

南堡凹陷柳赞地区沙三段中上部层序结构及沉积充填特征研究

孙盼科^{1*}, 贾浪波², 朱红璋³, 张林⁴, 何太洪⁴, 徐朝晖¹, 李聪⁵

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710000

3 中石油长庆油田分公司第五采油厂, 西安, 710000

4 中石油西部钻探工程有限公司, 乌审旗 017300

5 中石油冀东油田公司, 唐山 063000

* 通信作者, sunpk@cup.edu.cn

收稿日期: 2020-11-25

国家科技重大专项“典型地层油气藏区带解剖及评价技术研究”(2017ZX05001-003-02)、中国石油大学(北京)基本科研业务费专项资金项目“基于岩石物理的海相碎屑岩储层非均质性表征”(2462017YJRC017)资助

摘要 南堡凹陷柳赞地区沙三段沉积期构造运动复杂, 多幕构造—沉积演化导致层序地层格架及沉积充填样式时空差异大, 区域上层序尺度的研究已无法满足研究区沉积、砂体精细表征的需求。本次研究聚焦沙三段中上部主力含油层系, 通过陆相层序地层划分与对比技术, 揭示了研究区三级层序内部准层序组级次的层序结构及沉积充填特征, 明确了其对油气勘探开发的指导意义。研究表明: 沙三 1~3 亚段整体可划分为 2 个三级层序 SQ1 和 SQ2, 其中, 主力含油层 III 油组和 II 油组为 SQ1 层序构造宁静期湖退体系域的两个进积准层序组, 垂向上随着沉积水体逐渐变浅, 整体呈现扇三角洲“小平原大前缘”到平原、前缘均衡发育的沉积演化特征; I 油组和 0 油组为 SQ2 层序构造活跃期湖侵体系域的两个退积准层序组, 随着可容空间与沉积物供给之比逐渐增大, 扇三角洲也逐渐由平原、前缘均衡发育演化成扇三角洲逐渐后撤, 以滨浅湖、半深湖为主的沉积特征。横向上, 边界断层的差异活动特征控制了相同沉积期沉积环境的横向变化。准层序组级次的沉积特征控制了研究区有利储盖组合的发育, 构造宁静期湖退体系域中晚期(III 油组和 II 油组)和构造活跃期湖侵体系域早期(I 油组)发育的厚层储集砂体与上覆构造活跃期末期湖侵泥岩(0 油组)形成了有利的储盖组合; 准层序组的结构特征控制了准层序单元及其内部砂体、流体的分布规律, 退积式准层序组下部砂体更发育, 整体呈现下油上水的特征, 准层序单元的顶部是有利储集砂体及油气的分布位置。通过本次研究, 揭示了沙三段中上部主力含油层系 0~III 油组的层序结构及沉积充填模式, 为后期砂体分布预测及岩性油藏勘探、开发提供了指导。

关键词 层序结构; 沉积充填; 演化模式; 柳赞地区

Sequence architecture and sedimentary filling characteristics of the middle-upper part of the Es₃ Formation in the Liuzan Area, Nanpu Depression

SUN Panke¹, JIA Langbo², ZHU Hongzhang³, ZHANG Lin⁴, HE Taihong⁴, XU Zhaohui¹, LI Cong⁵

引用格式: 孙盼科, 贾浪波, 朱红璋, 张林, 何太洪, 徐朝晖, 李聪. 南堡凹陷柳赞地区沙三段中上部层序结构及沉积充填特征研究. 石油科学通报, 2021, 01: 16-30

SUN Panke, JIA Langbo, ZHU Hongzhang, ZHANG Lin, HE Taihong, XU Zhaohui, LI Cong. Sequence architecture and sedimentary filling characteristics of the middle-upper part of the Es₃ Formation in the Liuzan Area, Nanpu Depression. Petroleum Science Bulletin, 2021, 01: 16-30. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.002

