

珠江口盆地陆丰A油田 恩平组浅水辫状河三角洲砂体构型研究

刘成林¹, 刘伟新¹, 顾振宇¹, 梁金权¹, 王泽宇², 古榕²

1 中海石油(中国)有限公司深圳分公司; 2 长江大学地球科学学院

摘要 陆丰A油田恩平组是珠江口盆地陆丰凹陷的主要产层,其砂体非均质性较强。采用层次分析的思路,应用地震沉积学研究方法,通过岩心、三维地震、测井及生产动态资料综合分析,对陆丰A油田恩平组开展了海上稀井网区砂体构型精细刻画,明确了储集砂体结构。研究表明:①陆丰A油田恩平组发育浅水辫状河三角洲前缘沉积,主要包括水下分流河道、河口坝、分流间湾;②研究区辫状河三角洲前缘的水下分流河道主要为多级分叉的似网状河道,剖面上砂体呈侧向切叠型、侧向拼接型和孤立型叠置样式;③三角洲前缘末端发育小规模水下分流河道和朵状河口坝,剖面上砂体呈侧向拼接型、孤立型及砂坝与河道切叠复合型叠置样式;④研究区辫状河三角洲由不同成因类型的砂体拼接叠置而成,沿物源方向,单河道砂体组合样式由多期切叠式逐渐向侧向切叠和侧向拼接式转变,最终过渡为孤立式,单河道发育规模逐渐减小,数量逐渐增加,砂体之间的连通性逐渐降低。

关键词 砂体构型; 水下分流河道; 辫状河三角洲; 恩平组; 陆丰凹陷; 珠江口盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

0 前言

陆丰A油田位于我国南海北部珠江口盆地东部的陆丰凹陷。该油田发现于1987年1月,于1993年正式投产,先后发现新近系和古近系两套主要产油层系。经过多年的开发,新近系主力油藏进入高采出、高含水状态,古近系储层逐渐成为开发的重点^[1-3]。陆丰A油田古近系含油层集中分布在恩平组,埋深为2 537.8~2 986.9 m,平面上砂体厚度差异较大,纵向上也具有极强的非均质性,分布多个边底水油藏。随着油气藏勘探的深入,逐渐认识到陆丰A油田恩平组的储层为辫状河三角洲沉积^[4-5]。但是,目前对该区辫状河三角洲的沉积特征、砂体展布规律、储层内部结构样式等关键问题的研究不足,制约了该层段的深度开发。

辫状河三角洲砂体构型研究是目前储层沉积学研究的热点之一^[6-7]。辫状河携带大量沉积物进入湖泊或海洋等水体之中时沉积动力变化的影响因素较多,导致辫状河三角洲内部构型极为复杂。

辫状河三角洲发育的构造背景、湖岸坡度、沉积物供给的性质以及供给量等因素的差异,造成了岩石相类型及其组合的不同^[8]、沉积微相类型(构型要素)的不同^[9-11]、构型单元叠置样式不同^[12]、储层构型单元规模数据的不同^[13]及隔夹层发育规模的不同^[14]。现有研究表明,陆丰A油田古近系恩平组主要发育辫状河三角洲沉积,但其沉积模式与构型单元划分仍存在较大争议。鉴于此,本文采用层次分析的思路,应用地震沉积学研究方法,通过地震、岩心、测井及生产动态资料综合分析,对陆丰A油田恩平组开展海上稀井网区砂体构型精细刻画,以明确其砂体规模及展布规律,为后期开发提供借鉴和依据。

1 研究区概况

陆丰A油田位于我国南海北部珠江口盆地东北部^[5]。珠江口盆地位于海南岛与台湾岛之间,呈北东走向,大致平行于华南大陆陆架和陆坡区的走向,为华南大陆的水下延伸部分。受以北东向为主要应力方向的构造运动控制以及北东与北西向共

收稿日期:2021-07-14; 改回日期:2021-10-29; 网络出版日期:2022-06-12

本文受“十三五”国家科技重大专项课题“深层大型储集体和‘甜点’地质模式及识别技术”(编号:2016ZX05027-002)资助

第一作者: 刘成林, 硕士, 主要从事精细油藏描述及珠江口盆地油气开发地质研究。通信地址: 518054 广东省深圳市南山区后海滨路(深圳湾段)3168号中海油大厦; E-mail: liuchl3@enooc.com.cn

通信作者: 王泽宇, 硕士研究生, 主要从事沉积储层研究工作。通信地址: 430100 湖北省武汉市蔡甸区大学路111号长江大学; E-mail: wangzy9810@sina.com

断裂的影响,珠江口盆地形成了南北分带、东西分块的基本构造格局。陆丰A油田位于陆丰凹陷的西南部,东为陆丰凹陷主体,西为惠陆低凸起及惠州凹陷,南为东沙隆起(图1a)。陆丰A油田新生界地层自下而上依次为:古新统神狐组,始新统文昌组,渐新统恩平组、珠海组,中新统珠江组、韩江组、粤海组 and 上新统万山组^[15-17](图1b)。

陆丰凹陷古近系发育断陷盆地背景下的陆相沉积体系。裂陷早期发育冲积扇、冲积河流相粗碎屑沉积和火山岩相;强烈裂陷期河流三角洲及湖相地层发育,深洼陷发育较深水湖相^[18-19]。珠江运动二幕使珠江口盆地基底抬升,文昌组地层抬升,断裂差异活动明显,各凹陷遭受强烈剥蚀,因而文昌组多具下粗上细的不对称旋回特征^[20]。其上的恩平组是研究区古近系油气开发的重点层位,该组沉积时期盆地进入断拗转化阶段,构造相对稳定,断

陷湖盆逐渐消亡,以盆地范围内广布的河流—三角洲、湖沼、浅湖相为特征。晚渐新世末的南海运动形成了全盆地以地震T70反射界面为代表的整合面,盆地内经历了断拗过渡阶段并向拗陷转化,进入整体沉降阶段,沉积了珠海组海陆过渡相和珠江组海相地层。

陆丰A油田三维地震采集面积为205 km²,地下反射面元为12.5 m×25 m,采样率为2 ms。研究区目前有1口探井、3口评价井、22口领眼井和63口生产井,共计89口井,24口井钻遇古近系。其中,恩平组取心井仅有2口,心长共计68.08 m。研究区采用电缆测井和随钻测井两种方式,测井数据包括自然伽马、侧向测井、补偿中子、岩性密度、感应测井、自然伽马能谱等,测井曲线的质量较好。总之,研究区具有较为齐全的地震、测录井及生产动态等资料,为该地区储层构型分析提供了必要的基础资料。

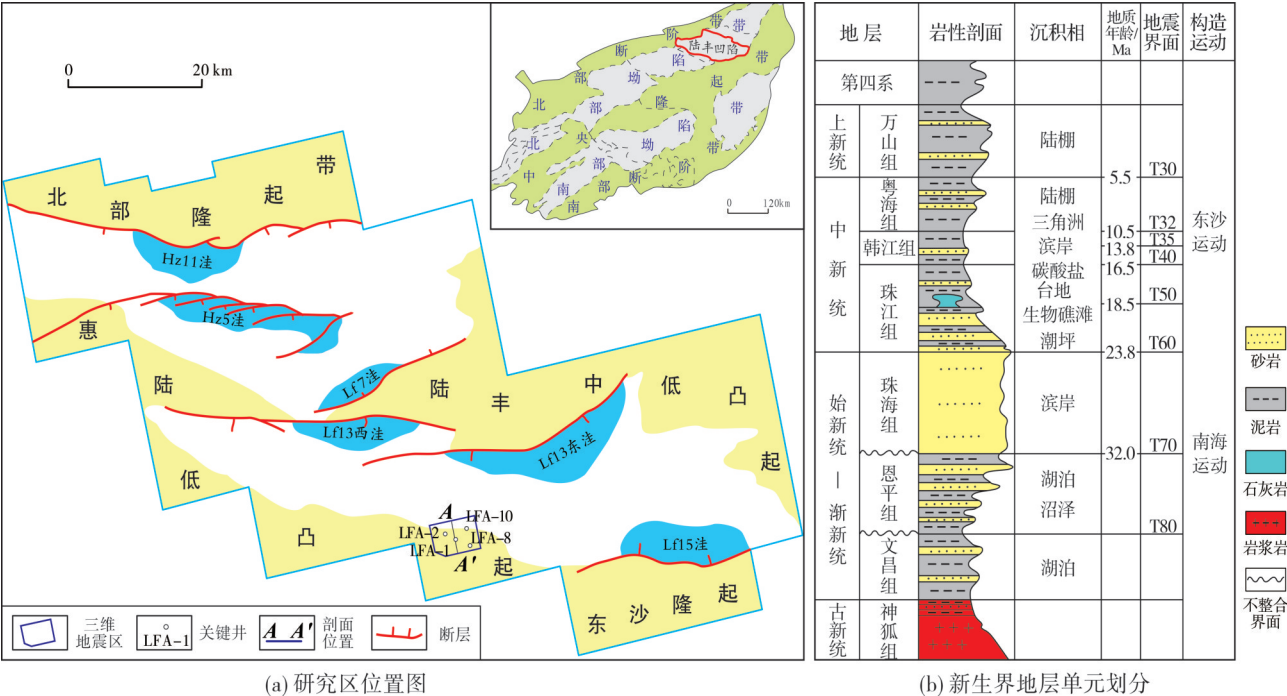


图1 陆丰A油田位置与地层单元划分
Fig. 1 Location of Lufeng A Oilfield and division of stratigraphic units

