

层序地层学标准化理论在陆架坡折-陆坡区的应用

——以珠江口盆地中新世沉积层序为例

陈维涛¹,徐少华²,孙 珍³,何 敏¹,姚佳利¹,王英民⁴,卓海腾⁵

[1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东深圳518000; 2. 重庆科技学院复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室,重庆401331; 3. 中国科学院南海海洋研究所边缘海与大洋地质重点实验室,广东广州510301; 4. 浙江大学海洋学院,浙江舟山316021; 5. 中山大学海洋科学学院,广东珠海519082]

摘要:层序地层学标准化理论在陆架坡折-陆坡深水区的应用尚未成熟。截至目前,基于浅层高分辨率地震和露头资料对深水层序开展的研究大多聚焦于深水水道或盆底扇内部,而忽视了与上陆坡以及陆架体系的系统对比。将层序地层学标准化理论应用于珠江口盆地中新世(13.8 Ma前后)的陆架坡折到陆坡区,通过三维地震资料的系统解释、属性提取、可视化和钻井信息分析,建立了从陆架到陆坡区的统一层序地层格架。在此基础上,明确了珠江口盆地陆架坡折-陆坡深水区中新世沉积层序具有海侵体系域和高位体系域厚度薄、强制海退体系域和低位体系域前积层厚度大,以及底积层(主要为深水扇)普遍发育于低位体系域的层序地层发育特征。深水层序地层格架的建立应从陆架坡折区到深水区整体考虑,结合“源-汇”体系演化特征进行三维空间的系统对比,才能准确划分各个体系域,从而更好地认识陆架-陆坡-深水区的沉积耦合关系。

关键词:陆架坡折-陆坡;深水扇;标准化;层序地层;中新世;珠江口盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Application of standardized sequence stratigraphy theory in the shelf break-to-slope area: A case study of the Middle Miocene sedimentary sequence in the PRMB

Chen Weitao¹, Xu Shaohua², Sun Zhen³, He Min¹, Yao Jiali¹, Wang Yingmin⁴, Zhuo Haiteng⁵

[1. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Complex Oil and Gas Field Exploration and Development, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China; 3. Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510301, China; 4. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang 316021, China; 5. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai, Guangdong 519082, China]

Abstract: The application of standardized sequence stratigraphy theory is yet to be improved in the shelf break-to-slope area in deep water. As of now, the researches on the sequence stratigraphic framework mostly focus on deep-water channels or interior basin floor fans (BFFs) based on the high-resolution seismic data of shallow layers and outcrop observation, while ignoring systematic correlation with the upper slope and shelf system. In this regard, the study sets up a uniform sequence stratigraphic framework running from continental shelf to slope on the basis of systematic interpretation, attribute extraction and visualization of 3D seismic data, as well as analysis of drilling and logging data, while applying the standardized sequence stratigraphy theory to the Middle Miocene (around 13.8 Ma) shelf break-to-slope area in deep water in the Pearl River Mouth Basin (PRMB). As shown by the newly established framework, deposit sedimentary sequences in both transgressive systems tract (TST) and highstand systems tract (HST) are extremely thin as a whole; foreset beds of the falling stage systems tract (FSST) and lowstand systems tract (LST), however, are much thicker, and bottomset beds (mainly of deep-water fan) are widely developed in the LST. In a

收稿日期:2020-04-20;修订日期:2021-10-06。

第一作者简介:陈维涛(1983—),男,高级工程师,石油地质勘探。E-mail: chenwt2@cnooc.com.cn。

通讯作者简介:徐少华(1987—),男,讲师,层序地层学和沉积学。E-mail: xsh_xu@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05024-004);中海石油(中国)有限公司综合科研项目(CNOOC-KJ135ZDXM37SZ02SZ)。

nutshell, the establishment of deep-water sequence stratigraphic framework is supposed to have a holistic consideration from shelf break to deep-water areas at first; 3D systematic comparison of seismic events is to be followed while analyzing the evolutionary features of "Source-to-Sink" system, with a view to better dissecting the system tracts and understanding the coupling relationship of shelf, slope and deep-water sedimentary facies.

Key words: shelf break-to-slope area, deep-water fan, standardization, sequence stratigraphy, Middle Miocene, Pearl River Mouth Basin (PRMB)

层序地层学的出现为地层对比、等时地层格架的建立和沉积环境的分析给出了合理的解释。自Catuneanu等^[1-3]在2009年将层序地层学理论进行标准化,即对层序地层学的众多学派(包括沉积层序、成因层序和T-R层序)的异同进行系统对比以来,目前沉积层序的应用最为普遍,即习惯以不整合面作为层序边界。沉积层序的分类中又以Hunt等^[4]在1992和1995年建立的层序模式的应用最广,也就是将一个完整的3级层序细分为4个体系域,由底至顶依次为:低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)、高位体系域(HST)和强制海退体系域(FSST),Catuneanu等^[1]称为“沉积层序IV”并已广泛应用于全球不同类型的海相和湖相盆地、不同级次或不同尺度的资料当中,也被不同的研究手段(如地震、测井、露头 and 模拟实验)所采纳^[5-7]。但总的来说,层序地层学在陆架边缘的应用频次远高于深水陆坡-深海平原地区,原因在于:①相对海平面变化对深水沉积体系是否产生影响,证据还不明确,现代观测难度大;②受可容纳空间变化影响,陆架沉积体系会迅速发生相应变化,但由于距岸甚远,深水沉积体系不见得随即发生改变;③深水沉积体系不仅受物源的控制,还受到等深流、内波和内潮汐等其他因素的影响。这些都充分反映了层序地层学应用于深水盆地的难度。近年来,Johnson等^[8]、van der Merwe等^[9]和Flint等^[10]基于详细的露头观测试图为层序地层学应用于深水盆地提供实例。但由于露头视野的限制,深水层序模式的建立大多聚焦于深水沉积单元本身^[11],如深水水道或盆底扇内部,束缚了层序格架在三维空间上的对比,缺少与陆坡、甚至陆架进行层序意义上的地层对比证据。基于地震的宏观视野剖析深水层序的研究也不多见。Catuneanu等^[1]在Posamentier和Kolla^[12]对东婆罗洲深水扇研究的基础上,对深水扇的地震反射特征进行详细的解剖,探索性地将层序地层学标准化理论应用于深水沉积体系。但这种模式在实际应用过程中仍遇到一些问题,例如:依据少数典型剖面中的地震相特征分析所建立的层序地层格架是否具备侧向对比的条件,如何与上陆坡甚至