1 College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Research Institute of Exploration and Development, CNPC Changqing Oil Field, Xi'an 710000, China

3 The Fifth Oil Production Plant, CNPC Changqing Oil Field, Xi'an 710000, China

4 CNPC Xibu Drilling Engineering Co., Ltd., Wushenqi 017300, China

5 CNPC Jidong Oil Field, Tangshan 063000, China

Abstract The tectonic movement during the deposition of the Es₃ Formation in the Liuzan Area, Nanpu Sag, is complex, and the multi-episode tectonic-sedimentary evolution led to great spatial-temporal differences in sequence stratigraphic framework and sedimentary filling patterns. The research into regional sequences cannot meet the needs of fine characterization of sedimentation and sand bodies in the study area. Here we addressed these issues by conducting research focusing on the main oil-bearing formations of middle-upper part of the Es₃ Formation by using division-correlation technology of continental sequence stratigraphy. The results reveal the sequence architecture and sedimentary filling characteristics of parasequence sets within the third-order sequence, and clarify its guidance for oil and gas exploration and development. The first to third submembers of the Es₃ Formation can be divided into two third-order sequences SQ1 and SQ2. The III and II oil-bearing formations are two progradational subsequence sets of the lacustrine regression system tract in SQ1 during the tectonically quiet period. With the gradual shallowing of the sedimentary water body, the study area presents the sedimentary evolution characteristics from "small plain and big front in a fan delta" to balanced development of "plain and front". The I and 0 oil-bearing formations are two retrogradational parasequence sets of the lacustrine transgressive system tract in SQ2 during the tectonically active period. With an increase of the ratio of accommodation space to sediment supply, the study area presents the sedimentary evolution characteristics from the balanced development of "plain and front in a fan delta" to shallow and semi-deep lake facies with the gradual retrogradation of the fan delta. Laterally, the different activity characteristics of boundary faults control the lateral changes of the sedimentary environment in the same sedimentary period. The sedimentary characteristics of parasequence sets control the development of favorable reservoir-cap assemblages in the study area. The middle-late stage of the lacustrine regression system tract (the III and II oil-bearing formations) and the early stage of the lacustrine transgressive system tract (the I oil-bearing formation) during the tectonically quiet period are favorable for the deposition of thick reservoir rocks, associated with lacustrine transgressive mudstone (the 0 oil-bearing formation) deposited at the end of the tectonically active period. These form a favorable reservoir-cap combination. The architecture characteristics of parasequence sets control the distribution of parasequences and their internal sand bodies and fluids. The sand bodies in the lower part of the retrogradational parasequence sets are more developed, showing the characteristics of lower oil and upper water. The top of the parasequence unit is the distribution location of favorable reservoir sandbodies and hydrocarbon. Through this study, we reveal the sequence architecture and sedimentary filling modes of the 0~III oil-bearing formations in the middle-upper part of the Es₃ Formation, which provides guidance for the prediction of sand body distribution and the exploration and development of lithologic reservoirs.

Keywords sequence architecture; sedimentary filling; evolution model; Liuzan Area

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.002

0 引言

随着油气勘探、开发程度的不断深入,油气地质研究的焦点也逐渐由相对简单的构造油气藏转向地质条件复杂的岩性和地层油气藏^[1-2],研究的重点和难点也聚焦于砂体分布、砂体结构及其主控要素。我国陆相断陷盆地广泛发育岩性—地层油气藏,然而由于其构造运动复杂,导致地层结构及沉积充填样式时空差异大,砂体类型多、规模小、相变快^[3-4],频繁的构造运动导致沉积旋回顶界缺失稳定的标志层,等时地层对比难度大,进而影响了有效砂体及油气藏预测的准确性^[5-8]。层序地层学理论的提出为等时地层研究,构造—层序—沉积—储层的时空配置关系研究提供了新的思路与途径^[9-11]。通过分析陆相断陷盆地构造—沉

