盆地东部海域天然气水合物钻探结果及其成藏要素研究[J]. 地学前缘, 2015, 22(6): 125–135.
- Sha Zhibin, Liang Jinqiang, Su Pibo, et al. Natural gas hydrate accumulation elements and drilling results analysis in the eastern part of the Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science Frontiers(China University of Geosciences, Beijing), 2015, 22(6): 125–135.
- [12] 苏明, 沙志彬, 乔少华, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物钻探区第四纪以来的沉积演化特征[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2975–2986.
- Su Ming, Sha Zhibin, Qiao Shaohua, et al. Sedimentary evolution since Quaternary in the Shenhu hydrate drilling area, northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2975–2986.
- [13] 吴时国, 王吉亮. 南海神狐海域天然气水合物试采成功后的思考[J]. 科学通报, 2018, 63(1): 2–8.
- Wu Shiguo, Wang Jiliang. On the China's successful gas production test from marine gas hydrate reservoirs[J]. Science China Press, 2018, 63(1): 2–8.
- [14] 龚再升, 李思田, 谢泰俊. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[J]. 北京: 科学出版社, 2004.
- Gong Zaisheng, Li Sitian, Xie Taijun. Active heat fluid, oil and gas pool-forming dynamics in north marginal basins of South China Sea[J]. Beijing: Science Press, 2004.
- [15] Pang X, Yang S K, Zhu M, et al. Deep-water fan systems and petroleum resources on the northern slope of the South China Sea[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78: 626–631.
- [16] 施和生, 秦成岗, 高鹏, 等. 珠江口盆地番禺低隆起—白云凹陷北坡天然气晚期成藏特征[J]. 中国海上油气, 2008, 20(2): 73–76.
- Shi Hesheng, Qin Chenggang, Gao Peng, et al. Late gas accumulation characteristics in Panyu low-uplift and the north slope of Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2008, 20(2): 73–76.
- [17] Wang P X, Li Q Y. The South China Sea: Paleocyanography and Sedimentology[M]. Springer, 2009.
- [18] 陈维涛, 杜家元, 龙更生, 等. 珠江口盆地海相层序地层发育的控制因素分析[J]. 沉积学报, 2012, 30(1): 73–83.
- Chen Weitao, Du Jiayuan, Long Gengsheng, et al. Analysis on controlling factors of marine sequence stratigraphy evolution in Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(1): 73–83.
- [19] 高鹏, 秦成岗. 番禺低隆起三级层序的界面识别标志及沉积特征[J]. 科技导报, 2012, 30(25): 37–45.
- Gao Peng, Qin Chenggang. Sequence boundary identification and the depositional characteristics in the third-order sequence stratigraphic framework of Panyu Low Uplift[J]. Science and Technology Review, 2012, 30(25): 37–45.
- [20] Vail P R, Audemard F, Bowman S A, et al. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology—an overview[C]. In: Einsele G, Ricken W, Seilacher A. Cycles and events in stratigraphy. Berlin: Springer-Verlag, 1991: 617–659.
- [21] 林畅松, 王清华, 肖建新, 等. 库车坳陷白垩纪沉积层序构成及充填响应模式[J]. 中国科学D辑——地球科学, 2004, 34: 74–82.
- Lin Changsong, Wang Qinghua, Xiao Jianxin, et al. Sequence architecture and depositional response of the Cretaceous Kuiche Depression[J]. Science in China Ser. D(Earth Sciences), 2004, 34: 74–82.
- [22] 王华. 层序地层学基本原理、方法与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2008.
- Wang Hua. Basic principles, methods and applications of sequence stratigraphy[M]. Wuhan: China Geological University Press, 2008.
- [23] Jiang J, Shi H S, Lin C S, et al. Sequence architecture and depositional evolution of the Late Miocene to Quaternary northeastern shelf

