

珠江口盆地珠江组强制海退砂体 与岩性油气藏 ——以惠州凹陷南部为例

吕建波

中海石油(中国)有限公司深圳分公司

摘 要 以珠江口盆地惠州凹陷南部中新统珠江组陆架泥岩内发育的条带状砂体为研究对象,综合利用岩心、测井、地震以及生产资料,研究砂体的特征、成因以及控制因素。这些砂体粒度较粗、物性好,测井 GR 曲线整体呈箱形或漏斗形;在地震反射剖面中呈强振幅特征,在均方根振幅属性平面图上呈北北东向的狭长条带状,并平行古岸线孤立展布。这些砂体在层序地层格架内属于强制海退体系域中的强制海退滨岸沉积。砂体的顶面和底面均与陆架泥岩呈突变接触;底面是趋势内强制海退面,具有高穿时特征;顶面是层序界面,对应基准面达到最低的时间点,并在后续的海侵过程中砂体被部分侵蚀改造,顶面也是海侵洪泛面,具有低穿时特征。长周期倾斜度旋回控制研究区内基准面变化,在此旋回的低值区间,全球海平面降低,在珠江口盆地引发强制海退,浅水高能滨岸砂体深入到原陆架区域,进而进入到碳酸盐台地环境。强制海退砂体是重要的油气储层和运移通道,也易于形成岩性圈闭,是油气勘探的重要目标。

关键词 强制海退;砂体;岩性油气藏;珠江组;惠州凹陷;珠江口盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

0 前 言

海退是岸线向海方向迁移,在此过程中高能环境沉积物进入原低能沉积环境中^[1]。在层序地层格架下海退可分为2种:其一为正常海退,是在基准面稳定或缓慢上升时期,由于沉积物注入超过可容空间的增长而引起岸线向海方向的迁移;其二为强制海退,是在基准面下降时期,可容空间负增长,岸线向海方向迁移^[2-4]。依据Exxon层序地层模型,高位体系域和晚期低位体系域发育正常海退,在早期低位体系域发生强制海退,强制海退沉积物位于相应的层序边界之上^[4-7]。而依据四分法体系域划分方案,沉积层序分为低位、海侵、高位和强制海退体系域,强制海退体系域又称为下降阶段体系域,强制海退沉积物位于相应层序边界之下^[1,3,8]。在强制海退过程中,陆源粗粒碎屑会进入陆架细粒沉积物中,并被后续的海侵体系域和高位体系域泥岩覆盖,因而强制海退砂体可构成良好的岩性圈闭^[9]。在层序地层学兴起之前,这种在陆架泥岩中平行于古海岸线的

条带状砂体的发育大多被解释为离岸砂坝、陆架砂脊等其他成因机制^[10-13]。这些机制在解释物源、水动力等方面存在不足,因而层序地层格架下的强制海退砂体或低位滨岸砂体逐渐取代了陆架砂脊等解释方案^[14-20]。

随着勘探、开发和生产资料的积累,笔者认识到在珠江口盆地惠州凹陷南部珠江组钻遇的部分油气藏属于岩性油气藏范畴,并且对岩性圈闭的认识也逐渐深化,认为部分圈闭的储层属强制海退滨岸砂体。本文对珠江组强制海退砂体的成因和分布规律进行了分析和总结,这不仅具有层序地层学意义,而且对提高油田采收率、滚动评价岩性圈闭以及指导其他地区的岩性油气藏勘探开发具有积极意义。

1 地质背景

珠江口盆地为古近纪以来形成的被动陆缘伸展盆地^[21],是南海北部大陆架重要的含油气盆地。盆地自北向南依次划分为北部断阶带、北部拗陷带、中央

收稿日期: 2018-08-30; 改回日期: 2018-12-07; 网络出版日期: 2020-03-03

本文受国家科技重大专项“南海东部海域勘探新领域及关键技术”(编号: 2016ZX05024-004)资助

第一作者: 吕建波,工程师,2010年毕业于中国石油大学(北京)矿产普查与勘探专业,获硕士学位,现从事油藏地质工作。通信地址: 518067 广东省深圳市南山区后海滨路(深圳湾段)3168号; E-mail: changjb622@163.com

隆起带、南部坳陷带和南部隆起带(图1a),惠州凹陷位于北部坳陷带中部,南接东沙隆起。研究区主要位

于惠州凹陷南部,并包含其与东沙隆起的结合部,为方便叙述,将工区(图1b)统称为惠州凹陷南部。

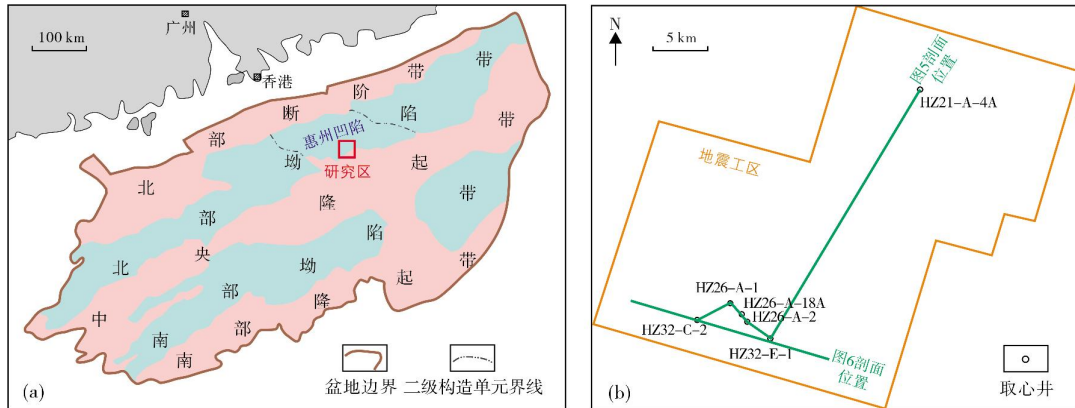


图1 研究区位置(a)及取心井分布(b)
Fig. 1 Location of study area (a) and coring wells (b)

盆地基底为前新生界变质岩和火山岩,基底之上依次发育始新统文昌组、始新统一渐新统恩平组、渐新统珠海组、下中新统珠江组、中中新统韩江组、上中新统粤海组、上新统万山组和第四系(图2a)。在研究区已发现并且开发了若干油气田,这些油气田并称为惠州油田群。惠州油田群的油气主要来自文昌

组深湖相烃源岩^[22]。珠江组是重要的含油气层系之一,为一套三角洲-滨岸-碳酸盐台地沉积^[23-24]。在工区早期的勘探实践中,外方作业者将珠江组砂体从下到上划分为L、K、J等系列(Levels),这些“系列”可近似对应岩性地层单元中的“段”。本文研究的K系列砂体是一套砂岩-泥岩单元,厚度约为300 m。