积背景,我国学者建立了“湖侵—湖退体系域”二分方案以及适用于陆相断陷盆地的高分辨率层序地层划分方案^[12-13]。以层序地层格架为约束,开展沉积特征研究,建立沉积充填、演化模式,可有效提高砂体分布预测及表征精度^[14-18]。

渤海湾盆地南堡凹陷为典型的陆相断陷盆地,柳赞地区位于南堡凹陷的东北部,沙河街组三段是该区油气勘探、开发的主力层位。沙三段油藏从投入开发到现在已经经历了30多年的历史,然而开发实践证明,研究区目的层油水矛盾问题仍较突出,砂体、沉积、层序地层的认识仍有待深化^[19]。穆立华,刘欣,刘可行等学者对柳赞地区沙河街组的层序地层及沉积特征进行了研究,但其主要聚焦三级层序尺度,对层序内部结构及不同级次的沉积充填特征研究较少,因

此, 这些研究成果对于该区的勘探具有很好的指导意义, 但难以满足现阶段砂体精细表征及预测等工作需求^[20-22]。此外, 陆相断陷盆地具有多幕构造演化、多物源、多沉积体系类型等特点^[23], 次级构造单元的层序结构及沉积充填特征与区域上的特征具有一致性, 亦具有差异性, 因此, 无法用统一的方案来对每一个断块的层序内幕特征进行精细解剖研究^[24-26]。在本次研究中, 笔者以区域地质认识为指导, 应用研究区的地震、测井及岩心资料, 利用井、震结合的陆相层序地层划分对比技术, 对沙三段主力含油层系进行了系统的解剖, 建立了适合该区含油层系开发的层序地层格架, 深化了地层格架约束下的沉积充填特征, 为实现柳赞地区老区挖潜及寻找有利砂体发育区, 实现岩性油气藏勘探新突破提供了一定的参考依据。

1 研究区概况

柳赞地区地理位置位于河北省唐山市滦南县境内, 构造位置位于渤海湾盆地黄骅坳陷南堡凹陷东北部, 高柳构造带东端, 西以鞍部与高尚堡构造和拾场次洼连接, 东北部和东部以柏各庄断层为界与柏各庄凸起和马头营凸起相连, 南以高柳断层为界, 面积约70 km²(图 1a, b)^[27]。柳赞地区在结晶基底上依次沉积了古近系沙河街组和东营组, 新近系馆陶组、明化镇组和第四系平原组地层, 其中沙河街组可细分为沙三段至沙一段三个层段。根据岩性、电性特征, 沙三段自下而上可分为5个亚段, 其中2、3亚段可进一步细分为0~V油组。本次研究重点以沙三3亚段上