2 层序地层格架的建立

研究区恩平组顶底分别是T70和T80地震反射界面。其中T80界面是一个全区可对比的区域不整合面,削蚀特征明显(图2)。T80界面为文昌组和恩平组的分界面,同时也是珠江运动二幕构造抬

升剥蚀形成的区域不整合面。该界面以下为中振幅、中—弱连续、(亚)平行/前积反射结构,界面以上为中—强振幅、中连续、平行/亚平行反射结构,全区易于识别和追踪。T70界面形成于南海运动期,在全区可追踪。受南海运动影响,地层抬升使早期沉积地层部分暴露侵蚀,导致在构造高部位

形成侵蚀不整合面(图2)。T70和T80界面系构造运动形成的构造层序界面,界面处有明显的抬升剥蚀现象,代表着长期基准面下降半旋回的结束和上升半旋回的开始。

在T70和T80之间,根据地震反射特征和地震

反射轴的终止形式,可继续识别出两个长期基准面旋回转换面(T71和T72),界面之下为中振幅、中—强连续、平行/亚平行反射结构,界面以上为中—强振幅、强连续、平行/亚平行反射结构(图3)。界面以上同相轴的连续性较界面以下好,但界面上下同相

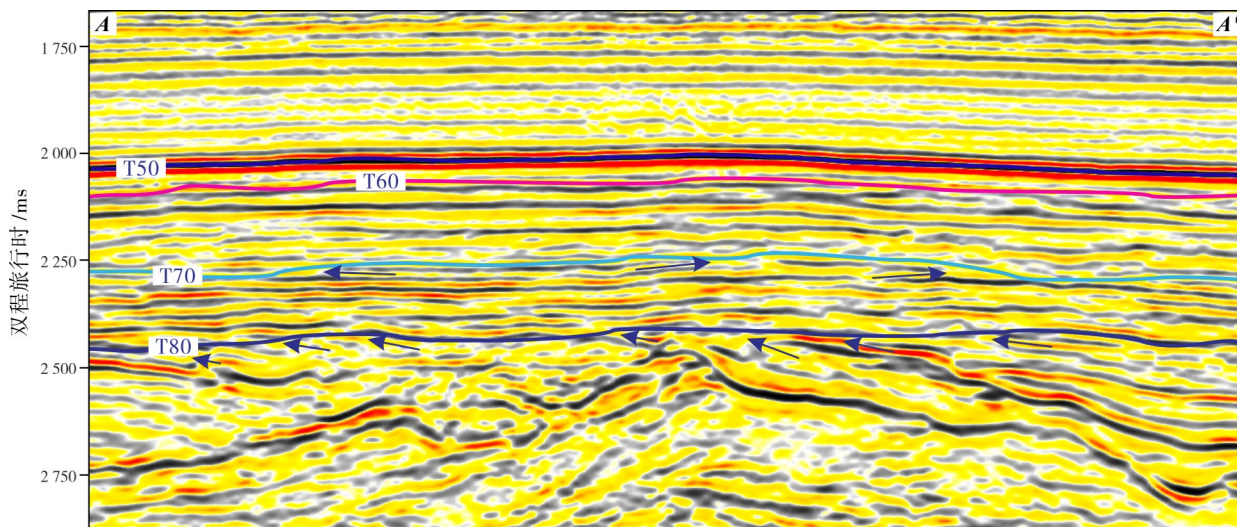


图2 陆丰A油田典型地震剖面层序界面解释(剖面位置见图1a)

Fig. 2 Sequence boundary interpretation of typical seismic profile crossing Lufeng A Oilfield (section location is shown in Fig. 1a)

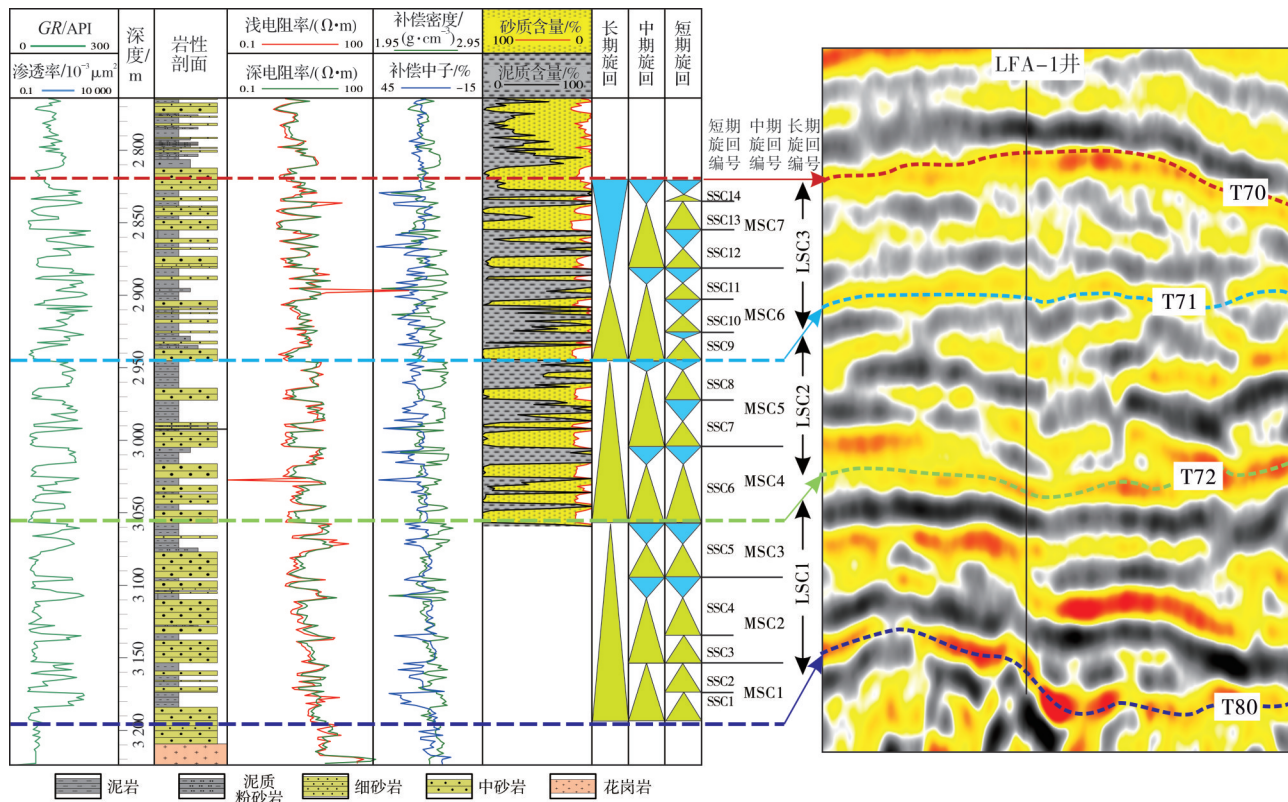


图3 LFA-1井恩平组层序划分及其井旁地震响应特征

Fig. 3 Sequence division of Enping Formation of Well LFA-1 and seismic response characteristics near the well

轴振幅强度和反射结构变化较小。据此,在地震标定的框架基础上,结合测井曲线特征、录井解释结果以及岩心精细描述,进一步对陆丰A油田恩平组进行了精细划分,通过砂岩百分含量、GR值变化、岩性周期性变化等判断出中期和短期基准面升降,进而在恩平组识别出3个长期基准面旋回(LSC1—LSC3),并细分为7个中期基准面旋回(MSC1—MSC7)和14个短期基准面旋回(SSC1—SSC14)。短期基准面旋回可进一步划分为若干小层,如SSC10划分为2个小层(SSC10-1、SSC10-2)。