陆架的层序进行对比。以上说明,层序地层学在陆坡深水区的应用尚未成熟。珠江口盆地是中国南海北部发育的准被动大陆边缘型盆地,稳定供源的古珠江流域、宽阔的陆架-陆坡古地理背景、周期性的海平面升降和持续的构造沉降为层序地层学标准化理论的推广创造了地质条件^[13-15]。本文以珠江口盆地中中新世三级层序界面SB13.8上下最大海泛面(MFS)之间的地层为例,对陆架坡折-陆坡的层序结构进行剖析,旨在说明:①传统深水扇模式中简单地将深水扇中底部的粗粒物质划归为FSST的做法需谨慎;②解决深水层序的划分问题需将深水层序的划分结果与陆坡甚至陆架的层序划分结果相结合;③以层序地层格架的区域等时性和区域可编图性为准则,才能确保深水层序划分结果的实践意义以及后续区域沉积相研究的有效进行。

1 区域地质概况

珠江口盆地位于南海北部大陆边缘的东区,是因欧亚板块和印澳板块碰撞以及太平洋板块俯冲所形成的含油气盆地(图1)^[16-17]。新生界的地层由老到新依次发育神狐组(古新统)、文昌组(始新统)、恩平组-珠海组(渐新统)、珠江组-韩江组-粤海组(中新统)、万山组(上新统)和第四系^[16-18]。白云凹陷是珠江口盆地内面积最大的凹陷,约12 000 km²,水深200~3 000 m,在沉积演化过程中长期处于陆架向深水环境演变的过渡地带^[16,19]。自晚渐新世白云运动发生以来(约23.8 Ma),白云凹陷由整体裂陷拉张的构造背景转变为稳定的热沉降^[20]。其中,中中新世构造沉降幅度较大,平均介于500~1 000 m。此时白云凹陷除了控凹边界断裂活动之外,大多数断层活动已经停止,沉积环境演变为深水陆坡,与现今的沉积格局基本一致^[16]。

前人对白云凹陷中中新世韩江组做了大量的层序地层学研究,针对番禺低隆起至白云凹陷北坡一带的研究最为详实,共界定了9个三级层序界面(SB23.8, SB21, SB17.5, SB16.5, SB15.5, SB14.8,

SB13.8, SB12.5 和 SB10.5), 其间包含 8 个三级层序^[21~24](本文层序的命名以三级层序的底界面为准, 例如 SB13.8 和 SB12.5 之间的地层将其命名为 SQ13.8)。层序内部又可细分为低位体系域、海侵体系域、高位体系域和强制海退体系域^[23~24]。特别是 13.8 Ma 受全球气候变冷引起的海平面大幅下降, 沉积速率普遍增高, 盆地内河口—深水沉积物的侵蚀作用显著增强, 不仅形成了陆架边缘三角洲, 深水陆坡上还发育多种类型的深水沉积, 如海底峡谷、单向迁移水道和块体搬运复合体等^[25~26]。

2 层序地层框架

从各体系域的井—震识别标志出发, 根据地震反射终止关系、岩性和测井曲线的旋回突变面, 进一步展开基于三维地震的系统解释和对比, 最终建立区域性的层序地层格架。

SB13.8 之下的 HST(介于 SQ14.8MFS 和 SQ14.8 BSFR)的顶、底界面在深水陆坡区为相邻的反射波极性相反的地震同相轴(图 2), 地层厚度薄。因为高海平面时期, 陆架具备充足的可容空间接受沉积, 陆源碎屑物质难以向深水区大规模推进, 导致深水区的 HST 地层厚度很薄(<18 ms)。

随着相对海平面的下降, FSST 在研究区中、西部(强物源供给区)表现为高角度的斜交型前积反射, 这种缺失顶积层的高角度前积是 FSST 区别于 HST 的典

型相标志(图 2a,c)。前积层沿陆坡走向展布, 厚度普遍在 60 ms 以上(图 3a)。与之对比的是, 研究区东部 W952D 井附近由于高地势的古地貌背景而远离河口, 外陆架至上陆坡一带长期缺乏高角度前积, 地层倾角平缓且侧向上广泛延伸(图 2b)。总的来说, FSST 的前积层厚度大且沿陆坡走向展布, 向陆和向海双向减薄(图 4)。底积层(即 W611 井以西)局部上超于云开低凸起, W611 井以东底积层厚度稍有增大。

LST 是由于沉积物的供给速率超过可容空间的增长速率所形成, 以最大海退面 SQ13.8MRS 和层序界面 SB13.8 为顶、底面。物源供给区的 LST 是位于 FSST 之上的大规模进积的陆架边缘三角洲, 但具有频率更低、振幅更强的地震反射特征(图 2a,d)。研究区东部的 LST 却表现为退积和向岸的上超(图 2b,c)。这是因为该区域已偏离河口, 沉积物的供给速率小于可容空间的增长速率所致。因为此时的 SQ13.8MRS 和 SB13.8 仍然能够与研究区西部进行地震层位的等时追踪和对比, 所以该层段仍应解释为 LST 而不是 TST, 尽管此时的地震反射终止关系已和 TST 类似。结合地层等厚度图, LST 发育的陆架边缘三角洲主体位于研究区西部, 即 W521 井和 W311 井以南的区域, 厚度 75 ~ 125 ms(图 3b)。但是厚层的深水扇并没有发育在三角洲供给的正前方, 而是以一定交角出现在研究区的东南部, 即 W611 井钻遇处, 厚达 150 ms 以上(图 4), 其沉积展布规律在第 3 节重点论述。