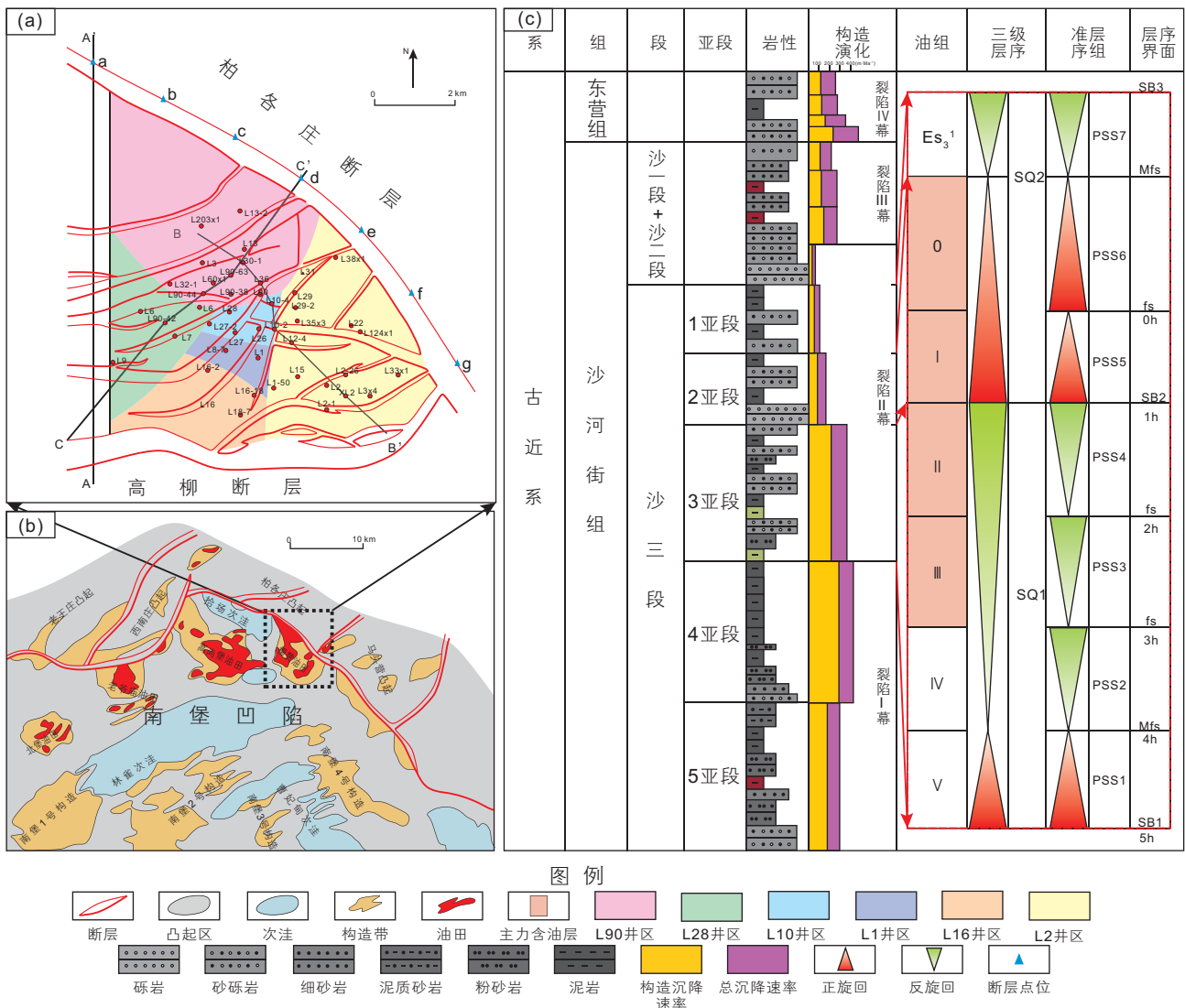


图 1 柳赞地区地理位置及目的层层序地层划分方案

Fig. 1 The geographical location of the Liuzan area and the sequence stratigraphic division of target interval

部的III油组、II油组以及沙三2亚段的I油组、0油组为研究对象。

柳赞地区的构造演化和南堡凹陷具有一致性，经历了4幕裂陷作用和1幕拗陷作用，控制了不同的构造格局和沉积充填样式^[28]。柏各庄断层是柳赞地区东北部一条张扭性控凹边界断层，其形成演化与凹陷的幕式演化密切相关。沙三段沉积时期，柏各庄断层的活动性存在明显的分段，总体表现为南强北弱，断层活动速率表现为强弱交替的“翘翘板”变化特征^[21]。边界断层的差异性分段活动影响着柳赞地区地层沉降速率、可容空间变化、沉积物的注入量与注入方向，最终影响砂体不同的展布规律^[29]。高柳断层在沙三段沉积末期逐渐活动，对柳赞地区地层具有重要的改造作用^[30]。柳赞地区在沙三段沉积时期古地形呈现东北高西南低的特征，来自柏各庄凸起和马头营凸起的碎屑物质经短距离搬运后快速进入湖盆。由于紧邻边界断层且断层长期活动，古地形坡度较陡，在研究区目的层主要发育近源扇三角洲沉积体系^[31]。