陆丰A油田恩平组的3个长期基准面旋回呈现出由不对称的上升半旋回逐渐向对称的上升-下降半旋回过渡。反映出早期基准面较低,沉积物供给相对充足,在A/S值较低条件下,基准面旋回往往保存不完整。这一特征同样反映在中期和短期基准面旋回中。在这期间,砂体往往切割叠置,砂体连通性较好,且砂体的单层厚度较大。在地震剖面上往往呈现出连续性较好的特点。随着基准面的上升,LSC3长期基准面旋回已发育为上升半旋回与下降半旋回对称的类型,此时可容纳空间明显增加,导致砂体的单层厚度有所减少,且砂体变得相对比较孤立。在A/S值较高的条件下,基准面旋回保存更为完整。在地震剖面上往往呈现出振幅有所增强,但地震反射轴的连续性有所下降。

3 沉积相类型及其展布特征

在恩平组沉积时期,由于前期的夷平和补偿作用,珠江口盆地大部分地区表现为准平原化,在大范围内发育河流—湖泊沉积环境,在凹陷周缘则发育冲积扇、扇三角洲或辫状河三角洲。以恩平组68.08 m长的岩心精细观察为切入点,在研究区识别出了8种岩性和6种沉积构造,将岩性与沉积构造进行组合,归纳出反映沉积动力特征的14种岩石相类型。根据垂向上岩石相的叠置关系,结合研究区沉积环境及水动力条件,识别出辫状河三角洲前缘亚相,并进一步划分出水下分流河道、分流间湾及河口沙坝等3种沉积微相(图4)。

陆丰A油田为海上油田,存在钻井偏少、井间距离大、井控范围小的特点。在少井条件下,采用地震地质相结合的方法,在区域沉积背景、沉积模式、物源、沉积相研究的基础上,以短期基准面旋回为最小研究单元,对地震属性特征进行分析。由于研

究区钻井较少,很难准确建立井点地震属性与砂岩厚度或砂地比的定量关系,因此综合应用统计分析和图像相面法,在统计井点地震属性与砂地比关系的基础上,优选地震属性。结果表明,均方根振幅属性与砂地比对应关系最好,随砂地比的增大总能量也逐渐增大(图5)。

以恩平组SSC9短期旋回为例,该旋回位于LSC3长期旋回底部,沿SSC9短期基准面旋回的底界面进行地层切片,显示出强振幅区整体呈北东—南西向条带状展布,反映出在基准面上升初期沉积体系沿北东—南西方向连续发育(图6a)。均方根振幅属性的平面展布图更清晰地揭示了SSC9短期旋回内部强振幅区呈北东—南西向条带状分布(图6b)。结合典型井的测井曲线分析,均方根振幅属性中强振幅区的钻井测井曲线GR值明显偏低,曲线呈箱形或钟形,反映出砂质含量偏高,为典型的水下分流河道沉积;均方根振幅属性低值区的GR曲线多见指状或直线形,GR值较高,反映泥质含量偏高,为水下分流河道侧翼或分流间湾沉积。综合测井曲线特征、地震属性展布以及沉积背景分析,认为在该旋回内主要发育分叉合并频繁的水下分流河道,其次为分流间湾(图6c)。

结合地质统计学岩性概率反演剖面 and 砂体连井对比剖面对陆丰A油田恩平组沉积演化过程进行分析(图7)。陆丰A油田恩平组整体发育一套浅水辫状河三角洲沉积,受控于沉积基准面的变化,该地区沉积体系发育特征和砂体沉积样式存在规律性的演变。恩平组中下部的SSC6旋回早期,研究区水体较浅,全区发育大型三角洲内前缘水下分流河道沉积,沉积砂体较厚。随后,海平面快速上升,到SSC10-1小层晚期,研究区开始发育三角洲外前缘沉积,主要形成河口沙坝和水下分流河道砂体,其规模和发育形态与三角洲内前缘水下分流河道有很大的区别,砂体的切割叠置明显减少,砂体厚度也相对减薄。SSC11—SSC14旋回,研究区水体缓慢下降,水下分流河道规模逐渐变大,成为了砂体发育的主要沉积微相类型。恩平组沉积末期,研究区发生的南海运动导致构造抬升使基准面快速下降,砂岩百分含量开始增加,河道化和河道切割叠置的现象也随之增加。在珠海组沉积时期,研究区水体一直维持在相对较浅的程度,全区发育大型三角洲平原分流河道沉积,沉积砂体较厚。

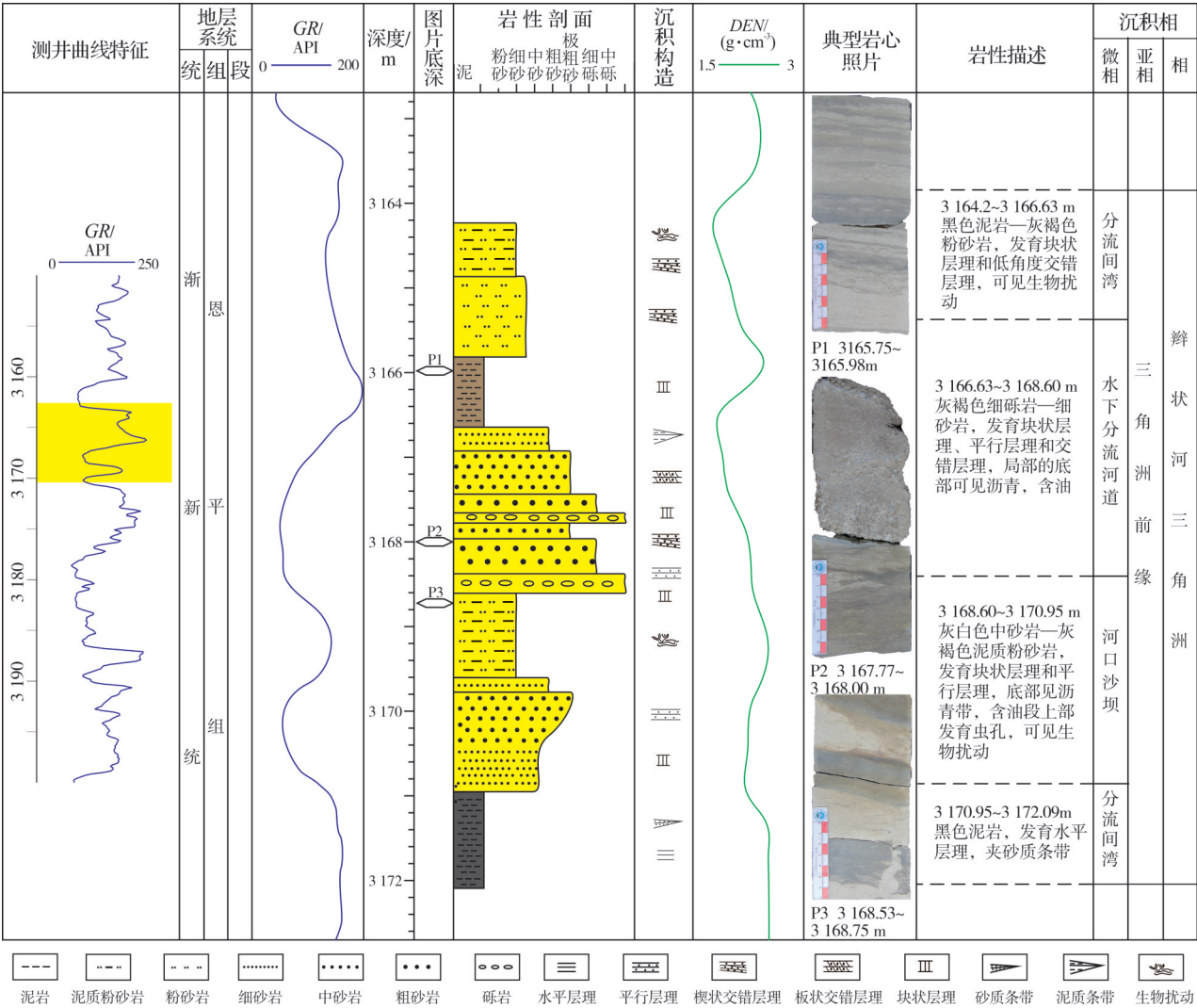


图4 LFA-10井恩平组岩心沉积微相分析综合柱状图

Fig. 4 Comprehensive column of core sedimentary microfacies analysis of Enping Formation in Well LFA-10