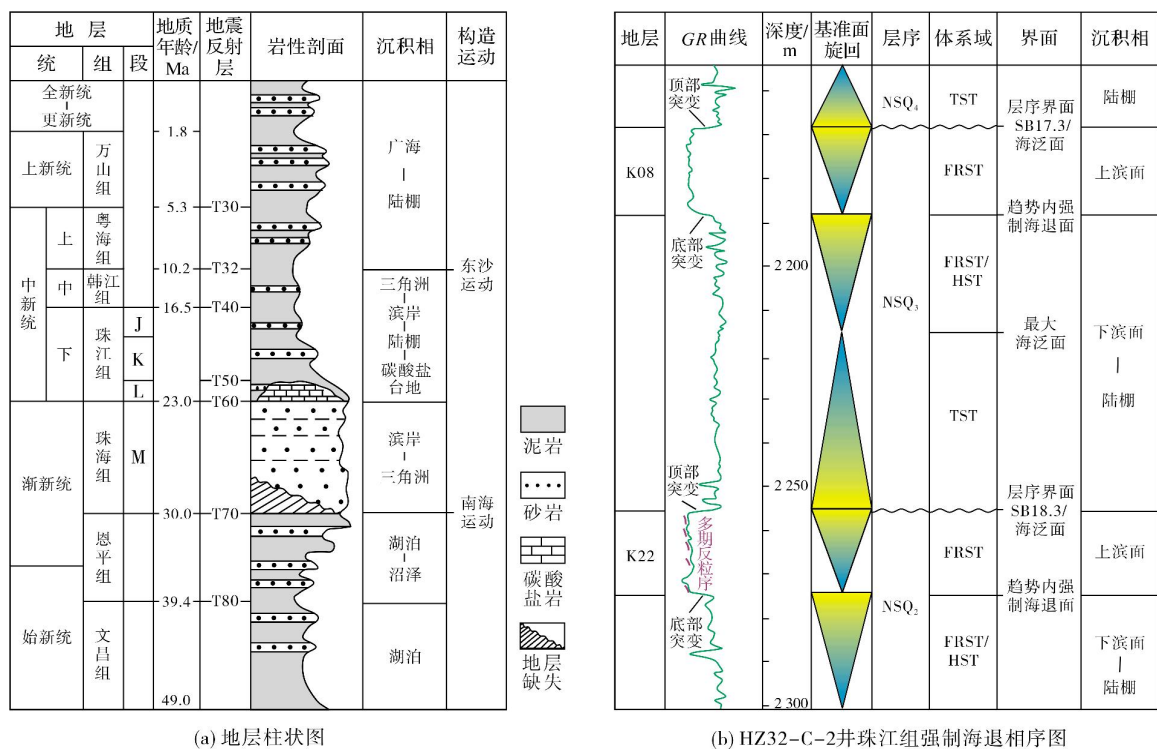


图2 珠江口盆地地层柱状图及惠州凹陷珠江组强制海退相序图

Fig. 2 Stratigraphic column of Pearl River Mouth Basin and forced regression facies sequence of Zhujiang Formation in Huizhou Sag

珠江组沉积时期,珠江口盆地处在稳定沉降的漂移阶段,在中新世距今18.5~16 Ma期间沉降速率为70 m/Ma^[21],珠江组整体上发育了稳定的陆架细粒沉积物。惠州凹陷珠江组发育K系列的强制海退砂体(图2b),包括K08层、K22层砂体,以K22层砂体最为典型。砂体整体上粒度粗、物性好,是陆架背景细粒沉积物内的优质油气储层。这2套砂体有比较详细的岩心资料,取心井井位见图1b。

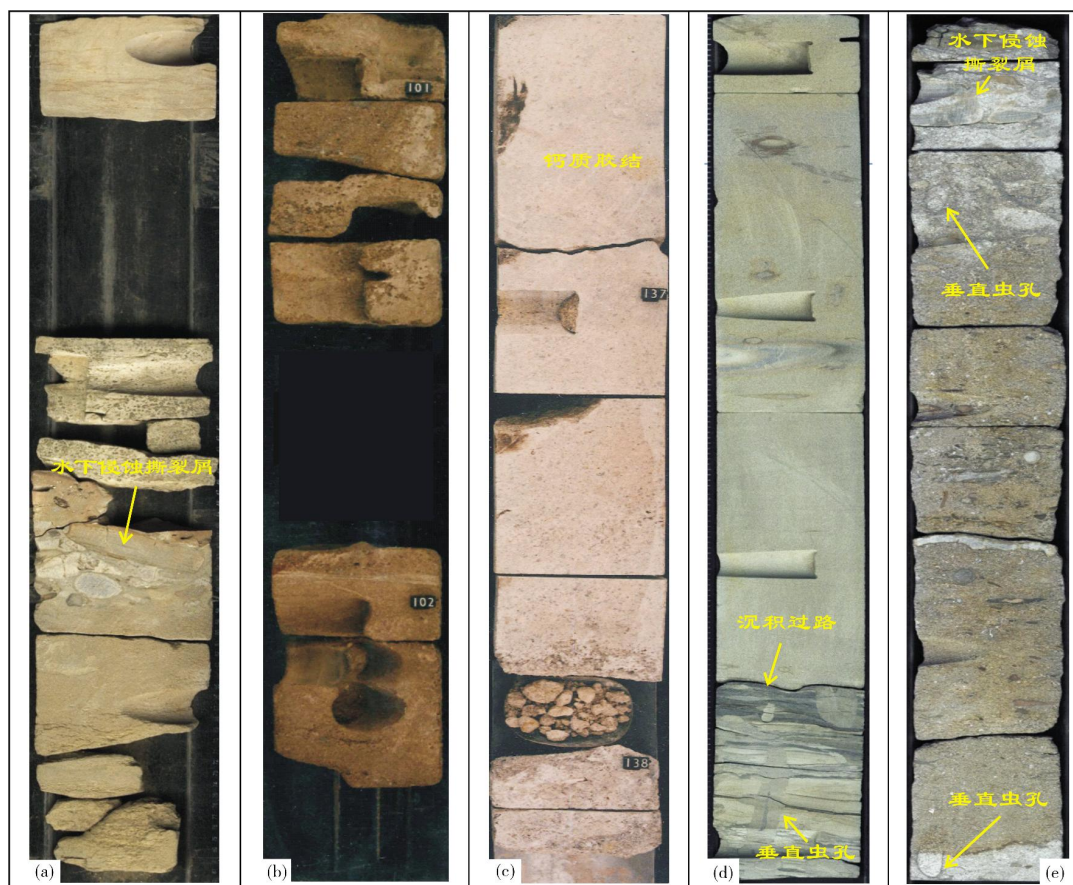
2 强制海退砂体特征

2.1 岩心特征

HZ26-A-2井取心段对应K22层顶部(图3a),岩

心段下部为细砂岩,上部为灰质泥岩,中间是后续海侵过程中水下侵蚀形成的撕裂屑。

HZ32-C-2井取心段反映K22层主体,岩性以岩屑长石砂岩为主,新鲜岩心中物性较好的部分因饱含油而呈棕褐色(图3b),致密隔夹层不含油则为灰白色(图3c)。上部为中—厚层状粗砂岩、含砾粗砂岩,分选差到中等,见板状和槽状交错层理。由于钙质胶结较弱,砂体疏松,取心收获率较低(图3b),岩心分析孔隙度平均值为23.1%,最高可达29.8%,岩心空气渗透率平均值为 $2.632 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最高可达 $9.526 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,比下伏的L系列砂体(如L30)粒度更粗(图4)。下部厚约5 m左右的岩心,主要由分选和磨圆差的含砾粗砂岩组成(图3c),粒度有明显的双众数特征(图4中