2 层序地层特征

等时层序地层格架的建立是开展沉积相展布和砂体分布规律研究的前提^[32]。然而柳赞地区部分地层存在岩性对比穿时的现象，稳定分布的泥岩一般是湖泛面的标志，将其作为层序边界也有待商榷。因此，本次研究以层序地层学和地震地层学理论为指导，结合

地震剖面相面特征、测井曲线形态特征和钻井岩性组合特征，重新梳理并确定了研究区目的层沙三段1~3亚段层序界面和不同级次湖泛面的特征，对其开展了高精度层序地层划分与对比研究。

2.1 层序界面及湖泛面特征

在本次研究中，沙三3亚段V油组底界面(SB1)、2亚段I油组底界面(SB2)和1亚段Es₃¹油组顶界面(SB3)是典型的三级层序界面。SB1在GR曲线上表现为钟形测井曲线的底界面，为典型的电性突变界面；地震剖面上，SB1对应5h界面，表现为强振幅、高连续的整一界面，全区可连续追踪，界面上下地震相特征差异大，界面之下为强振幅高连续性反射，界面之上为中振幅差连续性反射(图2)。SB2在GR、RLLS、RLLD曲线上均表现为漏斗形—钟形转换界面，即旋回转化界面；地震剖面上，SB2对应于1h界面，界面之下可见明显的削截反射终止关系，与下伏地层呈现不整一接触(图2)。SB3在测井曲线上也存在突变，地震剖面上对应于Es₂界面，表现为局部削截不整齐的特征(图2)。三级层序以最大湖泛面(Mfs)为界，分为湖侵和湖退体系域，研究区沙三3亚段V油组顶界面，2亚段0油组顶界面均为最大湖泛面。测井曲线上表现为明显的钟形—漏斗形转换面，即由正旋回转变为反旋回，GR曲线的这种特征也说明了砂泥比由逐渐减小向逐渐增大转变；地震剖面上，两个最大湖泛面分别对应于4h和Es₃¹界面，4h界面可见