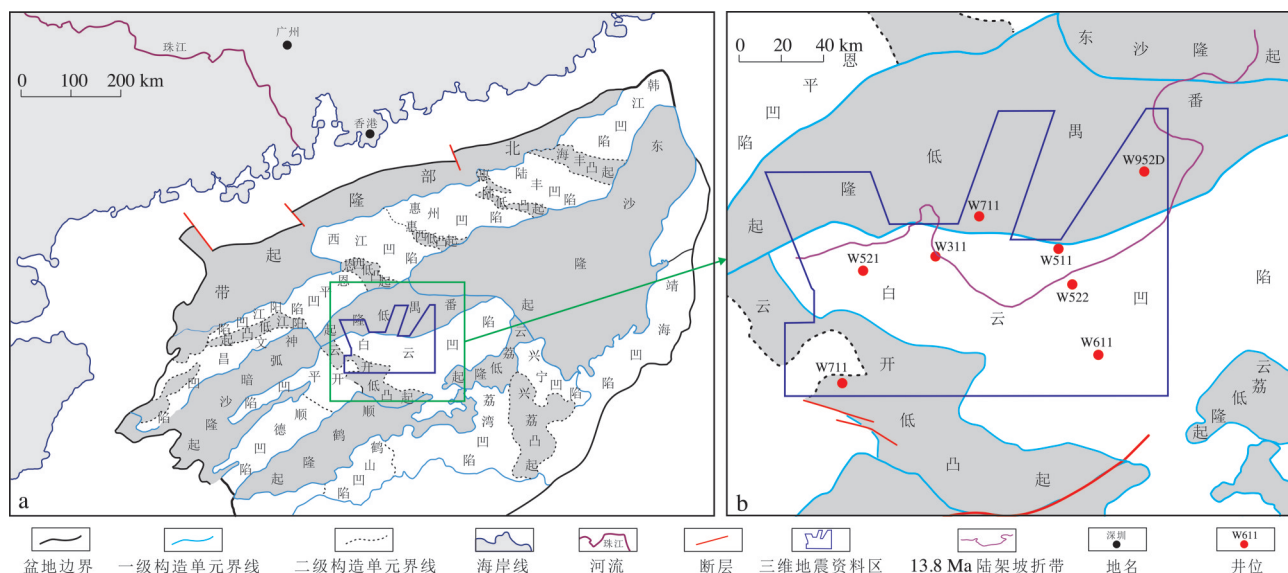


图1 珠江口盆地构造单元划分和研究区位置

Fig. 1 Structure units for the PRMB and map of the study area location

a. 珠江口盆地构造单元划分; b. 13.8 Ma 的陆架坡折带及研究区地震和钻井概况(据文献[14]和[15])

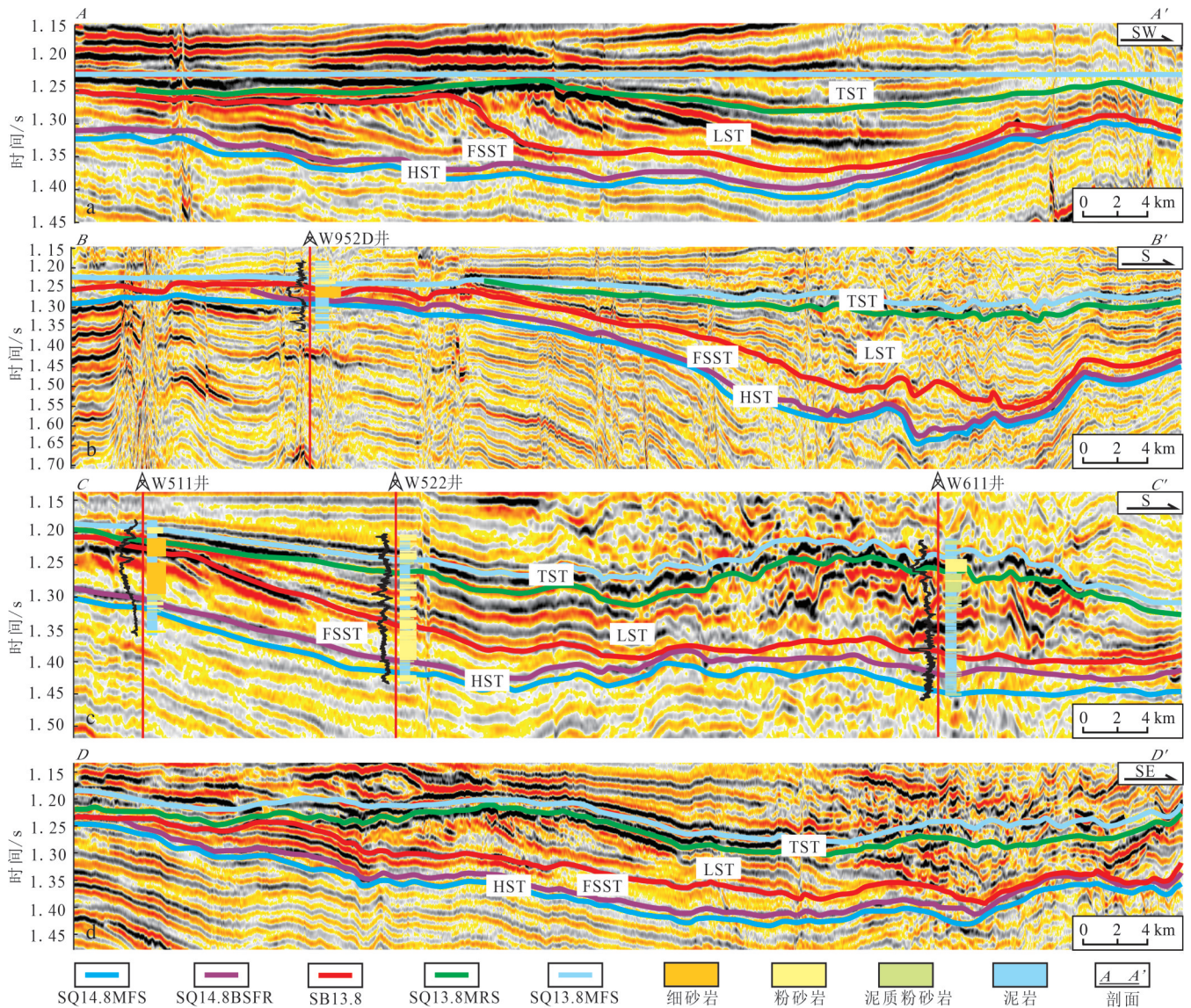


图2 珠江口盆地白云凹陷北坡顺物源方向的层序地层格架(剖面位置见图3)