(a) 下部为细砂岩,上部为灰质泥岩,中间是后续海侵过程中水下侵蚀形成的撕裂屑,向上水体加深。HZ26-A-2井2 001.84~2 002.70 m, K22层顶部。(b) 粗砂岩。新鲜岩心因饱含油而呈棕色,为优质储层,砂体疏松,取心收获率略低。HZ32-C-2井2 258.00~2 258.80 m, K22层中上部。(c) 含砾粗砂岩。有生物碎屑,分选差,钙质胶结强烈,为基准面下降引起的重力流沉积。HZ32-C-2井2 270.00~2 270.86 m, K22层中下部。(d) 下部泥岩—粉砂岩互层,发育垂直虫孔,上部为粉砂岩,中间有一突变界面,是趋势内强制海退面。HZ21-A-4A井2 730.00~2 730.81 m, K22层底部。(e) 细砂岩。大量发育垂直虫孔,上部钙质胶结,有海侵引起的撕裂屑。HZ21-A-4A井2 612.70~2 613.50 m, K08层顶部

图3 珠江口盆地惠州凹陷南部珠江组强制海退砂体岩心特征

Fig. 3 Core characteristics of the forced regression sand body of Zhujiang Formation in the south of Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin

蓝色系列),从细砾到粉砂级都有分布,其中大颗粒比上部岩心更粗,可见生物碎屑化石,钙质胶结作用强烈,孔隙度极低,未达到储层标准,以隔夹层形式发育在储层之中,解释为重力流沉积。在砂体内部,粒度呈现反旋回或者多期反旋回特征,指示向上水体变浅和水动力增强,是滨岸相的一种沉积特征。

HZ21-A-4A 井区处在沿岸流的下游方向^[25],该井取心段对应 K22 砂体底部(图3d),岩性为岩屑长

石石英砂岩,骨架主要由粉砂及细砂构成,泥质含量高;取心段中,反旋回上部的物性最好,孔隙度平均值为 17.7%,最大值为 22.7%,渗透率平均值为 $22 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大值仅为 $133 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。相对西南方向的 HZ32-C-2 井区,储层物性明显变差。平面上,从西南往东北是沿岸流方向,粒度有逐渐变细的趋势,物性逐渐变差,产能降低;从西北往东南是垂直岸线的向海方向,未见粒度变细的趋势。

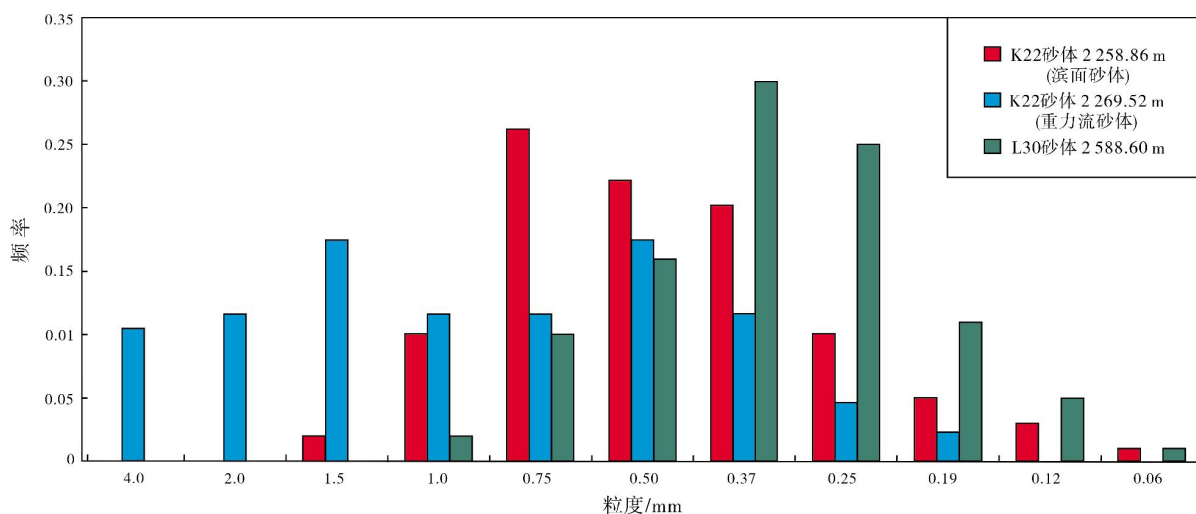


图4 珠江口盆地惠州凹陷南部 HZ32-C-2 井珠江组砂体粒度分布图

Fig. 4 Proportional histogram of different particle sizes of Zhujiang Formation of Well HZ32-C-2 in the south of Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin

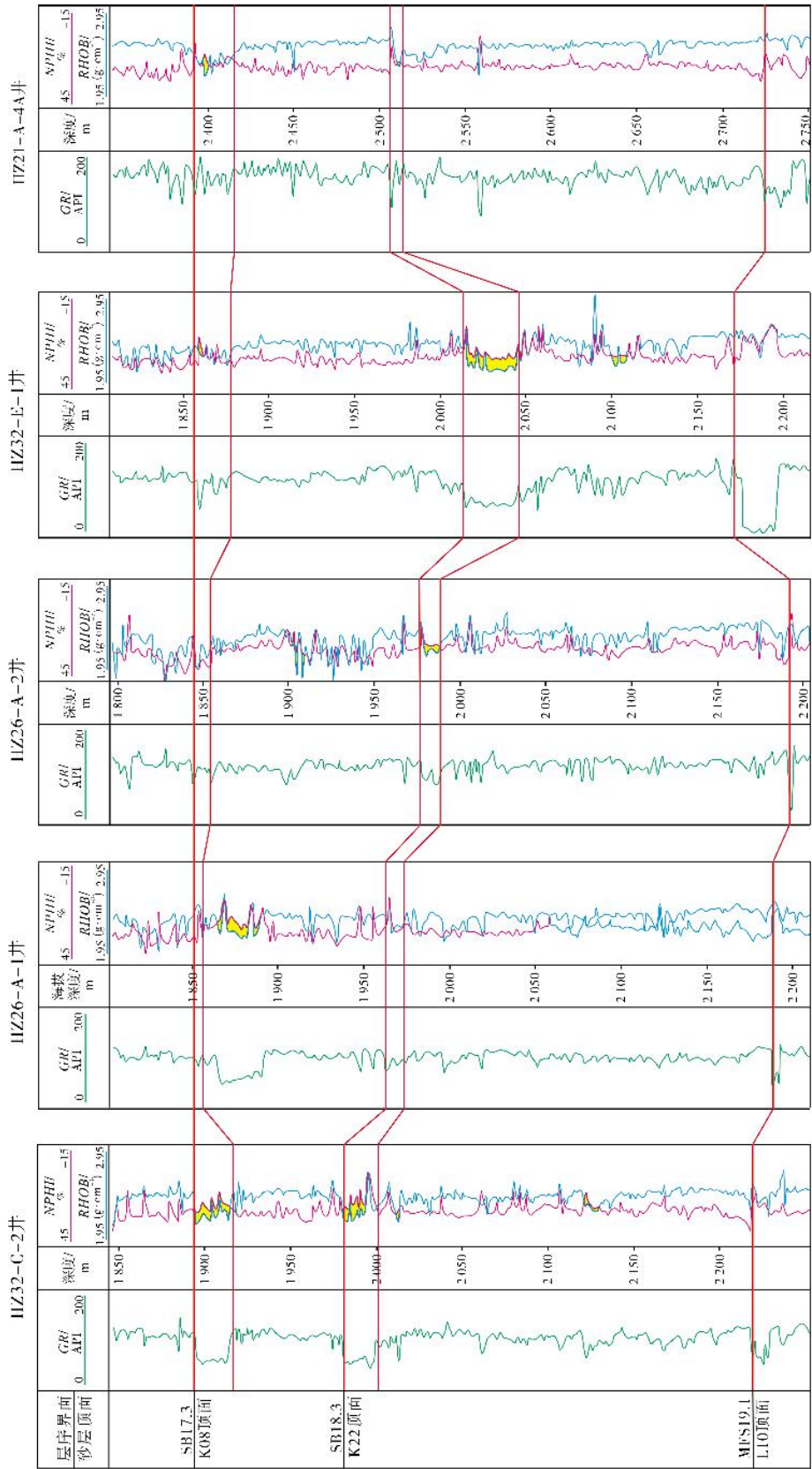
钻井岩心中可见大量遗迹化石,主要发育垂直虫孔针管迹(图3d,3e),属潮间带的滨面沉积特征^[26-27],指示浅水高能环境;向东北方向生物扰动愈发剧烈,生物扰动破坏了原始沉积层理,砂体分选变差,导致物性逐步变差。在砂体之上发育陆棚泥岩,指示水体加深。在K22、K08的2套砂体的顶部均发育撕裂屑(图3a,3e),砂体顶界面可解释为海泛面,也是海侵浪蚀面(图2b);砂体底部有岩性突变面,界面之上岩心粒度更粗,由厚层状细砂岩向下突变为细砂岩—泥岩互层(图3d),可解释为基准面下降引起的趋势内强制海退面。综合K22层和K08层的岩心资料,可以确定强制海退砂体垂向上发育陆棚—下滨面—上滨面—陆棚相序,这个相序具有重复性,并且在全区的测井资料中也有体现。