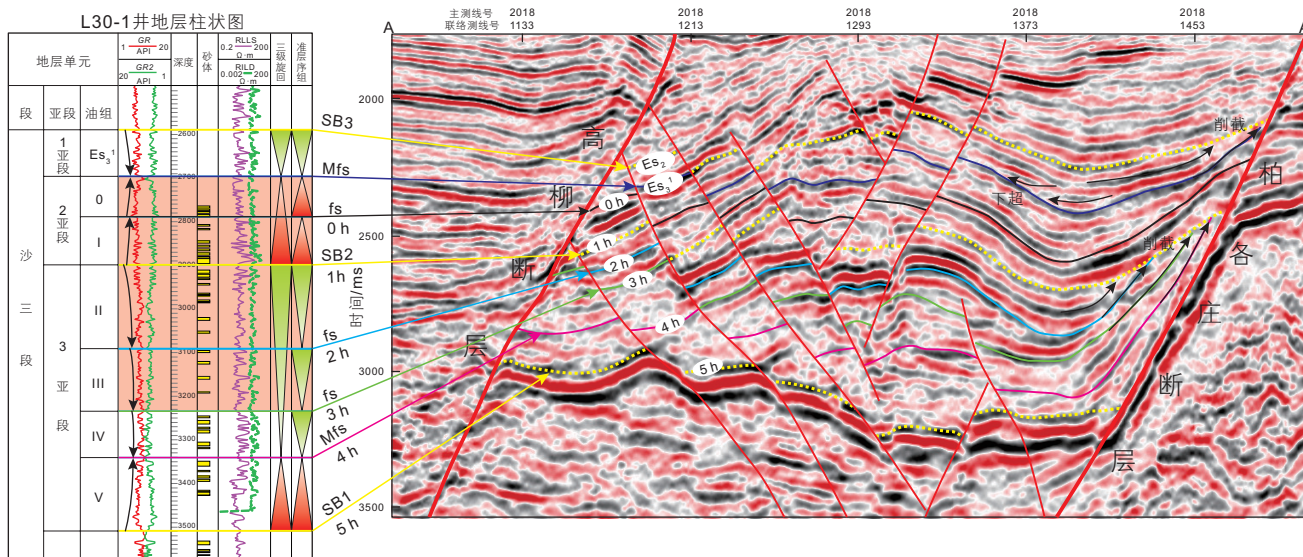


图2 柳赞地区沙三1~3亚段层序地层界面测井及地震响应特征(剖面位置见图1AA')

Fig. 2 Logging and seismic response characteristics of sequence boundary of 1~3 submember of Es₃ in Liuzan area (the section position is shown in Fig. 1AA')

超覆到盆地边界最远位置, Es_3^1 界面之上可见下超前积反射结构(图2)。I油组、III油组、IV油组的顶界面均为次级湖泛面(fs), 根据测井曲线特征可知界面处均分布有较稳定的泥岩; 地震剖面上, 这几个界面分布对应于0 h、2 h和3 h, 均表现为连续整一的地震反射特征(图2)。

2.2 层序地层格架的建立

以层序界面及不同级次湖泛界面为控制, 井震结合开展全区层序地层的划分与对比, 系统建立了柳赞地区沙三1~3亚段等时层序地层格架(图3)。自下而上, 在沙三1~3亚段共识别三级层序界面3个, 最大湖泛面2个, 次级湖泛面3个, 据此将目的层自下而上划分为2个三级层序(SQ1和SQ2), 4个体系域和7个准层序组(PSS1~PSS7)(图2, 图3)。SQ1对应于沙三3亚段, 包含II~V共4个油组; SQ2对应于沙三2亚段和I亚段, 包含 Es_3^1 ~I共3个油组。在目的层层序格架内部, 主力含油层系为0~III油组, 其中III油组和II油组对应于SQ1湖退体系域中的2个进积式准层序组, I油组和0油组对应SQ2的湖侵体系域中的两个退积式准层序组。图3为重建的研究区目的层层序地层格架, 目的层在垂物源方向上总体分布稳定, 格架内幕层序边界和湖泛面特征较为明显, 在区域内可进行横向追踪对比。层序地层格架的建立为进一步开展地震相及沉积相分析建立了等时地层约束条件, 并为砂体分布预测和沉积体系时空演化的精细恢复奠定了基础。

3 沉积相类型及特征

研究区位于柏各庄断层的下降盘, 目的层沉积时期具有近源快速堆积的特征。综合岩心相、测井相及地震相综合分析发现, 研究区目的层主力含油层系主要发育有扇三角洲和湖泊相沉积体系。

3.1 扇三角洲沉积特征

扇三角洲形成于构造活动较为强烈的地区, 短而坡度大的河流从附近物源区流出, 携带大量粗粒沉积物在湖盆边缘快速堆积形成扇三角洲^[33]。研究区目的层主力含油层0~III油组沉积期对应于裂陷II幕时期(图2), 强烈的构造运动导致柏各庄断层下降盘陡带坡度较陡, 可容空间较大, 易发育扇三角洲沉积体系^[34-35]。

(1) 扇三角洲平原

扇三角洲平原亚相为扇三角洲水上或水上一水下的过渡部分, 是阵发性洪峰卸载条件下的辫状水道沉积, 砂层发育, 泥质层发育较少, 砂地比一般高达0.7以上。沉积物粒度总体较粗, 以砂砾岩和砾状砂岩为主, 具较混杂的块状构造; 泥岩表现为棕红、紫红色, 反映氧化—弱氧化的沉积环境(图4)。电测曲线上, 扇三角洲平原自然伽玛和深、浅侧向电阻率曲线均表现为微齿箱状夹少量平直段曲线的特征(图4), 表明扇三角洲平原主体呈现“砂包泥”的沉积特征; 由于近源快速混杂堆积, 在地震剖面上扇三角洲平原表现