Fig. 2 Longitudinal sequence stratigraphic framework along provenance direction in the north slope of Baiyun Sag, PRMB (see Fig. 3 for the section locations)

a. FSST在研究区中、西部(强物源供给区)表现为高角度斜交型前积反射; b. FSST在研究区东部地层倾角平缓且侧向上广泛延伸; c. 研究区东部的LST表现为退积和向岸上超特征; d. 物源供给区的LST发育大规模进积的陆架边缘三角洲, 相较FSST频率更低, 振幅更强

SB. 层序界面; MFS. 最大海泛面; MRS. 最大海退面; BSFR. 强制海退体系域底界面

(地震剖面以层拉平显示; 井旁曲线为GR曲线; 由于地震测线方位的不同, 特别是和主物源供给位置的差异会导致体系域的地震识别特征发生变化。)

由于海平面的快速上升, TST(介于SQ13.8MRS和SQ13.8MFS)的沉积滨线向陆回退, 深水陆坡区处于欠补偿环境, 厚度极薄。其中SQ13.8MFS的区域连续性好, 振幅极强(可能和钙质胶结作用有关), 在白云凹陷西部表现为下超面, 易于识别和大范围的追踪对比(图2d)。

3 深水陆坡沉积体系

SQ13.8的LST在层序地层格架的建立过程中具有

一定的特殊性, 其层序样式的不同是由于沉积体系宏观展布规律的不同所致, 所以对LST的沉积体系进行精细刻画。

在W311井附近, 地震相呈强振幅、平行-亚平行, 且中-高连续性反射, 在均方根振幅属性上呈现出沿北北西方向带状展布的强振幅, 测井曲线显示发育一个反旋回高含砂率层段。

西部的W521井具有被波浪强烈改造的特点, 砂体呈现出多方向和多期次的展布, 总体表现为NE-SW向。结合前积反射的区域位置, LST的陆架边缘三角

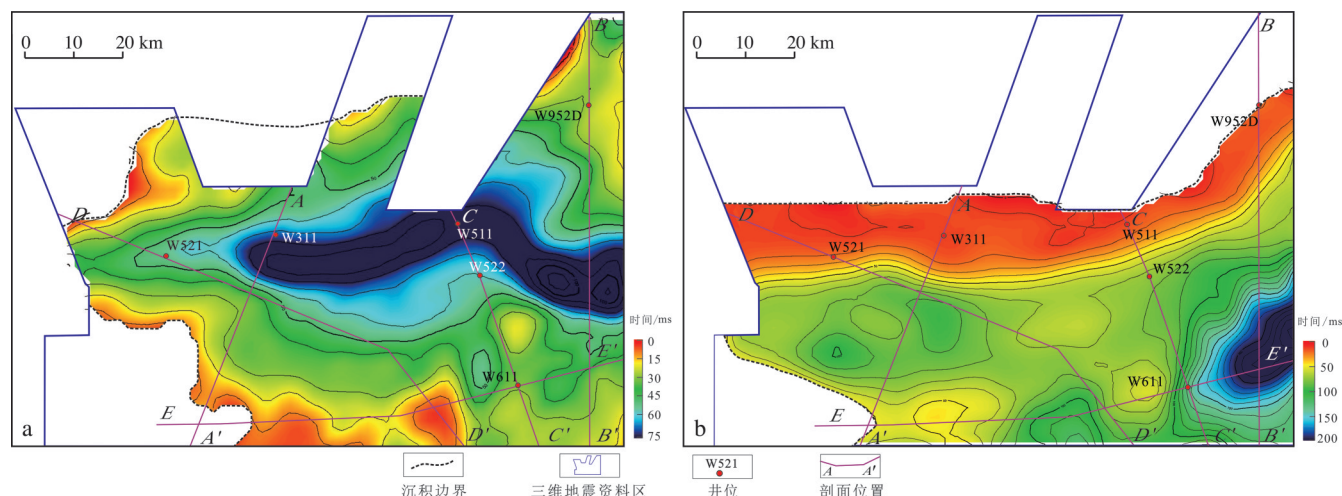


图3 珠江口盆地白云凹陷北坡SB13.8上、下体系域地层时间等厚图

Fig. 3 Time isopach maps of individual system tracts above and below SB13.8 in the north slope of Baiyun Sag, PRMB