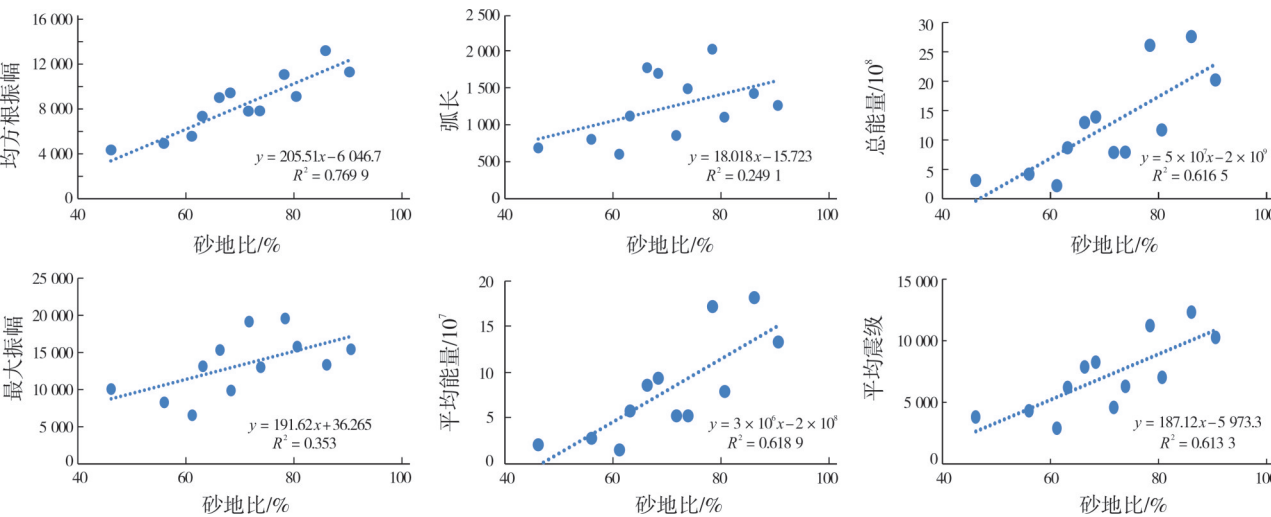


图5 陆丰A油田恩平组地震属性与砂地比间的相关关系

Fig. 5 Correlation between seismic attributes and sandstone percent of Enping Formation in Lufeng A Oilfield

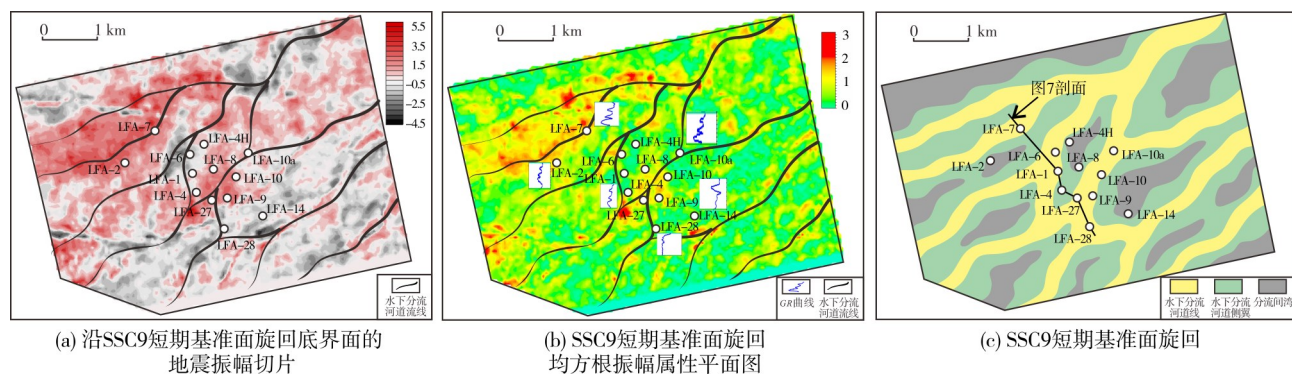


图6 陆丰A油田恩平组SSC9层序沉积相展布

Fig. 6 Sedimentary facies distribution of SSC9 of Enping Formation in Lufeng A Oilfield

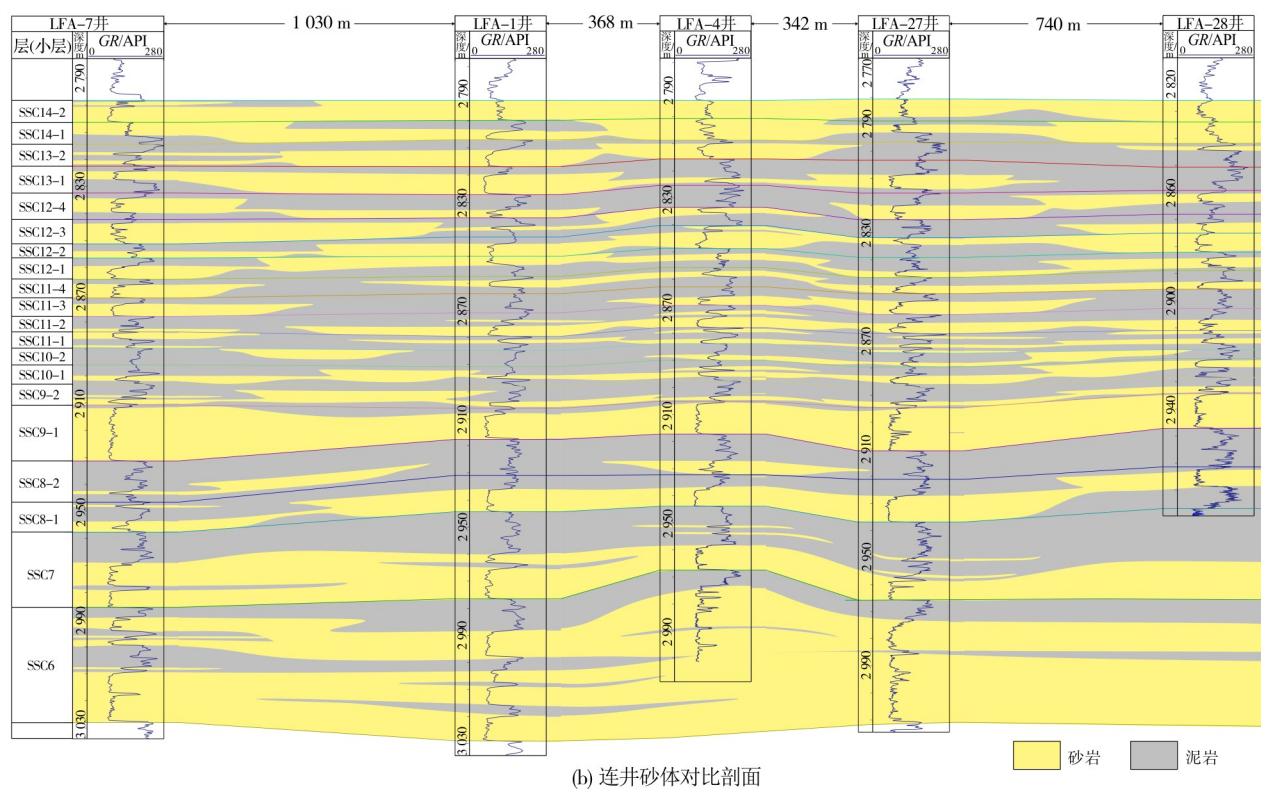
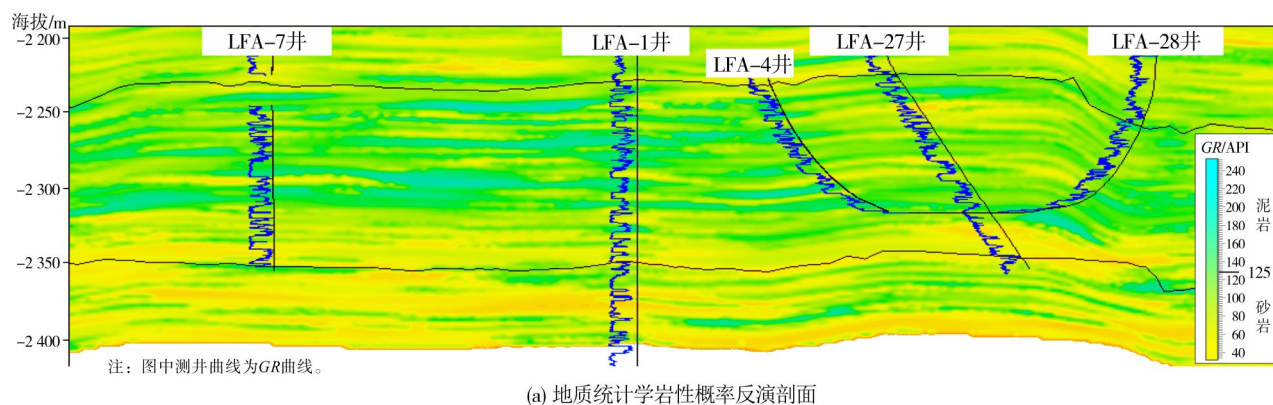


图7 陆丰A油田古近系恩平组井-震联合砂体对比剖面(剖面位置见图6c)