2.2 测井特征

根据砂体在自然伽马曲线上的特征响应(图2b),结合中子孔隙度、密度曲线,编制了区内连井砂体对

比剖面,如图5所示。

基于测井资料分析,工区南部砂体物性优于北部(图5)。HZ32-C-2井K22砂体厚度约20m,其中优质储层的GR值一般在50~60 API之间,密度值范围为 $2.2 \sim 2.3 \text{ g/cm}^3$;砂体中致密夹层的测井响应与储层差异较大,GR值一般在45~55 API之间,密度在 $2.50 \sim 2.65 \text{ g/cm}^3$ 之间,中子孔隙度小于密度孔隙度。HZ26-A-2井位于另外一期砂体的边缘,其GR值升高,密度值降低,物性变差。HZ26-A-1井钻遇泥岩,这套泥岩形成这2期砂体之间的岩性遮挡。在向海一侧和沿岸流的下游方向,砂体的GR值有升高的趋势;HZ32-E-1井钻遇的K22砂体与HZ32-C-2井的测井响应值类似,但砂体厚度更大,GR值略有升高;HZ21-A-4A井位于工区北部,其K22砂体泥质含量高,上部物性较好部分的GR值达到100 API以上,密度值在 2.3 g/cm^3 左右。在HZ21-A-4A井区,由于储层含气,使得含氢指数减小并对快中子的减速能力减弱(挖掘效应),中子孔隙度值升高(图5)。



注: (1) 深度、自海平面起算。(2) 拉平层序界面SB17.3(K08砂层顶)。(3) 密度与中子孔隙度曲线交叉部分充填黄色, 表示砂体; HZ26-A-1井K22层密度与中子孔隙度没有交叉, 表示砂体尖灭。

Fig. 5 Connecting well profile of K08 and K22 forced regressive sand bodies of Zhujiang Formation in the south of Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin (well location is shown in Fig. 1b)

在向陆一侧, HZ32-C-2井K22砂体由多期反旋回沉积垂向叠加而成, 自然伽马曲线呈箱型特征(图2b, 图5)。砂体顶部测井响应呈突变接触, 反映海平面上升引起的海底侵蚀特征; 砂体底部也有突变接触, 但突变幅度不如顶部明显, 对应基准面下降而滨岸砂体向海方向迁移引起的趋势内强制海退面。沿东北方向(平行古岸线), K22砂体可对比性好; 沿东南方向(垂直古岸线), 砂体的测井响应类似, 但不连续发育, 如HZ26-A-1井区见砂体尖灭。

K08砂体与K22砂体测井响应特征相似, 地层垂向上整体具有旋回性。

2.3 地震特征

强制海退砂体夹在厚层的陆架泥岩之中, 与作为背景的陆架泥岩波阻抗值差异较明显, 砂体地震反射振幅较强, 虽然砂体厚度不大, 仍可以被清楚地刻画出来。在地震剖面中, K22砂层有明显的向海方向(SE方向)退覆特征(图6中黄色虚线), 上超点逐步向下、向海方向迁移, 指示岸线后退, 浅水环境沉积物逐步进入原陆架区域。图6中L10顶面到K08顶面的地层是本次研究的目的层, 地层厚度向东南逐渐变薄, 滨岸砂体不仅深入到陆架, 而且进入到之前远离陆源碎屑注入的碳酸盐台地(图6右侧)。

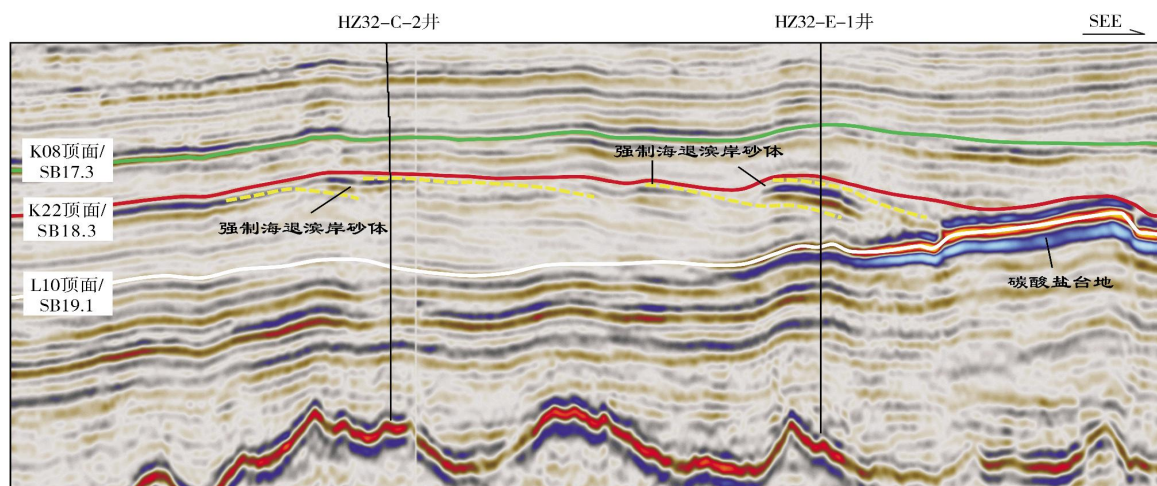


图6 珠江口盆地惠州凹陷南部珠江组强制海退沉积地震解释剖面(剖面位置参见图1b)

Fig. 6 Seismic interpretation profile of forced regression sedimentation of Zhujiang Formation in the south of Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin (profile location is shown in Fig. 1b)