- margin of the South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 81: 79–97.
- [24] Van Wagoner J C, Bertram C T. Sequence stratigraphy of foreland basin deposits [J]. American Association of Petroleum Geologists Memoir 64, 1995: 487.
- [25] Mitchum R M, Van Wagoner J C. High frequency sequences and their stacking patterns; sequence stratigraphic evidence of high frequency eustatic cycles[J]. Sedimentary Geology, 1991, 70: 1240–1256.
- [26] Zhou W, Wang Y M, Gao X Z, et al. Architecture, evolution history and controlling factors of the Baiyun submarine canyon system from the middle Miocene to Quaternary in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 67: 389–407.
- [27] Vail P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, Part 1 [C]. In: Bally A W, ed. Atlas of seismic stratigraphy. American Association of Petroleum Geology Studies in Geologists, 1987, 27: 1–10.
- [28] 林畅松. 沉积盆地的层序和沉积充填结构及过程响应[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 849–862.
- Lin Changsong. Sequence and depositional architecture of sedimentary basin and process responses [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 849–862.
- [29] 张训华, 李延成, 蔡振华. 南海海盆形成演化模式初探[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(2): 1–7.
- Zhang Xunhua, Li Yancheng, Qi Zhenhua, et al. An approach to the formation and evolution model of South China Sea Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 17(2): 1–7.
- [30] 吴时国, 刘展, 王万银, 等. 东沙群岛海区晚新生代构造特征及其对弧—陆碰撞的响应[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(6): 481–490.
- Wu Shiguo, Liu Zhan, Wang Wanyin, et al. Late Cenozoic Neotectonics in the Dongsha Islands region and its Responds to collision between Chinese Continental Margin and Luzon [J]. Oceanologia ET Limnologia Sinica, 2004, 35(6): 481–490.
- [31] 林畅松, 初凤友, 高金耀, 等. 论南海新生代的构造运动[J]. 海洋学报, 2007, 29(4): 87–96.
- Lin Changsong, Chu Fengyou, Gao Jinyao, et al. On tectonic movement in the South China Sea during the Cenozoic [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(4): 87–96.
- [32] 姚伯初, 杨木壮. 南海晚新生代构造运动与天然气水合物资源[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(4): 93–100.
- Yao Bochu, Yang Muzhuang. Tectonic movements in the Late Cenozoic and gas hydrate resources in the South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(4): 93–100.
- [33] Zhang P Z, Molnar P, Downs W R. Increased sedimentation rates and grain sizes 2–4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates [J]. Nature, 2001, 410: 891–897.

(编辑 张玉银)

(上接第762页)

- [47] 钟大康. 致密油储层微观特征及其形成机理—以鄂尔多斯盆地长6—长7段为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 49–61.
- Zhong Dakang. Micro-petrology, pore throat characteristics and genetic mechanism of tight oil reservoirs—A case from the 6th and 7th members of Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 49–61.
- [48] 屈红军, 李文厚, 梅志超, 等. 论层序地层学与含油气系统在油气勘探中的联系—以鄂尔多斯中生代盆地为例[J]. 地质论评, 2003, 49(5): 495–499.
- Qu Hongjun, Li Wenhui, Mei Zhichao, et al. Relationship between sequence stratigraphy and petroleum system in oil and gas exploration; An example in the Mesozoic Ordos Basin [J]. Geological Review, 2003, 49(5): 495–499.
- [49] 陈全红, 李文厚, 高永祥, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组深湖沉积与油气聚集意义[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(S1): 39–48.
- Chen Quanhong, Li Wenhui, Gao Yongxiang, et al. Deep lacustrine sediment and hydrocarbon accumulation in Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos basin [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007, 37(S1): 39–48.
- [50] 赵靖舟, 杨县超, 武富礼, 等. 论隆起背景对鄂尔多斯盆地陕北斜坡区三叠系油藏形成和分布的控制作用[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 648–655.
- Zhao Jingzhou, Yang Xianchao, Wu Fuli, et al. Controlling of uplifts on the Triassic petroleum accumulation and distribution in North Shaanxi Slope, Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 648–655.
- [51] 肖柯相. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长8油藏特征及成藏主控因素研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- Xiao Kexiang. The researching of the characteristic and main controlling factors of Chang-8's oil reservoir in Jiyuan area, Ordos Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [52] 武富礼, 赵靖舟, 闫世可, 等. 陕北地区中生界石油补偿成藏规律研究[J]. 石油学报, 2007, 28(3): 23–31.
- Wu Fuli, Zhao Jingzhou, Yan Shike, et al. Compensatory petroleum accumulation rules in the Mesozoic of Shaanbei area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3): 23–31.
- [53] 王乃军, 赵靖舟, 赵卫卫, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长6油层组“准连续型”油气藏成藏主控因素[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(4): 8–13.
- Wang Naijun, Zhao Jingzhou, Zhao Weiwei, et al. Key controlling factors for petroleum accumulation in “quasi-continuous” oil reservoirs of Chang 6 oil-bearing formation of Triassic, Ordos basin [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2012, 48(4): 8–13.
- [54] 席胜利, 刘新社. 鄂尔多斯盆地中生界石油二次运移通道研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2005, 35(5): 628–632.
- Xi Shengli, Liu Xinshe. Petroleum secondary migration pathway in Mesozoic period, Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2005, 35(5): 628–632.

(编辑 张亚雄)