Fig. 7 Well-seismic joint sand body correlation section of Enping Formation in Lufeng A Oilfield (section location is shown in Fig. 6c)

4 内部构型解剖

4.1 构型界面与构型要素的级次划分

构型解剖这一沉积学研究方法最早是由 Miall 提出并用来解剖河流沉积内部的结构^[21]。随着不断的推广应用,构型解剖的研究范围也由河流沉积逐渐扩展到其他沉积类型中,目前已成为了沉积体内部解析的重要手段^[22-24]。构型解剖方法认为沉积体是由不同级次的构型要素所组成。通过分析沉积体内部构型要素及其组合方式可以重构沉积体的形态和内部结构。而构型解剖包括不同级次沉积界面刻画和界面所夹的构型要素分析 2 个方面。

构型界面的级次划分是构型解剖的基础,是识

别和划分不同构型要素的关键。随着构型解剖方法的推广和应用,国内外沉积学家对构型界面的级次不断提出了新的认识。Allen^[25]1983 年在河流沉积中划分识别出了 3 级沉积界面。而后 Miall^[26-28]发表了一系列的文献,将沉积界面的级次逐渐从 3 级扩充到了 9 级。在实际应用中,不同学者结合研究实际也提出了多种划分和编号的方案^[29-31]。本文采用前人研究的方法和思路,结合陆丰 A 油田实际地质特征,对研究区恩平组沉积界面进行了解析,识别和划分出 10 级沉积界面(表 1)。其中,1~4 级界面主要依靠岩心进行识别,5~8 级界面需要结合测井曲线进行判别,9~10 级界面需要应用地震资料进行划分。

表 1 陆丰 A 油田恩平组沉积界面级次划分
Table 1 Hierarchical classification of sedimentary interface of Enping Formation in Lufeng A Oilfield

级次	界面类型	成因解释	级次	界面类型	成因解释
1	纹层界面	相同水动力条件下底形沉积	6	单河道界面	单一河道迁移叠置
2	层系界面	一段时间内底形加积	7	河道复合(微相)体界面	多河道叠加
3	层系组界面	底形形态变化形成	8	单一朵体界面	单个三角洲朵体沉积
4	河道侧积增生面	河道单次侧积	9	复合朵体界面	多个朵体叠加
5	河道侧积体界面	河道多次侧积叠加	10	恩平组顶底界面	构造运动形成的地层组界限

构型解剖除了要识别和划分不同级次的沉积界面外,还应解析不同级次界面所夹的构型要素实体。对应陆丰 A 油田恩平组构型界面的级次划分,本文构建了 10 个不同级次的构型要素实体。

第 1 级是纹层。纹层是在相同水动力条件下同时形成的,纹层这一要素的解析须从纹层厚度、成分构成、颗粒粒度、纹层形态等诸多方面进行。

第 2 级是单个层系。层系是由多个成分、结构、厚度和产状近似的纹层所组成,是一段时间内同一环境中稳定的水动力条件沉积的结果,其解析应包含厚度、成分、结构以及纹层形态等。

第 3 级是层系组。层系组是具有相同岩石相的层系组合,由类型相同但加积方向不同的沙丘叠置形成。

第 4 级是河道侧积增生体,指示河道砂坝的幕式生长过程。

第 5 级是河道砂坝(侧积体)。辫状河三角洲中河道砂坝形态较为复杂,可进一步细分为纵向坝、点砂坝、横向砂坝等。

第 6 级是单河道沉积体,由单一河道加积形成。

恩平组辫状河三角洲前缘沉积中,河道较为发育,随着基准面旋回的变化,河道的切割叠置、河道的发育规模等都发生着周期性变化。

第 7 级是沉积微相,包括水下分流河道(复合河道)、河口砂坝、分流间湾等。复合河道砂体由多个单河道砂体叠置而成,其上下边界发育较明显的砂质或泥质沉积,内部无明显的泥质隔层,但岩心或测井曲线中可识别出泥质夹层。

第 8 级为单个沉积朵体沉积,以多条分叉状的复合河道为骨架,以分流间湾泥质沉积为边界,垂向上呈现出正韵律。

第 9 级为复合朵体,为由一系列朵叶体叠置形成的砂砾岩体。

第 10 级为恩平组沉积,整体上呈现出砂质含量先减少后增多的复合韵律。

4.2 构型解剖与构型模式的建立

在陆丰 A 油田恩平组的油气开发过程中,出现了油水关系矛盾的问题。导致这一问题的根本原因是未能准确地把握储集砂体的内部结构和纵向

的叠置关系。而在前文所述的构型级次划分中, 1~5级过于精细, 而且主要是通过岩心来实现划分和对比, 对于研究区这种少井、少岩心的地区, 难以进行划分和对比; 8~10级则过于粗略, 无法满足开发对储集砂体雕刻的要求。因此, 本文利用地震反演剖面, 分析了研究区恩平组 6~7 级构型样式, 明确了辫状河三角洲单砂体空间叠置样式和接触关系。

在研究区范围内, 以模型为指导, 在砂体成因类型识别的基础上, 通过平面、剖面互动的方式, 精细刻画了小层内部分流河道、河口坝砂体的发育期次以及空间叠置样式(图8)。通过测井曲线和录井岩性特征判断单井的沉积微相, 通过连井对比分析

砂体的沉积期次, 结合均方根振幅属性剖面 and 岩性反演剖面判断井间河道砂体是否连通, 并将连井剖面分析的期次性标注在属性和沉积相平面图上, 以表征不同期次的河道。例如, 在图8c中识别出2期河道, 分别用紫色和绿色表示。从图8a可见井间的地震反射具有中等振幅、连续性较差的特点, 而图8b显示砂体连续性较差, LFA-1井和LFA-2井之间存在明显的泥质分割。垂向上, SSC11中可明显划分出2个期次: 第1期河道发育在LFA-2井附近; 第2期河道发育范围更广, 在LFA-1井、LFA-8井和LFA-10井均有发育。均方根振幅图(图8d)和沉积微相平面图(图8e)显示了两期河道叠置形成的砂体展布(图8d)。

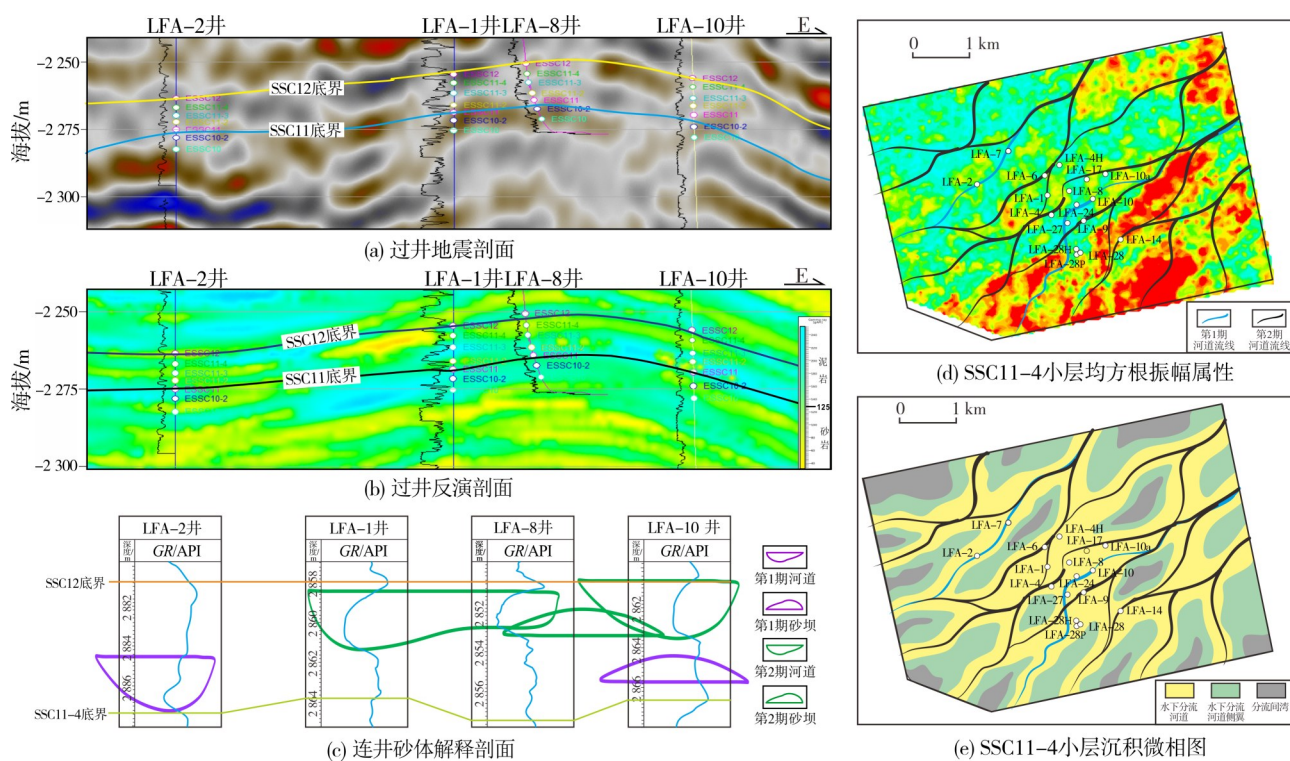


图8 陆丰A油田恩平组井震结合单砂体刻画

Fig. 8 Well-seismic combined description of single sand body in Enping Formation of Lufeng A Oilfield