图7为K22砂层的均方根振幅属性图, 可以看到在工区中部砂体表现为强振幅特征, 砂体呈条带状分布, 长度超过30 km, 宽度仅有1 km, 走向NNE, 与古海岸线平行, 呈孤立状向海方向迁移, 这是强制海退滨岸砂体的沉积特征^[28-29]。在西部向陆地一侧, 由于其他反射层的干扰以及砂体受到剥蚀改造, 条带状特征变得模糊; 在工区北部HZ21-A-4A构造部位, K22砂体中含气, 反射能量增强, 导致附近的强振幅砂体形态变粗, 颜色变亮; 东南部的连片强振幅区, 推测与受到下伏碳酸盐岩的影响有关(图6)。

3 层序地层格架下的强制海退沉积

3.1 层序地层格架

关于工区层序地层的研究成果比较丰富^[23, 25, 30-31],

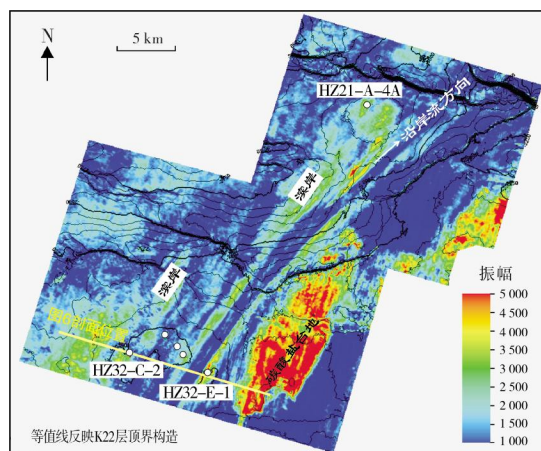


图7 珠江口盆地惠州凹陷南部K22砂层均方根振幅属性图

Fig. 7 Attribute map of root mean square amplitude of K22 sand body in the south of Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin

按照主流的划分方案,珠江组可分为5个三级层序^[32-33]。本文按照该方案,讨论时间尺度为1 Ma左右的三级层序中的强制海退沉积。珠江组NSQ₂层序的最大海泛面(MFS19.1)到NSQ₃层序顶界(SB17.3)之间的地层单元,包括了2次三级层序级别的强制海退过程,分别沉积了K22砂体和K08砂体(图8)。关于体系域划分方案,笔者采用更符合层序地层概念体系的四分方案^[2,4,34]。四分法层序中的强制海退体系域(FRST)对应基准面下降时期,可容空间变化率为负值,FRST对应强制海退沉积^[35-36]。

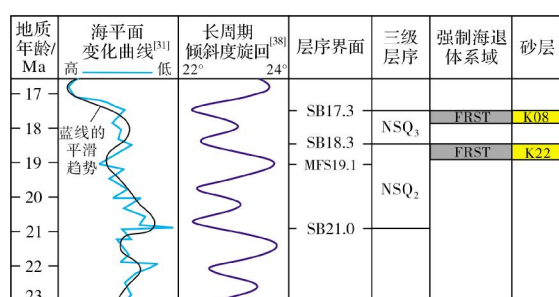


图8 珠江口盆地珠江组强制海退、海平面与长周期倾斜度旋回的响应关系

Fig. 8 Response of forced regression, sea level to long period tilt cycles of Zhujiang Formation in the Pearl River Mouth Basin

3.2 基准面变化

基准面上升,可容空间增加;基准面下降,可容空间减小。控制基准面变化的外部因素主要有构造、全球海平面和气候,而气候主要通过对全球海平面的影响而起作用。

受控于太阳系内部行星的运动,地球轨道参数的频率和幅度的调节作用产生了长周期倾斜度旋回,其周期为1.2 Ma^[39-41]。长周期倾斜度旋回使得地球接受的太阳辐射发生周期性变化,造成大陆冰盖扩张或者收缩,进而引起全球海平面降低或者升高,其变化幅度可高达120 m^[38]。冰室期长周期倾斜度旋回的最小值,与海平面的低水位期和层序界面有良好的对应关系^[38,42]。中新世已经处在冰室期^[43-44],珠江口盆地珠江组海平面升降曲线与长周期倾斜度旋回有很好的对应关系;当倾斜度为低值时,海平面为低值;反之亦然(图8)。珠江口盆地惠州凹陷南部中新统主要处于浅海-陆棚沉积环境,自21 Ma年以来经历的16次三级海平面变化旋回与全球海平面周期一致^[45-46],全球海平面变化同样影响了珠江组的三

级层序发育。

区内珠江组沉积时期,构造沉降使得基准面上升,而在长周期倾斜度旋回中的低值区间,太阳辐射变化导致冰盖扩张而引起海平面下降(图8),造成基准面下降。在海平面下降幅度大于构造沉降幅度的情况下,基准面整体表现为下降,可容空间变化率为负值,强制海退沉积发育。具体到演化过程,在基准面达到最高之后强制海退开始,在基准面为最低时强制海退结束,因此强制海退沉积的顶面是层序界面。

3.3 主要界面

这里讨论珠江组与K系列砂体相关的可识别和追踪的岩性界面,并指出其在层序地层格架内的意义。

L10砂体顶面 L10砂体顶面是K系列地层的底界(图6)。L10顶界面定年为19.1 Ma,基本与新生代1.2 Ma的长周期倾斜度旋回中的倾斜度高值相一致,此时全球变暖事件引起的大陆冰盖融化导致全球海平面迅速上升^[38,47]。L10顶面也是珠江组三级层序NSQ₂的最大海泛面MFS19.1^[48](图8)。最大海泛面之上,当基准面还在缓慢上升期时,珠江组发育正常海退;当基准面开始下降时发生强制海退,这个时间节点对应的假想面是强制海退底面(BSFR)。由于这个BSFR面在工区内识别和追踪困难,因此本次研究中将MFS19.1作为K系列地层的底界。这个界面之上主要发育陆架细粒沉积物,这些细粒沉积物是下伏砂体的区域性盖层,也可为后续的强制海退砂体提供侧向封堵条件。

K22砂体底面 从岩心资料可以得出,K22砂体底界面是向上水体变浅的突变界面,在测井响应上也是幅度不大的突变界面,在地震反射剖面上比较模糊。在由长周期倾斜度旋回引起的全球气候变冷事件中,随着大陆冰盖扩张,海平面逐步下降,陆架细粒沉积物逐步暴露,在这些细粒沉积物中发育指示潮间带环境的针管迹(图3d)。随着岸线向海方向后退,粗粒的滨岸砂岩从西北向东南迁移,进积到陆架泥岩之上,砂体底部与下伏泥岩呈突变接触。K22砂体是在基准面下降过程中逐步形成的,其底界面是一个高穿时界面。

K22砂体顶面 由岩心和测井资料可见,K22砂体顶面是明显的突变界面,界面之上沉积物粒度变细,水体加深;在地震反射剖面上可识别K22

砂体顶面,即沿强制海退砂体的顶包络线(图6)。K22砂体顶面是三级层序 NSQ_2 的顶界,对应基准面降到最低、陆架暴露不整合面积最大的时期,时间约为18.3 Ma,在定年误差范围内对应长周期倾斜度旋回的极低值^[46,49]。在K22砂体顶部可见撕裂屑(图3a),界面之上是陆棚泥岩,指示后续的海侵过程对早期沉积物的改造和侵蚀作用;K22砂体顶面也是海泛面和海侵浪蚀面,是低穿时界面。

其他界面 K08砂体在成因上与K22砂体类似,是后续一次强制海退的沉积响应。K08砂体底界与K22砂体成因类似,是基准面下降过程中沉积相迁移的响应;其顶界面是三级层序 NSQ_3 的层序边界,时间比K22顶面滞后一个长周期倾斜度周期,约为1 Ma。