a. SB13.8之下FSST地层;b. SB13.8之上LST地层

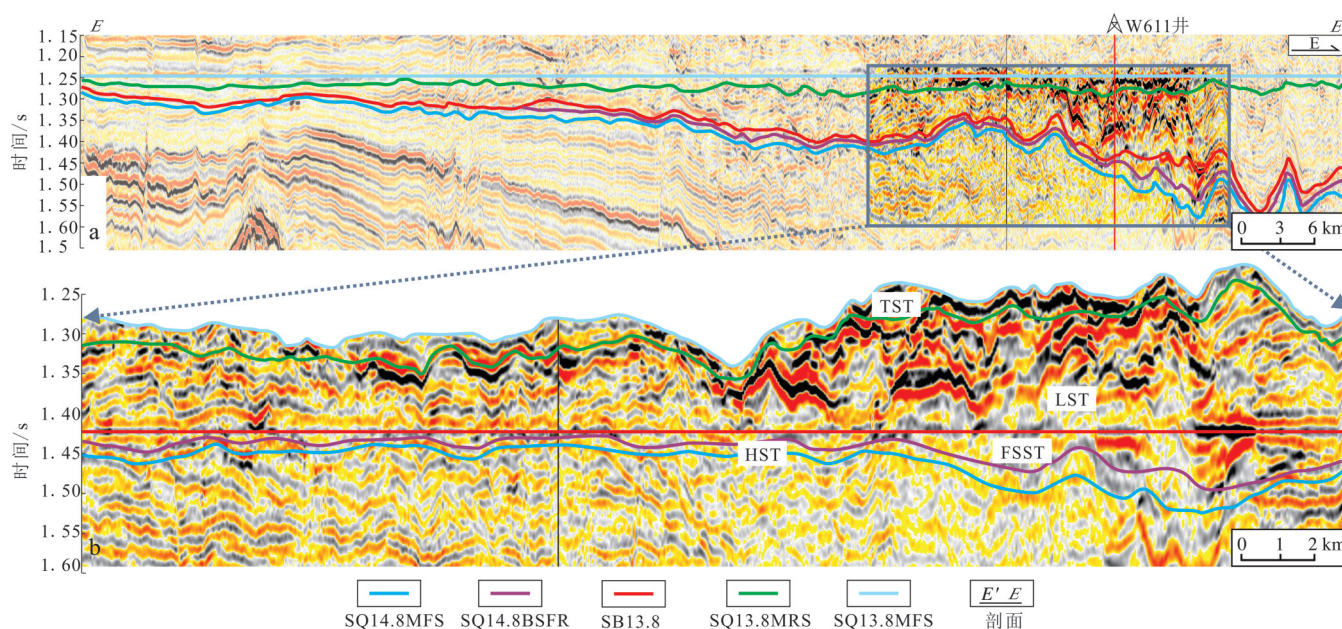


图4 珠江口盆地白云凹陷南部沿WE方向的层序地层格架(剖面位置见图3)

Fig. 4 WE-striking sequence stratigraphic framework in southern Baiyun Sag, PRMB (see Fig. 3 for the section location)

洲发育在研究区中西部(图5)。但受W711井附近的云开低凸起的影响,深水沉积在西部的规模不大,三角洲携带的沉积物难以继续向南推进,而是在侧向水流(如沿岸流或等深流等)的搬运作用下转向SE方向,沉积在东部可容空间充足的W611井附近形成深水扇沉积。值得关注的是,该深水扇的正北方向缺乏明显的前积,而表现为沿岸展布的、厚度较为一致的条带状砂体,解释为沿岸砂坝复合体(图2c)。SQ13.8 LST的这种受波浪强烈改造的沉积展布特征可以和澳大利亚东南部弗雷泽岛的现代地貌特征^[27]相类比,由此建立SQ13.8 LST的沉积模式(图6)。

4 讨论

4.1 与常规深水层序模式的区别

当前层序地层学在陆架和上陆坡的应用比较广泛,层序的划分和对比也相对成熟,但在深水区的应用仍比较有限。截至目前,深水层序地层格架的建立大多习惯于从深水沉积单元本身的地层叠置规律入手,并以此为基础进行相关体系域和层序的划分和命名^[28-30]。但在实际研究过程中,有关深水层序的研究大多是根据已有的模式,将陆坡的粗粒沉积物划归于

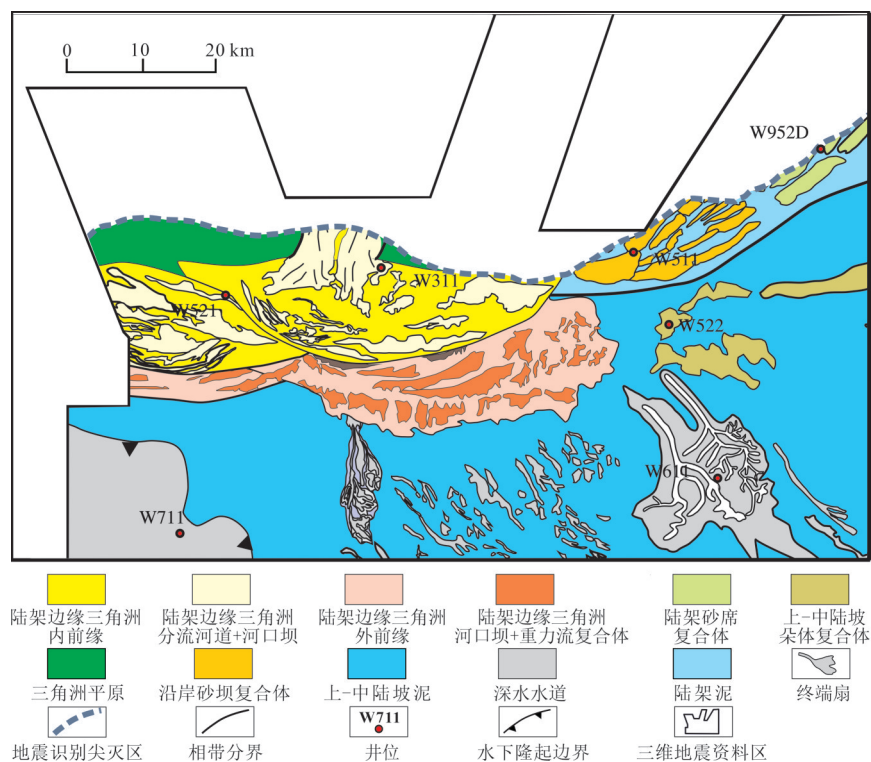


图5 珠江口盆地白云凹陷北坡SQ13.8 LST的沉积相

Fig. 5 Sedimentary features of the SQ13.8 LST in the north slope of Baiyun Sag, PRMB