按照上述方法, 本次研究解剖了SSC12层序以构建研究区恩平组浅水辫状河三角洲的构型样式。SSC12是目前开发的主力层位, 其中可识别出4个7级构型界面, 在7级构型界面内部进一步识别出多个6级构型界面。7级界面控制下的砂层为复合河道。6级界面为河道(河口坝)复合体内单个成因界面, 表征了河道复合体内单个成因砂体的几何形态

及之间的接触关系。该层沉积时期, 多期单河道平面连片发育, 形成分流河道带。通过解剖发现分流河道单砂体呈现窄条带状、网状展布(图9a, 9b)。

垂向上, SSC12-1小层主要发育2期砂体(图9c), 单砂体厚1.8~5 m, 平均厚度为3.03 m。分流河道砂体具有垂向切叠、侧向切叠、侧向拼接、孤立型等叠置样式。局部发育薄层河口坝砂体, 呈孤立状分布。

SSC12-2 小层主要发育 2 期砂体, 单砂体厚 2~8 m, 平均厚度为 4.41 m。分流河道砂体具有侧向切叠、孤立型等叠置样式。SSC12-3 小层主要发育 2 期砂体, 单砂体厚度为 2~11 m, 平均厚 4.11 m。分流河道砂体具

有垂向切叠、侧向切叠、侧向拼接、孤立型等叠置样式。SSC12-4 小层主要发育 2 期砂体, 单砂体厚 2~6 m, 平均厚度为 3.72 m。分流河道砂体具有侧向切叠、孤立型等叠置样式, 局部发育薄层河口坝砂体。

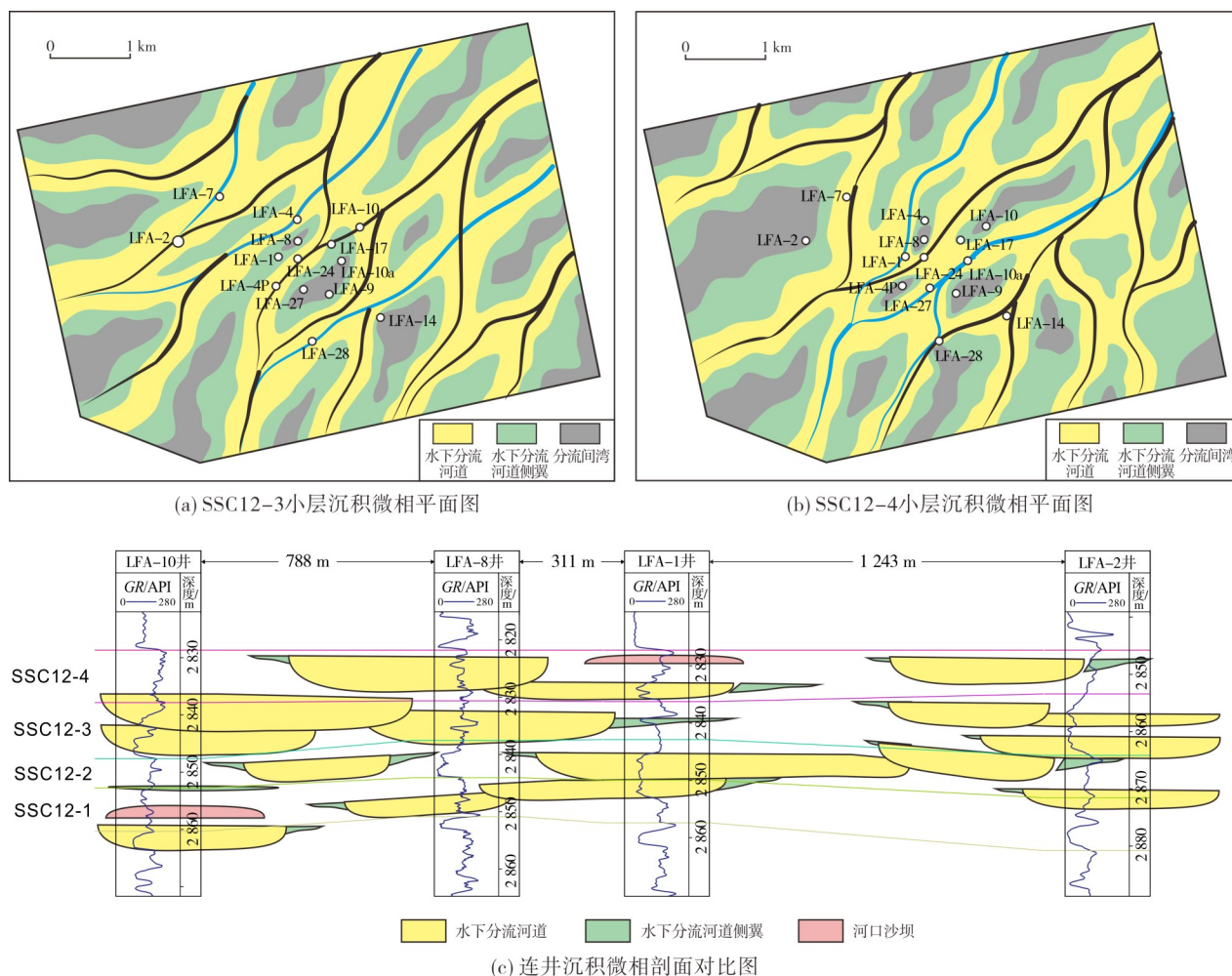


图9 陆丰 A 油田恩平组 SSC12 层序内部砂体构型解剖

Fig. 9 Internal sand body configuration anatomy of SSC12 of Enping Formation in Lufeng A Oilfield

根据研究区单一河道构型解剖成果,总结了研究区辫状河三角洲前缘砂体构型发育样式。在缓坡浅水条件下,辫状河三角洲前缘分流河道能量较弱,对河口坝改造较少,致使前缘河口坝连片分布。三角洲前缘分流河道组合实质仍是由单一流道不断分叉合并而成,分流河道的组合样式为平原分流河道演化的产物。前缘河口坝在三角洲入湖末端区保存较好。三角洲前缘发育切叠型、拼接型、孤立型、砂坝与河道切叠复合型等多种样式(图 10)。

陆丰 A 油田恩平组由下而上,基准面逐渐上升,砂体的切叠样式与连通性发生了明显的变化。恩

平组沉积初期,基准面相对较低,可容纳空间小,沉积以相互切叠的连片分流河道砂体为主。恩平组沉积末期,基准面较高,可容纳空间大,分流河道相互切叠较少,多呈孤立状砂体产出,同时可见河道与河口沙坝叠置的样式。研究区辫状河三角洲砂体由不同成因的砂体拼接叠置而成,其拼接叠置样式与沉积相带的展布具有较好的一致性。从三角洲平原—前缘,河道砂体组合样式由多期切叠式逐渐向侧向切叠和侧向拼接式转变,最终过渡为孤立式,单一河道发育规模逐渐减小,单河道发育数量逐渐增加,砂体之间的连通性逐渐降低(图 11)。

沉积相	沉积亚相	砂体叠置类型	接触关系	剖面样式	测井特征	反演特征	连通关系
辫状河三角洲	辫状河三角洲前缘	切叠型	垂向切叠				连通
			侧向切叠				连通
		拼接型	侧向拼接				弱连通
		孤立型	无接触				不连通
		砂坝与河道切叠复合型	垂向切叠				连通

水下分流河道

河口沙坝

注：测井特征和反演特征栏中的测井曲线为GR曲线。

图 10 陆丰 A 油田恩平组三角洲砂体叠置样式

Fig. 10 Overlapping style of delta sand body of Enping Formation in Lufeng A Oilfield