3.4 珠江组强制海退的驱动因素

中新世,由长周期倾斜度旋回的低值引起全球

变冷事件,并导致全球海平面迅速大幅下降^[38,47],在全球范围内发生强制海退,在层序地层格架内形成强制海退体系域。珠江口盆地惠州凹陷高能环境的滨岸沉积物向东南迁移,覆盖在原有陆架细粒沉积物之上,形成若干条带状平行于古岸线分布的优质砂体,这些砂体合称为K22砂体(图9a)。海平面快速下降还可使早期未固结沉积物发生垮塌并引发重力流,粗粒碎屑被搬运到更远区域。随着海平面继续下降,早期的滨岸砂体会被剥蚀、搬运到更深的陆架区域,这些粗粒陆源碎屑沉积物甚至会进入碳酸盐台地,发生混合沉积^[50](图9b)。惠州凹陷K22砂体以及其他在陆架泥岩之中分布的条带状砂体以往被解释为陆架砂脊^[37,51],这种解释方案的不足之处在前言中已述及。珠江口盆地珠江组的强制海退受长周期倾斜度旋回控制,韩江组13.8 Ma的层序界面也与此旋回的低值节点一致^[52]。

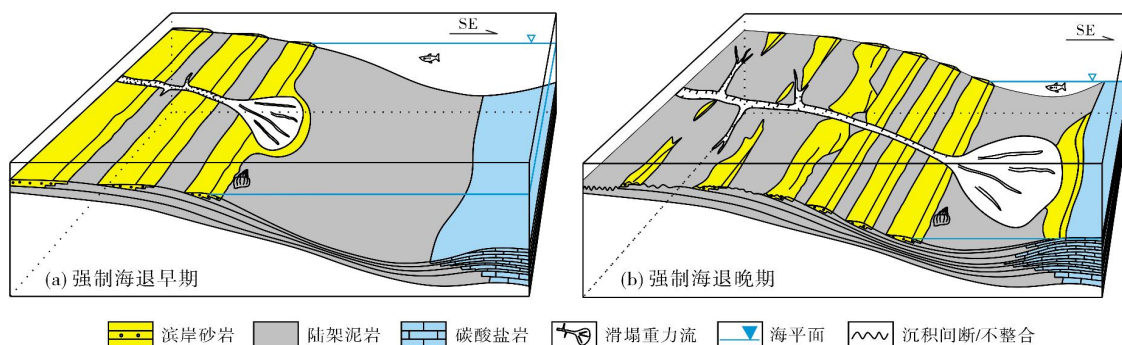


图9 珠江口盆地惠州凹陷南部珠江组强制海退砂体沉积模式

Fig. 9 Sedimentary model of forced regression sand body of Zhujiang Formation in the south of Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin

4 石油地质意义

强制海退砂体不仅对层序的定义和识别具有重要意义,而且是油气勘探的重要目标。

良好的储层 强制海退过程中,随着古岸线大幅度向海迁移,原本低能的陆架水体变浅或者暴露,高能的滨岸砂(砾)岩会在原来的陆架区域沉积,在细粒沉积物占优势的区域形成良好的储层。这些储层粒度粗、物性好,可与上覆的后续海侵体系域沉积的陆架泥岩形成优质的储盖组合,构成油气勘探重要的目标层系。并且,由于基准面受构造沉降与海平面变化控制,在构造稳定的情况下,三级层序内的强制海退与长周期倾斜度旋回低值相对应,因而砂体具有一定可预测性。研究强制海退砂体对预测砂体形态、叠置关系和砂体内部构型有重要意义^[29,35]。

油气运移通道 强制海退砂体在平行古岸线方向连续性好,在垂直岸线方向也可以叠置连片大面积分布,在泥岩占优势的地层中发育的强制海退砂体是重要的油气运移通道。中中新世晚期—第四纪,受菲律宾海板块持续的 NWW 向运动导致的吕宋岛弧与台湾陆架之间的弧陆碰撞作用影响,东沙隆起和潮汕坳陷发生长轴为 NE 向的穹隆状隆升^[21],珠江组地层整体掀斜,这有利于油气沿着砂体向东南方向运移。工区北部惠州凹陷文昌组烃源岩生成的油气,能够沿连片发育的强制海退砂体向凹陷边缘和东沙隆起方向远距离运移。

岩性圈闭 在垂直古岸线方向,不同期次形成的强制海退砂体之间可能不连续或者尖灭,砂体被陆架泥岩封闭而构成侧向遮挡,形成岩性圈闭或者构造-岩性圈闭。在局部的披覆构造、逆牵引构造高点等油气运

移的指向区可形成构造-岩性油气藏。如果砂体被陆架泥岩包围,在构造斜坡区也可以形成岩性圈闭。目前惠州凹陷南部已经发现若干构造-岩性油气藏。

5 典型油气藏

目前惠州油田群共开发了12个油气田。在对构造圈闭的勘探开发过程中,发现和动用了一些岩性油气藏,其中最为典型的油藏是HZ32-C油田的K22油藏。HZ32-C油田与HZ26-A油田的K22砂体,发育地层位置一致,可对比(图5);从地震均方根振幅属性图上可以看出,两者为相互分隔的不同砂体(图7);这2个K22砂体均在披覆背斜的闭合范围之内,都有油

气充注(图10a)。

这2个油藏具有不同的油水界面、不同的压力系统(图10b):RFT(可重复地层测试器)压力趋势线数据有偏离;油线与水线的交点是自由水面,两者自由水面相差10 m左右。HZ32-C区的K22砂体向东南方向尖灭,有岩性封堵特征;HZ26-A油藏则属于构造-岩性油藏。

这2个油藏的采油井生产动态特征有很大差异,如图10c所示:HZ32-C-2井单采较之HZ26-A-18A井,储量大、累产油多,含水率上升较慢。两者的地层供液能力都很充足,反映出砂体在平行于古岸线方向规模大、连续性好。

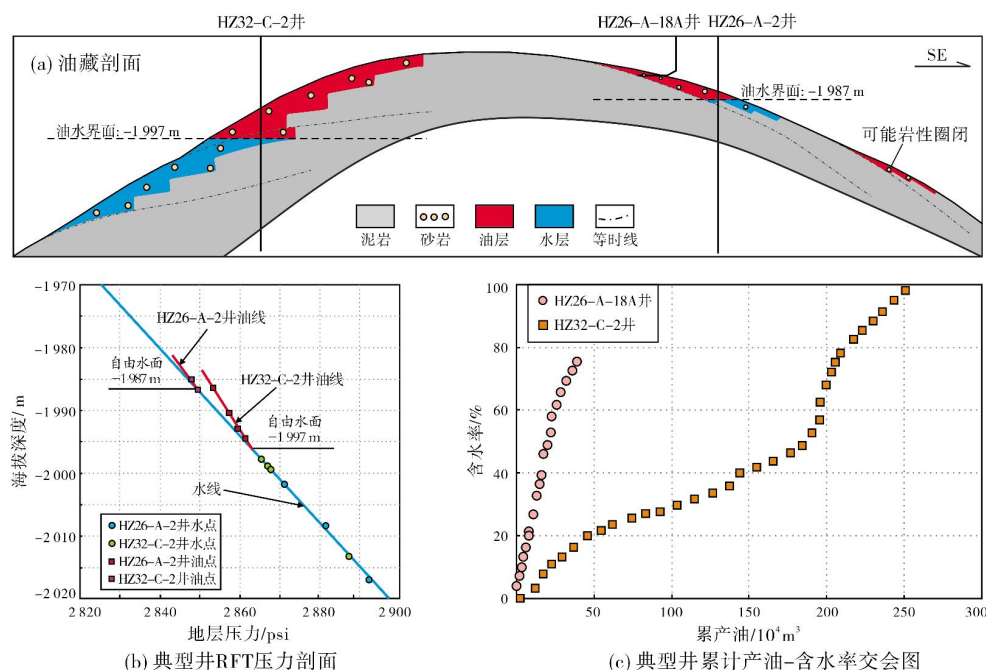


图10 珠江口盆地惠州凹陷南部珠江组K22构造-岩性油藏综合分析图

Fig. 10 Comprehensive analysis of K22 structural-lithologic reservoir of Zhujiang Formation in the south of Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin

6 结论

(1)在珠江口盆地西部惠州凹陷珠江组发育强制海退砂体,以三级层序NSQ₂强制海退体系域滨岸相K22砂体最为典型。这些砂体粒度较粗、物性好,测井响应整体呈箱形和(或)漏斗形特征,地震反射呈强振幅特征,在地震均方根振幅属性平面图上呈NNE走向的狭长条带状,平行古岸线分布。

(2)强制海退砂体与下伏、上覆地层均呈突变接触:砂体底界是浅水沉积物向海方向迁移产生的岩相界面,是高穿时的趋势内强制海退面;砂体顶面是

层序界面,对应陆架最大范围的不整合,与基准面到达最低的时间节点相对应。砂体顶部被后续的海侵过程所改造,发育撕裂屑,砂体之上沉积陆架泥岩,故砂体顶面是海泛面也是海侵浪蚀面。

(3)强制海退受长周期倾斜度旋回控制,旋回中周期性的低值引起冰川扩张,引发全球海平面下降和岸线向海方向迁移,从而发生强制海退。

(4)强制海退砂体可形成优质储层。如果砂体相互叠置连片发育,则可形成油气长距离运移通道;如果砂体相互分离,可形成横向岩性遮挡,在有利的构造背景可形成构造-岩性圈闭。在惠州凹陷的构造

高点已经发现若干构造-岩性油气藏,在构造斜坡区可能还发育由强制海退砂体构成的岩性圈闭,可作为重要的勘探目标。

参考文献

- [1] CATUNEANU O. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits, and pitfalls[J]. *Journal of African earth sciences*, 2002, 35(1): 1-43.
- [2] 梅冥相, 杨欣德. 强迫型海退及强迫型海退楔体系域: 对传统Exxon层序地层学模式的修正[J]. *地质科技情报*, 2000, 19(2): 17-21.
- [3] POSAMENTIER H W, ALLEN G P, JAMES D P, et al. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples, and exploration significance[J]. *AAPG bulletin*, 1992, 76(11): 1687-1709.
- [4] HELLAND-HANSEN W, GJELBERG J G. Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy: a different perspective[J]. *Sedimentary geology*, 1994, 92(1/2): 31-52.
- [5] 梅冥相. 从正常海退与强迫型海退的辨别进行层序界面对比: 层序地层学进展之一[J]. *古地学报*, 2010, 12(5): 549-564.
- [6] WAGONER J C V, POSAMENTIER H W, MITCHUM R M, et al. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions[M]// WILGUS C K, HASTINGS B S, POSAMENTIER H, et al. Sea-level changes: an integrated approach. SEPM(Society of Economic Paleontologists and Mineralogists) special publications 42, 1988: 39-45.
- [7] POSAMENTIER H W, VAIL P R. Eustatic controls on clastic deposition II: sequence and systems tract models[M]// WILGUS C K, HASTINGS B S, POSAMENTIER H, et al. Sea-level changes: an integrated approach. SEPM special publications 42, 1988: 125-154.
- [8] HUNT D, TUCKER M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall[J]. *Sedimentary geology*, 1992, 81(1/2): 1-9.
- [9] 吴因业, 顾家裕, CEDRIC G, 等. 塔里木盆地满西区块强制海退体系域沉积模式[J]. *石油学报*, 2003, 24(4): 21-25.
- [10] STUBBLEFIELD W L, MCGRAIL D W, KERSEY D G. Recognition of transgressive and post-transgressive sand ridges on the New Jersey continental shelf[M]// TILLMAN R W, SIEMERS C T. Siliciclastic shelf sediments. SEPM special publications 34, 1984: 1-23.
- [11] STUBBLEFIELD W L, KERSEY D G, MCGRAIL D W. Development of middle continental shelf sand ridges, New Jersey[J]. *AAPG bulletin*, 1983, 67(5): 817-830.
- [12] SLATT R M. Continental shelf topography: key to understanding distribution of shelf sand-ridge deposits from Cretaceous Western Interior Seaway[J]. *AAPG bulletin*, 1984, 68(9): 1107-1120.
- [13] GAYNOR G C, SWIFT D J P. Shannon sandstone depositional model: sand ridge dynamics on the Campanian Western Interior Shelf[J]. *Journal of sedimentary research*, 1988, 58(5): 868-880.
- [14] HUTSKY A J, FIELDING C R. The offshore bar revisited: a new depositional model for isolated shallow marine sandstones in the cretaceous frontier formation of the northern uinta basin, Utah, USA[J]. *Journal of sedimentary research*, 2016, 86(1): 38-58.
- [15] GOFF J A, DUNCAN L S. Re-examination of sand ridges on the middle and outer New Jersey shelf based on combined analysis of multibeam bathymetry and backscatter, seafloor grab samples and chirp seismic data[M]// LI M Z, SHERWOOD C R, HILL P R. Sediments, morphology and sedimentary processes on continental shelves: advances in technologies, research, and applications. International Association of Sedimentologists special publication 44, 2012: 121-142.
- [16] DOWNING K P, WALKER R G. Viking Formation, Joffre Field, Alberta: shoreface origin of long, narrow sand body encased in marine mudstones[J]. *AAPG bulletin*, 1988, 72(10): 1212-1228.
- [17] WALKER R G, WISEMAN T R. Lowstand shorefaces, transgressive incised shorefaces, and forced regressions: examples from the Viking Formation, Joarcam area, Alberta[J]. *Journal of sedimentary research*, 1995, 65(1b): 132-141.
- [18] WALKER R G, BERGMAN K M. Shannon Sandstone in Wyoming: a shelf-ridge complex reinterpreted as lowstand shoreface deposits[J]. *Journal of sedimentary research*, 1993, 63(5): 839-851.
- [19] BHATTACHARYA J P, WILLIS B J. Lowstand deltas in the Frontier Formation, Powder River Basin, Wyoming: implications for sequence stratigraphic models[J]. *AAPG bulletin*, 2001, 85(2): 261-294.
- [20] PROUST J N, MAHIEUX G, TESSIER B. Field and seismic images of sharp-based shoreface deposits: implications for sequence stratigraphic analysis[J]. *Journal of sedimentary research*, 2001, 71(6): 944-957.
- [21] 钟志洪, 施和生, 朱明, 等. 珠江口盆地构造-地层格架及成因机制探讨[J]. *中国海上油气*, 2014, 26(5): 20-29.
- [22] 李松峰, 徐思煌, 施和生, 等. 珠江口盆地惠州凹陷古近系烃源岩特征及资源预测[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2013, 38(1): 112-120.
- [23] 祝彦贺, 朱伟林, 徐强, 等. 珠江口盆地中部珠海组—珠江组层序结构及沉积特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 77-83.
- [24] 邓宏文. 珠江口盆地惠州凹陷古近系珠海组近海潮汐沉积特征[J]. *现代地质*, 2009, 23(5): 767-775.
- [25] 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.
- [26] FREY R W, HOWARD J D. Trace fossils and depositional sequences in a clastic shelf setting, Upper Cretaceous of Utah[J]. *Journal of paleontology*, 1990, 64(5): 803-820.
- [27] CURRAN H A. The trace fossil assemblage of a Cretaceous nearshore environment: Englishtown Formation of Delaware, USA[J]. SEPM special publications 35, 1985: 261-276.
- [28] GARCÍA-GARCÍA F, GEA G A D, RUIZ-ORTIZ P A. Detached forced-regressive shoreface wedges at the Southern Iberian continental palaeomargin(Early Cretaceous, Betic Cordillera, S Spain)[J]. *Sedimentary geology*, 2011, 236(3/4): 197-210.
- [29] 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: 57-70.
- [30] 黄诚, 傅恒, 汪瑞良, 等. 珠江口盆地东沙隆起珠江组层序界面的识别及划分[J]. *海相油气地质*, 2010, 15(3): 32-39.
- [31] 陈中强, 钟石兰, 杨少坤, 等. 微古生物在高分辨层序地层学中的应用: 以珠江口盆地惠州凹陷层序地层分析为例