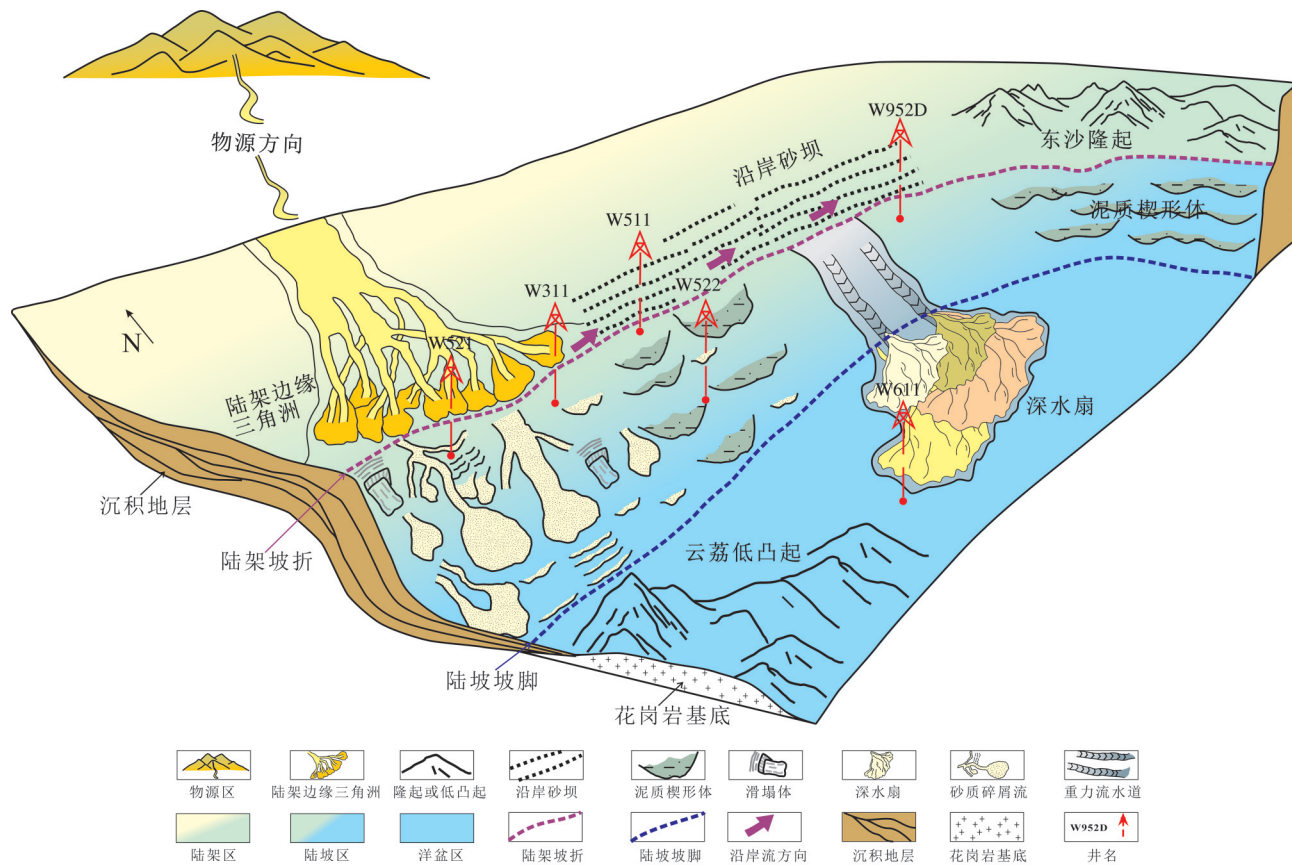


图6 珠江口盆地白云凹陷北坡SQ13.8 LST的沉积模式

Fig. 6 Depositional model of the SQ13.8 LST in the north slope of Baiyun Sag, PRMB

FSST和LST,上覆细粒沉积物划归于TST和HST,使一个完整的深水层序旋回起始于随着下切谷或深水水道被带入海盆的碎屑流或浊流沉积,结束于陆源体系的向岸回撤。最终将体系域按沉积物由粗到细的顺序以FSST>LST>HST>TST来分配^[31-33]。

常被忽略的是以上关于深水层序的划分是以近陆源沉积背景为前提,即深水沉积体系能够直接并且快速地响应于陆架沉积体系的变化^[34-35]。也就是说,陆架体系由于基准面的变化造成岸线的进退直接作用于深水体系也随即发生改变。但在以“浪控”和宽陆架沉积背景为主的珠江口盆地除了顺物源方向的搬运过程之外,还需重点关注侧向水动力的搬运作用。正因如此,珠江口盆地中中新世的深水层序地层格架的研究结果有别于以顺物源为主导的常规深水层序模式,区别主要表现在:

1) FSST具有较大厚度的前积层并向陆和向海双向减薄直至尖灭,深水扇几乎全部发育在LST(图4)。这区别于理论模式中“FSST(尤其是FSST晚期,临近层序界面)是一个完整层序内深水储层最具潜力的体系域”的认识,因为这一结论仅是基于陆源物质通过下切河谷和陆坡侵蚀沟谷对盆底扇直接供源的考虑(图7)。

2) 三角洲和盆底扇的对应关系根据地震测线方位的不同,可以表现出“有洲无扇”、“无洲无扇”、“无洲有扇”和“有洲有扇”。以SQ13.8LST为例,如图2所

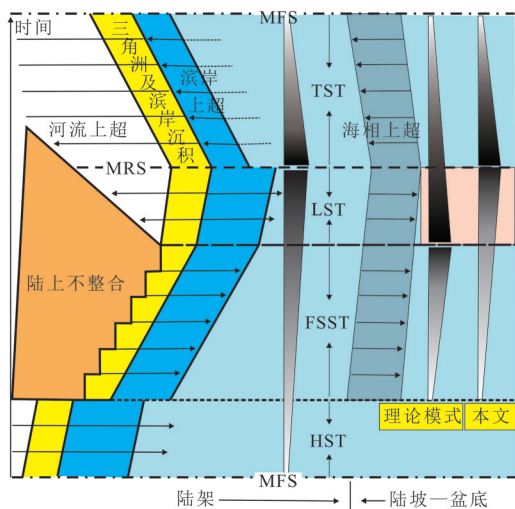


图7 从陆架、陆坡到盆底的沉积样式(据文献[36]修订)

Fig. 7 Depositional patterns from shelf, slope to basin floor

(modified from reference [36])

[理论模式中认为FSST(尤其是FSST晚期,临近SB)是一个完整层序内深水储层最具潜力的体系域,这一结论仅是基于陆源物质通过陆表下切河谷和陆坡侵蚀沟谷对盆底扇直接供源的考虑。但由于强烈的侧向水动力的作用,珠江口盆地中中新世的盆底扇发育在LST。]

示,这一体系域内部就囊括了上述4种类型,丰富了理论模式中仅强调的“有洲有扇”的单一类型,说明在深水层序地层的实践过程中更应具有三维空间体的概念。

4.2 深水层序划分的研究思路

过去建立深水层序地层格架时,常常从复杂的深水体单元内部出发开展工作,以此为基础建立层序地层格架,其结果能否与上陆坡、甚至陆架体系进行层序意义上的地层对比往往被忽略,以至于层序地层学的应用常处于“分块”或“分沉积环境”探索的局面,容易导致全盆地内层序格架建立的混乱,最终使层序地层格架难以统一。