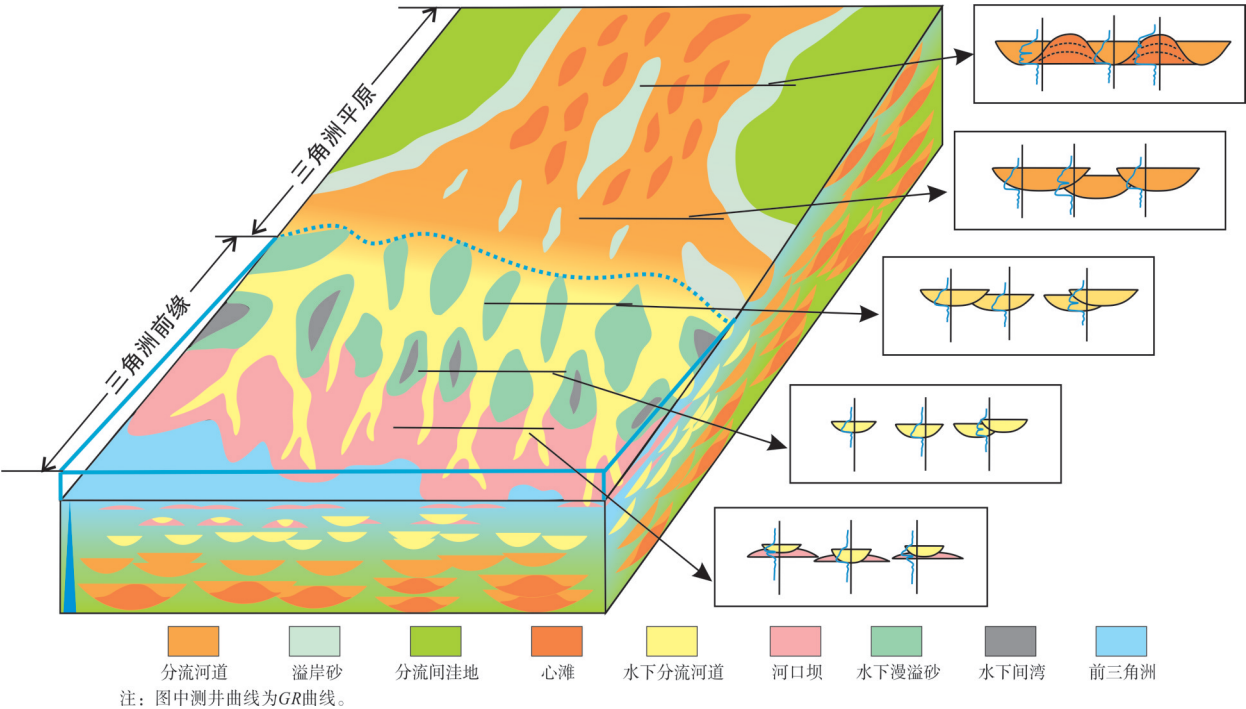


图 11 陆丰 A 油田恩平组三角洲砂体构型模式

Fig. 11 Configuration model of delta sand body of Enping Formation in Lufeng A Oilfield

通过对相邻井剖面砂体构型的解释,统计分析不同层位河道砂体的连通性。砂体叠置频繁的层位因砂体厚度大连通性相对较好,其剩余油的富集区为该小层的构造高点或隐伏低凸起区。基准面较高,砂体孤立的小层中,剩余油的富集主要受控于岩性,寻找水下分流河道或河口沙坝砂体将是下一步勘探和开发的重点。

5 结 论

(1)基于高分辨率层序地层学原理,对珠江口盆地陆丰A油田恩平组岩心、测井、地震资料进行系统分析,按照长期、中期及短期旋回和小层等4个层次对地层进行了精细的划分。在恩平组识别出3个长期基准面旋回,并细分为7个中期基准面旋回和14个短期基准面旋回。

(2)陆丰A油田恩平组发育浅水辫状河三角洲前缘沉积,主要发育水下分流河道、河口坝、分流间湾等微相。恩平组自下而上,伴随基准面变化,水下分流河道由连片型分流河道过渡到孤立型分流河道,最终又转换为连片型分流河道,河道规模由大变小又变大。

(3)恩平组辫状河三角洲前缘水下分流河道主要为多级分叉的似网状河道,从三角洲前缘内部至边缘,河道砂体组合样式由多期切叠式逐渐向侧向切叠和侧向拼接式转变,最终过渡为孤立式,单河道发育规模逐渐减小,单河道发育数量逐渐增加,砂体之间的连通性逐渐降低。

参 考 文 献

- [1] 代一丁,牛子铨,汪旭东,等.珠江口盆地陆丰凹陷古近系与新近系油气富集规律的差异及其主控因素[J].石油学报,2019,40(增刊1):41-52.
DAI Yiding, NIU Zicheng, WANG Xudong, et al. Differences of hydrocarbon enrichment regularities and their main controlling factors between Paleogene and Neogene in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta petrolei sinica, 2019, 40(S1): 41-52.
- [2] 张向涛,汪旭东,舒誉,等.珠江口盆地陆丰凹陷大中型油田地质特征及形成条件[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(11):2979-2989.
ZHANG Xiangtao, WANG Xudong, SHU Yu, et al. Geological characteristics and forming conditions of large and medium oil-fields in Lufeng Sag of Eastern Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Central South University(science and technology), 2017, 48(11): 2979-2989.
- [3] 于开平,丁放.珠江口盆地陆丰凹陷中生界的发现及石油地质意义[J].天然气地球科学,2012,23(3):489-492.
YU Kaiping, DING Fang. Discovery of Mesozoic sediments and its petroleum significance in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Natural gas geoscience, 2012, 23(3): 489-492.
- [4] 朱筱敏,葛家旺,吴陈冰洁,等.珠江口盆地陆丰凹陷深层砂岩储层特征及主控因素[J].石油学报,2019,40(增刊1):69-80.
ZHU Xiaomin, GE Jiawang, WU Chen bingjie, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of deep sandstone in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta petrolei sinica, 2019, 40(S1): 69-80.
- [5] 葛家旺,朱筱敏,吴陈冰洁,等.辫状河三角洲沉积特征及成因差异:以珠江口盆地陆丰凹陷恩平组为例[J].石油学报,2019,40(增刊1):139-152.
GE Jiawang, ZHU Xiaomin, WU Chen bingjie, et al. Sedimentary characteristics and genetic difference of braided delta: a case study of Enping Formation in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta petrolei sinica, 2019, 40(S1): 139-152.
- [6] 于兴河,王德发,孙志华.湖泊辫状河三角洲岩相、层序特征及储层地质模型:内蒙古贺岱湖现代三角洲沉积考察[J].沉积学报,1995(1):48-58.
YU Xinghe, WANG Defa, SUN Zhihua. Lithofacies types, vertical profile features and reservoir geological models of braided deltaic sandbodies in faulted lake basin: the observation on deposition of modern deltas in Daihai Lake, Inner Mongolia[J]. Acta sedimentologica sinica, 1995(1): 48-58.
- [7] 侯加根.文南油田文79断块区沙二下亚段沉积微相与开发效果分析[J].石油勘探与开发,2000,27(6):65-67.
HOU Jiagen. An analysis of sedimentary microfacies and production response for the lower part of the second Shahejie sub-member in Block Wen-79 in the south of Wenliu oil field[J]. Petroleum exploration and development, 2000, 27(6): 65-67.
- [8] 付清平,李思田.湖泊三角洲平原砂体的露头构形分析[J].岩相古地理,1994(5):21-33.
FU Qingping, LI Sitian. Outcrop analysis of architecture of lacustrine deltaic plain sand bodies[J]. Sedimentary facies and palaeogeography, 1994(5): 21-33.
- [9] MCPHERSON J G, SHANMUGAM G, MOIOLA R J. Fan-deltas and braid deltas: varieties of coarse-grained deltas[J]. GSA bulletin, 1987, 99(3): 331-340.
- [10] 金振奎,何苗.三角洲沉积模式的新认识[J].新疆石油地质,2011,32(5):443-446.
JIN Zhenkui, HE Miao. New understanding of delta depositional model[J]. Xinjiang petroleum geology, 2011, 32(5): 443-446.
- [11] 何文祥,吴胜和,唐义疆,等.河口坝砂体构型精细解剖[J].石油勘探与开发,2005,32(5):42-46.
HE Wenxiang, WU Shenghe, TANG Yijiang, et al. Detailed architecture analyses of debouch bar in Shengtuo Oilfield, Ji-