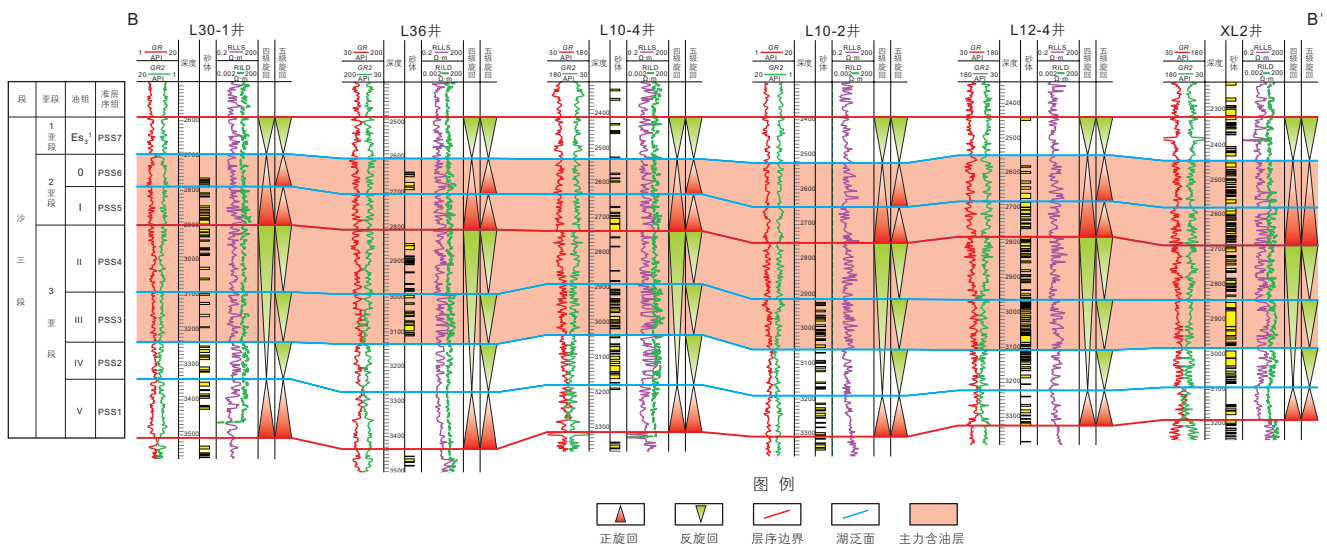


图3 柳赞地区沙三段 Es_3^1 ~V油组层序地层特征(剖面位置见图1BB')

Fig. 3 Sequence stratigraphic characteristics of the Es_3^1 ~V oil-bearing formation of Es_3 in Liuzan area (the section position is shown in Fig. 1 BB')

为典型的帚状前积反射特征(图 4)^[36]。扇三角洲平原发育辫状水道和越岸沉积两种微相类型,其中辫状水道中可见块状砾岩的混杂堆积,这也是扇三角洲沉积的典型标志;而越岸沉积发育典型的陆上沉积标志,如红褐色泥岩和植物化石(图 4)。

(2) 扇三角洲前缘

扇三角洲前缘亚相是冲积扇的水下部分,以水下分流河道砂体为骨架,同时发育支流间湾、河口坝、席状砂等沉积微相,坡降相对变缓,是扇三角洲的主体部分。扇三角洲前缘总体呈现砂泥岩不等厚或者等厚互层的特征,砂岩具有正韵律,河道砂岩底部可见砂砾岩滞留沉积(图 4);河口坝粒度较细,发育平行层理和交错层理(图 4);支流间湾主体为灰色、灰绿色泥岩沉积,反映弱还原环境。电测曲线上,扇三角洲前缘总体表现为齿化钟形、漏斗形和平直曲线的组合特征(图 4),其中水下分支河道表现为齿化钟形特征,河口坝为漏斗形,席状砂为指状,而支流间湾表