例如在图4b中,当视域过小时,依靠剖析扇体内部的水道、水道-堤岸复合体或朵体等沉积单元进行层序划分时,很有可能将杂乱的强振幅反射即扇体底部的水道化丰富的区域划归为FSST,上部划归为LST,以便更加符合层序地层的理论模式。但在实际研究过程中,当与陆坡进行层序对比时,结果发现FSST极薄,几近尖灭,深水扇体几乎全部发育于LST(图4a)。这说明层序标准化理论模式中将深水扇底部最粗粒的沉积物划归为FSST的做法不具有普遍意义,实际研究不能直接套用深水层序地层的理论模式,还需因地制宜。如果深水层序格架建立的结论不能和陆坡,甚至陆架的方案等时等比,将导致不同工区或不同沉积环境的层序无法对比和区域性编图,那么深水层序地层学的实践意义将大为减弱。因此,在研究方法上本文建议从陆坡的地层叠置规律入手,根据陆坡层序的划分结果继而向深水区“引轴”来进行深水层序结构的研究,并进行三维空间上的系统对比,而不再仅仅局限于分析深水沉积单元内部的地层叠置规律来建立深水层序地层格架。目的是以层序地层格架的区域等时性和区域可编图性为原则,既确保了深水层序划分结果的实践意义,又是全盆地尺度上构造、沉积和地层对比的基础。只有经过三维空间上的系统对比才能准确厘定“源-汇”耦合关系,若仅依据二维剖面的观察,忽略了三维空间体的概念,有可能得出一些片面结论。

5 结论

1) 确立了白云深水区整体上SQ13.8的TST和HST极薄,FSST和LST具有厚层前积层,但底积层(即深水扇)普遍集中于LST的深水层序地层格架。

2) 珠江口盆地中中新世以“浪控”和宽陆架为背

景,建立的深水层序地层格架和传统的模式有所区别,表现在:FSST的前积层厚和底积层薄,深水扇主体发育在LST,传统层序模式中简单的将深水扇底部的粗粒沉积划归为FSST的做法需谨慎;三角洲和盆底扇的对应关系根据地震测线方位的不同,可以表现出“有洲无扇”、“无洲无扇”、“无洲有扇”和“有洲有扇”4种类型。

3) 建议根据陆坡体系域的分析结果向深水盆地“引轴”来建立深水层序地层格架,继而进行三维空间的系统对比。以层序地层格架的区域等时性和区域可编图性为原则,确保深水层序划分结果的实践意义以及后续区域沉积相研究的有效进行。

参 考 文 献

- [1] Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 92(1): 1-33.
- [2] Catuneanu O, Galloway W E, Kendall C G S C, et al. Sequence stratigraphy: Methodology and nomenclature [J]. *Newsletters on Stratigraphy*, 2011, 44(3): 173-245.
- [3] Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy [M]. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 2006: 375.
- [4] Hunt D, Tucker M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: Deposition during base-level fall [J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 81(1): 1-9.
- [5] Burgess P M, Prince G D. Non-unique stratal geometries: Implications for sequence stratigraphic interpretations [J]. *Basin Research*, 2015, 27(3): 351-365.
- [6] 张曼莉,林畅松,何敏,等. 珠江口盆地晚渐新世陆架边缘三角洲沉积层序结构及演化[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 875-885.
Zhang Manli, Lin Changsong, He Min, et al. Sequence architecture and evolution of shelf-margin deltaic systems of the Late Oligocene in Pearl River Mouth Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 875-885.
- [7] Johannessen E P, Steel R J. Shelf-margin clinoforms and prediction of deepwater sands [J]. *Basin Research*, 2005, 17(4): 521-550.
- [8] Johnson S D, Flint S, Hinds D, et al. Anatomy, geometry and sequence stratigraphy of basin floor to slope turbidite systems, Tanqua Karoo, South Africa [J]. *Sedimentology*, 2001, 48(5): 987-1023.
- [9] Merwe W C, Flint S S, Hodgson D M. Sequence stratigraphy of an argillaceous, deepwater basin-plain succession: Vischkui Formation (Permian), Karoo Basin, South Africa [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(2): 321-333.
- [10] Flint S S, Hodgson D M, Sprague A R, et al. Depositional architecture and sequence stratigraphy of the Karoo basin floor to shelf edge succession, Laingsburg Depocentre, South Africa [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(3): 658-674.
- [11] Santra M, Goff J A, Steel R J, et al. Forced regressive and lowstand Hudson paleo-delta system: Latest Pliocene growth of the outer New Jersey shelf [J]. *Marine Geology*, 2013, 339(1): 57-70.
- [12] Posamentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(3): 367-388.
- [13] 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.
- [14] 柳保军,庞雄,颜承志,等. 珠江口盆地白云深水区渐新世—中新世陆架坡折带演化及油气勘探意义[J]. *石油学报*, 2011, 32(2): 234-242.
Liu Baojun, Pang Xiong, Yan Chengzhi, et al. Evolution of the Oligocene-Miocene shelf slope-break zone in the Baiyun deep-water area of the Pearl River Mouth Basin and its significance in oil-gas exploration [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(2): 234-242.
- [15] 陈维涛,孙珍,何敏,等. 珠江口盆地中中新世SQ14.8层序-沉积演化及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(5): 875-891.
Chen Weitao, Sun Zhen, He Min, et al. The mid-miocene stratigraphic-depositional evolution recorded by the SQ14.8 Layer in Pearl River Mouth Basin and its geological significances [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(5): 875-891.
- [16] 庞雄,陈长民,彭大钧,等. 南海珠江深水扇系统及油气[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Pang Xiong, Chen Changmin, Peng Dajun, et al. Pearl River deep water fan system and petroleum in South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [17] 孙珍,庞雄,钟志洪,等. 珠江口盆地白云凹陷新生代构造演化动力学[J]. *地学前缘*, 2005, 12(4): 489-498.
Sun Zhen, Pang Xiong, Zhong Zhihong, et al. Dynamics of Tertiary tectonic evolution of the Baiyun Sag in the Pearl River Mouth Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(4): 489-498.
- [18] 林畅松,施和生,李浩,等. 南海北部珠江口盆地陆架边缘斜坡带层序结构和沉积演化及控制作用[J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3407-3422.
Lin Changsong, Shi Hesheng, Li Hao, et al. Sequence architecture, depositional evolution and controlling processes of continental slope in Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea [J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3407-3422.
- [19] 吴伟,刘俊成,刘琮滢,等. 珠江口盆地白云凹陷珠江组陆架边缘三角洲沉积与生物遗迹特征[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(4): 152-162.
Wu Wei, Liu Juncheng, Liu Congying, et al. Sedimentary and ichonology characteristics of continental shelf-edge delta of Zhujiang Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2020, 44(4): 152-162.
- [20] 庞雄,陈长民,邵磊,等. 白云运动: 南海北部渐新统一中新统