- yang Depression[J]. *Petroleum exploration and development*, 2005, 32(5): 42-46.
- [12] 朱卫红, 吴胜和, 尹志军, 等. 辫状河三角洲露头构型: 以塔里木盆地库车坳陷三叠系黄山街组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(3): 482-489.
- ZHU Weihong, WU Shenghe, YIN Zhijun, et al. Braided river delta outcrop architecture: a case study of Triassic Huangshan Formation in Kuche Depression, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum exploration and development*, 2016, 43(3): 482-489.
- [13] 陈彬滔, 杨丽莎, 于兴河, 等. 准噶尔盆地南缘三工河组西山窑组辫状河三角洲水动力条件与砂体分布规模定量分析[J]. *中国地质*, 2012, 39(5): 1290-1298.
- CHEN Bintaoy, YANG Lisha, YU Xinghe, et al. Quantitative analysis of hydrodynamic conditions and sand body distribution dimensions of the braided river delta in Sangonghe Formation and Xishanyao Formation on the south margin of Junggar Basin[J]. *Geology in China*, 2012, 39(5): 1290-1298.
- [14] 陈莉, 芦凤明, 范志勇. 大港油田官80断块辫状河储层构型表征[J]. *大庆石油学院学报*, 2012, 36(2): 71-76, 90, 127-128.
- CHEN Li, LU Fengming, FAN Zhiyong. The characterization of braided river reservoir configuration in 80-fault-block Dagang oil field[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2012, 36(2): 71-76, 90, 127-128.
- [15] 柳广弟, 牛子铖, 陈哲龙, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷在洼陷迁移控制下的油气成藏规律[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊1): 26-40, 216.
- LIU Guangdi, NIU Zicheng, CHEN Zhelong, et al. Hydrocarbon accumulation patterns controlled by the migrated subsags in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta petrolei sinica*, 2019, 40(S1): 26-40, 216.
- [16] QUAN Yongbin, LIU Jianzhang, ZHAO Dijiang, et al. The origin and distribution of crude oil in Zhu III sub-basin, Pearl River Mouth Basin, China[J]. *Marine and petroleum geology*, 2015, 66(Part 4): 732-747.
- [17] 张功成, 陈国俊, 张厚和, 等. “源热共控”中国近海盆地油气田“内油外气”有序分布[J]. *沉积学报*, 2012, 30(1): 1-19.
- ZHANG Gongcheng, CHEN Guojun, ZHANG Houhe, et al. Regular distribution of inside-oil fields and outside-gas fields controlled by source rocks and heat in China offshore basins[J]. *Acta sedimentologica sinica*, 2012, 30(1): 1-19.
- [18] 陈锋, 朱筱敏, 葛家旺, 等. 珠江口盆地陆丰南地区文昌组层序地层及沉积体系研究[J]. *岩性油气藏*, 2016, 28(4): 67-77, 94.
- CHEN Feng, ZHU Xiaomin, GE Jiawang, et al. Sequence stratigraphy and depositional systems of Wenchang Formation in the southern Lufeng area, Pearl River Mouth Basin[J]. *Lithologic reservoirs*, 2016, 28(4): 67-77, 94.
- [19] ZHOU X M, LI W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. *Tectonophysics*, 2000, 326(3/4): 269-287.
- [20] 罗泽, 闫正和, 谢明英, 等. 珠江口盆地东部恩平12洼古近系文昌组古地貌演化及其对沉积充填的控制[J]. *现代地质*, 2020, 34(4): 710-717.
- LUO Ze, YAN Zhenghe, XIE Mingying, et al. Paleogeomorphologic reconstruction, evolution, and sedimentary system control on Wenchang Formation in Enping 12 subsag, eastern Pearl River Estuary Basin[J]. *Geoscience*, 2020, 34(4): 710-717.
- [21] MIAL L A D. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. *Earth-science reviews*, 1985, 22(4): 261-308.
- [22] BRIDGE J S, WILLIS B J, BEHRENSMEYER A K. Architecture of Miocene overbank deposits in northern Pakistan: discussion and reply[J]. *Journal of sedimentary research*, 1995, 65 (3b): 401-407.
- [23] 裴亦楠. 储层沉积学研究工作流程[J]. *石油勘探与开发*, 1990(1): 85-90.
- QIU Yinan. A proposed flow-diagram for reservoir sedimentological study[J]. *Petroleum exploration and development*, 1990(1): 85-90.
- [24] 张昌民, 林克湘, 徐龙, 等. 储层砂体建筑结构分析[J]. *江汉石油学院学报*, 1994, 16(2): 1-7.
- ZHANG Changmin, LIN Kexiang, XU Long, et al. Architecture analysis for reservoir sandbodies[J]. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 1994, 16(2): 1-7.
- [25] ALLEN J R L. Studies in fluvial sedimentation: bars, bar-complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams) in the brownstones (L. Devonian), Welsh borders[J]. *Sedimentary geology*, 1983, 33(4): 237-293.
- [26] MIAL L A D. Reservoir heterogeneities in fluvial sandstones: lessons from outcrop studies[J]. *AAPG bulletin*, 1988, 72(6): 682-697.
- [27] MIAL L A D. Hierarchies of architectural units in terrigenous clastic rocks, and their relationship to sedimentation rate[G]// MIAL L A D, TYLER N. The three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and its implications for hydrocarbon discovery and recovery. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1992: 6-12.
- [28] MIAL L A D. The geology of fluvial deposits[M]. Berlin: Springer, 1996: 75-178.
- [29] 吴胜和, 纪友亮, 岳大力, 等. 碎屑沉积地质体构型分级方案探讨[J]. *高校地质学报*, 2013, 19(1): 12-22.
- WU Shenghe, JI Youliang, YUE Dali, et al. Discussion on hierarchical scheme of architectural units in clastic deposits[J]. *Geological journal of China universities*, 2013, 19(1): 12-22.
- [30] 马世忠, 王一博, 崔义, 等. 油气区水下分流河道内部建筑结构模式的建立[J]. *大庆石油学院学报*, 2006, 30(5): 1-3.
- MA Shizhong, WANG Yibo, CUI Yi, et al. Establishment of the model for inter-architecture of underwater distributary chan-

- nel in oil-gas area[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2006, 30(5): 1-3.
- [31] 张昌民, 刘江艳, 潘进, 等. 玛湖凹陷百口泉组砂砾岩建筑结构要素层次分析[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(1): 23-34.

ZHANG Changmin, LIU Jiangyan, PAN Jin, et al. Hierarchical architectural element analysis for sandy conglomerate deposits of Baikouquan Formation, Mahu Sag[J]. Xinjiang petroleum geology, 2018, 39(1): 23-34.

编辑: 刘江丽 张润合

Sand body configuration of shallow braided river delta of Enping Formation in Lufeng A Oilfield, Pearl River Mouth Basin

LIU Chenglin, LIU Weixin, GU Zhenyu, LIANG Quanquan, WANG Zeyu, GU Rong

Abstract: The Pearl River Mouth Basin is one of the important petroliferous basins in China. At first, the main intervals of oil and gas exploration and development in the basin were concentrated in Neogene, but with the advancement of rolling development, Paleogene has gradually become the focus and hotspot of oil and gas development. Lufeng A Oilfield is the earliest oilfield to develop Paleogene in the Pearl River Mouth Basin, and the development layer system is Enping Formation of Paleogene. Due to the strong heterogeneity of sand body in the study area, with the deepening of development process, the oilfield has exposed many problems, such as unclear interpretation of oil-water interface, unclear corresponding relationship of sand body and so on. In order to solve these problems and meet the needs of oil and gas development, it is urgent to clarify the sand body configuration. In this paper, using the idea of analytic hierarchy process and the research method of seismic sedimentology, through the comprehensive analysis of core, three-dimensional seismic, logging and production performance data, the sand body configuration in Enping Formation of Lufeng A Oilfield is finely characterized. The results show that: (1) Shallow braided river delta front deposits are developed in Enping Formation of Lufeng A Oilfield, mainly including underwater distributary channel, mouth bar and interdistributary. (2) The underwater distributary channel in the front of braided river delta in the study area is mainly multi-level braided network-like channel, and on the profile shows lateral shear superposition, lateral splicing and isolated superposition styles; (3) Small scale underwater distributary channel and lobed mouth bar are developed at the end of the delta front, and lateral splicing, isolated and bar-channel composite sand body superposition styles are developed in the section; (4) The braided river delta in the study area is formed by the splicing and superposition of sand bodies of different types. Along the provenance direction, the combination style of single channel sand bodies is transformed from multi-stage cutting-stacking style to lateral cutting-stacking and lateral splicing style, finally to isolation style. At the same time, the development scale of single channel is gradually reduced, the development number of single channel is gradually increased, and the connectivity between sand bodies is gradually reduced.

Key words: sand body configuration; underwater distributary channel; braided river delta; Enping Formation; Lufeng Sag; Pearl River Mouth Basin

LIU Chenglin, First author: Master, mainly engaged in fine reservoir description and geological research of oil and gas development in the Pearl River Mouth Basin. Add: CNOOC Building, No.3168 Houhaibin Rd. (Shenzhen Bay section), Nanshan District, Shenzhen, Guangdong 518054, China

WANG Zeyu, Corresponding author: Graduate Student, mainly engaged in sedimentary reservoir research. Add: Yangtze University, No. 111 Daxue Rd., Caidian District, Wuhan, Hubei 430100, China