- [J]. 微体古生物学报, 1998, 15(2): 28-37.
- [32] 杜家元, 陈维涛, 张昌民. 珠江口盆地新近系地层岩性圈闭形成条件及发育规律分析[J]. 石油实验地质, 2014, 36(5): 555-561.
- [33] 陈维涛, 杜家元, 龙更生, 等. 珠江口盆地惠州地区珠江组控砂机制及地层-岩性圈闭发育模式[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 449-458.
- [34] 梅冥相. 层序地层学发展历程中的三个误判[J]. 地学前缘, 2014, 21(2): 67-80.
- [35] WENT D J, HAMILTON R V, PLATT N H, et al. Role of forced regression in controlling Brent Group reservoir architecture and prospectivity in the northern North Sea[J]. Petroleum geoscience, 2013, 19(4): 307-328.
- [36] PRINCE G, BURGESS P. Numerical modeling of falling-stage topset aggradation: implications for distinguishing between forced and unforced regressions in the geological record[J]. Journal of sedimentary research, 2013, 83(9): 767-781.
- [37] ZHANG Xiangtao, DING Lin, DU Jiayuan, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of shelf sand ridges in the Pearl River Mouth Basin, northeast of South China Sea[J]. Journal of natural gas geoscience, 2017, 2(2): 141-155.
- [38] BOULILA S B, GALBRUN B, MILLER K G, et al. On the origin of Cenozoic and Mesozoic "third-order" eustatic sequences[J]. Earth - science reviews, 2011, 109(3/4): 94-112.
- [39] 梅冥相. 从沉积层序到海平面变化层序: 层序地层学一个重要的新进展[J]. 地层学杂志, 2015, 39(1): 58-73.
- [40] LASKAR J, CORREIA A C M, GASTINEAU M, et al. Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars[J]. Icarus, 2004, 170(2): 343-364.
- [41] LASKAR J. The chaotic motion of the solar system: a numerical estimate of the size of the chaotic zones[J]. Icarus, 1990, 88(2): 266-291.
- [42] MATTHEWS R K, AL-HUSSEINI M I. Orbital-forcing glacio-eustasy: a sequence-stratigraphic time scale[J]. GeoArabia, 2010, 15(3): 155-167.
- [43] MILLER K G, MOUNTAIN G S, WRIGHT J D, et al. A 180-million-year record of sea level and ice volume variations from continental margin and deep-sea isotopic records[J]. Oceanography, 2011, 24(2): 40-53.
- [44] MILLER K G, BROWNING J V, WRIGHT J D, et al. ODP, sequences, and global sea-level change: comparison of ice-house vs. greenhouse eustatic changes[J]. GCSSEPM proceedings, 2002, 22: 317-320.
- [45] HAQ B U, HARDENBOL J, VAIL P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. Science, 1987, 235: 1156-1167.
- [46] 庞雄, 陈长民, 施和生. 相对海平面变化与南海珠江深水扇系统的响应[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 167-177.
- [47] MILLER K G, BALUYOT R, WRIGHT J D, et al. Closing an early Miocene astronomical gap with Southern Ocean $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records: implications for sea level change[J]. Paleoceanography, 2017, 32(6): 600-621.
- [48] HE Min, ZHONG Guangfa, LIU Xuefeng, et al. Rapid post-rift tectonic subsidence events in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea margin[J]. Journal of Asian earth sciences, 2017, 147: 271-283.
- [49] 柴育成, 周祖翼. 科学大洋钻探: 成就与展望[J]. 地球科学进展, 2003, 18(5): 666-672.
- [50] 昌建波, 邹晓萍, 余国达, 等. 珠江口盆地惠州凹陷南部珠江组混合沉积作用[J]. 海相油气地质, 2017, 22(4): 19-26.
- [51] 丁琳, 张昌民, 杜家元, 等. 珠江口盆地惠州凹陷珠江组 K 系列陆架砂脊沉积演化与成因[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 379-385.
- [52] 徐少华, 王英民, 何敏, 等. 强制海退体系域的识别特征与成因分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(2): 531-540.

编辑:董庸

Forced-regressive sand bodies and the related lithologic reservoirs of Zhujiang Formation in Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin

CHANG Jianbo

Abstract: Taking the banded sand bodies developed in the mudstone of the Miocene Zhujiang Formation in the south of Huizhou Sag of the Pearl River Mouth Basin as the research object, the characteristics, genesis and control factors of the sand bodies are studied by comprehensive utilization of core, logging, seismic and production data. The sandstones are constituted of coarse grains, with excellent reservoir quality. The sandstones exhibit box or funnel-shape in GR curves, and show strong amplitude in seismic profile. In seismic amplitude map, the sand bodies extend as narrow and long strips in NNE, parallel with paleo-shoreline. These sandstones are forced-regressive shoreface deposits in falling stage system tract. The top and bottom of the sandstones are in abrupt contact with the mudstone of the continental shelf. The abrupt bottom is a within-trend forced regressive surface with high diachroneity. The abrupt top is sequence boundary, which corresponds to the lowest point of base level cycle. The top is eroded and transformed by following transgressive wave-ravinement, which is also flooding surface with low diachroneity. Long-term obliquity cycles influence the base level fluctuation significantly. When obliquity value is low, the global eustasy drops, and forced regression is triggered in Pearl River Mouth Basin. At this time, the sand bodies extend from the shore to the shelf, even to the carbonate platform. The forced regressive sandstones are important oil and gas reservoirs and migration channels, and they are also easy to form lithologic traps, which are important targets of oil and gas exploration.

Key words: forced regression; sand bodies; lithologic reservoirs; Zhujiang Formation; Huizhou Sag; Pearl River Mouth Basin
 CHANG Jianbo, First author: MSc, Geological Engineer, mainly engaged in petroleum geology. Add: Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., No. 3168 Houhaibin Rd., Nanshan District, Shenzhen, Guangdong 518067, China