- 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.
- [21] 冉怀江, 林畅松, 代一丁, 等. 珠江口盆地番禺天然气区东南缘坡折带韩江组中段沉积层序与岩性地层圈闭研究[J]. 沉积学报, 2013, 31(6): 1081-1087.
- Ran Huaijiang, Lin Changsong, Dai Yiding, et al. Sedimentary sequence and lithologic-stratigraphic trap of the middle segment of Hanjiang Formation in the Shelf Break Zone in Southeast Panyu natural gas area, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(6): 1081-1087.
- [22] 姜静, 张忠涛, 李浩, 等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 864-874.
- Jiang Jing, Zhang Zhongtao, Li Hao, et al. Late Miocene to quaternary sequence architecture and unidirectionally migrating channels in the northeastern continental slope, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4): 864-874.
- [23] 秦成岗, 施和生, 张忠涛, 等. 珠江口盆地番禺低隆—白云凹陷北坡SQ21.0层序陆架坡折带沉积特征及油气勘探潜力[J]. 中国海上油气, 2011, 23(1): 14-18.
- Qin Chenggang, Shi Hesheng, Zhang Zhongtao, et al. Sedimentary characteristics and hydrocarbon exploration potential along the SQ21.0 sequence shelf-break zone on Panyu low-uplift and the north slope of Baiyun Sag, Pearl River Mouth basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(1): 14-18.
- [24] 张听, 林畅松, 张忠涛, 等. 珠江口盆地北部早—中中新世滨线迁移轨迹与沉积体系演化[J]. 东北石油大学学报, 2020, 44(1): 99-111.
- Zhang Xin, Lin Changsong, Zhang Zhongtao, et al. Shoreline trajectory and depositional evolution of Early-Mid Miocene succession in Northern Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Northeast University of Petroleum, 2020, 44(1): 99-111.
- [25] 柳保军, 袁立忠, 申俊, 等. 南海北部陆坡古地貌特征与 13.8 Ma 以来珠江深水扇[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 476-482.
- Liu Baojun, Yuan Lizhong, Shen Jun, et al. Northern continental slope palaeogeomorphology and deep-water fan systems response of Pearl River since 13.8 Ma, South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 476-482.
- [26] 刘军, 庞雄, 颜承志, 等. 南海北部陆坡白云凹陷 13.8 Ma 深水扇沉积[J]. 特种油气藏, 2011, 18(4): 39-42.
- Liu Jun, Pang Xiong, Yan Chengzhi, et al. 13.8 Ma deep-water fan deposit in the Baiyun Sag on the north continental slope of South China Sea[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2011, 18(4): 39-42.
- [27] Boyd R, Rumig K, Goodwin I, et al. Highstand transport of coastal sand to the deep ocean: A case study from Fraser Island, southeast Australia[J]. Geology, 2008, 36(1): 15-18.
- [28] Lü C L, Yao Y J, Gong Y H, et al. Deepwater canyons reworked by bottom currents: Sedimentary evolution and genetic model[J]. Journal of Earth Science, 2012, 23(5): 731-743.
- [29] De G A, Catuneanu O. Sequence stratigraphy of the Eocene turbidite reservoirs in Albacora Field, Campos Basin, offshore Brazil[J]. AAPG bulletin, 2014, 98(2): 279-313.
- [30] 徐少华, 何敏, 庞雄, 等. 被动陆缘层序地层结构的侧向变化及其启示——以珠江口盆地中中新世 13.8 Ma 为例[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(4): 811-822.
- Xu Shaohua, He Min, Pang Xiong, et al. Lateral variation of sequence stratigraphic architecture on passive continental margin and its enlightenment: A case from the Middle Miocene in Pearl River Mouth Basin in 13.8 Ma[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 811-822.
- [31] 徐少华, 王英民, 何敏, 等. 珠江口盆地陆坡类型及其对深水储层的控制[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 1-11.
- Xu Shaohua, Wang Yingmin, He Min, et al. Slope types and their controlling effects on deep-water reservoir in the Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(5): 1-11.
- [32] 谢利华, 张博, 秦成岗, 等. 陆架坡折盆地强制海退及正常海退沉积——以珠江口盆地珠江组—韩江组为例[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1093-1100.
- Xie Lihua, Zhang Bo, Qin Chenggang, et al. Forced regression and normal regression deposition of basin with continental shelf slope-break: A case study on Zhujiang and Hanjiang Formations of Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1093-1100.
- [33] 宫越, 林畅松, 何敏, 等. 中国南海北部珠江口盆地早渐新世末破裂不整合特征及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 851-863.
- Gong Yue, Lin Changsong, He Min, et al. Characteristics and geological significance of unconformities at the late Early Oligocene in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4): 851-863.
- [34] 孙辉, 刘少治, 吕福亮, 等. 东非鲁武马盆地渐新统深水沉积层序地层格架组成和时空分布[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1): 170-181.
- Sun Hui, Liu Shaozhi, Lyv Fuliang, et al. Stratigraphic framework and temporal spatial distribution of Oligocene deepwater sedimentary sequence in Ruvuma Basin, East Africa[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 170-181.
- [35] 张忠涛, 张向涛, 孙辉, 等. 珠江口盆地渐新世陆架边缘三角洲沉积特征及其对成藏的控制作用[J]. 石油学报, 2019, 40(1): 81-89.
- Zhang Zhongtao, Zhang Xiangtao, Sun Hui, et al. Sedimentary characteristics of Oligocene shelf edge delta and their control on hydrocarbon accumulation in Pearl River Mouth Basin[J]. ACTA Petroleum Sinica, 2019, 40(1): 81-89.
- [36] Octavian C. Principles of sequence stratigraphy [M]. Alberta Canada: Department of earth and atmospheric sciences university of Alberta Edmonton, 2006.