现为泥岩基线的特征。地震剖面上,扇三角洲前缘可见典型的前积反射结构^[37-38],但其前积层角度较扇三角洲平原减小(图 4)。前扇三角洲特征与滨浅湖特征相似,不好区分,因此,在本次研究中和滨浅湖一起讨论。

3.2 湖泊相沉积特征

湖泊相是湖泊中受河流水动力影响较小,主要受波浪和岸流作用形成的沉积^[39]。柳赞地区紧邻拾场次洼,湖泊相广泛分布,根据岩性组合和地震相特征可以划分出滨浅湖、半深湖—深湖等亚相,横向上湖泊相与扇三角洲沉积体系交汇过渡。

(1) 滨浅湖沉积特征

滨浅湖是指枯水期最高水位线至浪基面之间的地带,主要分布在凹陷靠近盆地边缘一侧,其沉积分布范围和规模严格受湖盆结构和演化阶段控制。滨浅湖沉积以泥岩为主,夹薄层砂岩,单砂体厚度一般在

沉积相		测井相特征	岩心相特征		岩性特征	地震相特征
相	亚相					
扇三角洲	扇三角洲平原	<p>L2-50 沉积微相 辫状水道 越岸沉积 辫状水道 越岸沉积 辫状水道</p>	<p>红色泥岩,越岸沉积, LBJ1-24, 3173.76 m</p>	<p>块状中细砾岩,辫状水道, L13-16, 3239.69 m</p>	<p>厚层块状中细砾岩与红色泥岩互层,河道一般自下而上表现为正韵律特征。</p>	<p>帚状前积反射</p>
	扇三角洲前缘	<p>L36 沉积微相 席状砂 支流间湾 水下分支河道 河口坝 支流间湾 水下分支河道 河口坝</p>	<p>杂色砂砾岩,砾石磨圆较好,水下分支河道, L27-2, 2940.66 m</p>	<p>交错层理细砂岩,河口坝, LBJ1-10, 3149.96 m</p>	<p>厚层块状砂砾岩、交错层理粗砂岩和泥岩互层,其中河口坝,一般表现为反韵律特征。</p>	<p>前积充填反射</p>
湖相	滨浅湖/半深湖	<p>L18-31 沉积微相 滨浅湖泥 滩坝 半深湖泥 湖底扇 湖底扇 半深湖泥</p>	<p>平行层理中细砂,滩坝, L10, 2957 m</p>	<p>灰色泥岩,半深湖泥, L160X1, 2581.2 m</p>	<p>滨浅湖泥岩中可见植物化石,滩坝砂岩主要为中细砂岩;半深湖主要为灰黑色泥岩夹薄层砂岩。</p>	<p>上部乱岗状反射(滨浅湖) 下部强振幅连续席状反射(半深湖)</p>

图 4 柳赞地区沙三段 0-III 油组沉积相划分方案及沉积相标志

Fig. 4 Sedimentary facies classification scheme and sedimentary facies marks of the 0-III oil-bearing formation of Es₃ in Liuzan area

1~5 m。泥岩颜色以灰色、灰黑色为主,反映深水还原环境;砂岩一般为滩坝砂,发育平行层理和斜层理(图4)。电测曲线上,滨浅湖沉积表现为平直曲线背景下的指状,漏斗状负异常组合(图4),一般与扇三角洲前缘伴生。地震剖面上,当滩坝较发育时表现为小型叠瓦前积的特征或同相轴错段不连续乱岗特征,当滩坝不发育时对应振幅较弱席状反射特征^[40],本地区主要以乱岗状丘形地震相为主(图4),反映沉积水动力较强,砂地比值在本区为0.2左右,反映滨浅湖、扇三角洲前缘远端分散水流的沉积环境。

(2) 半深湖沉积特征

半深湖(深湖)位于浪基面以下水体较为安静的部位,处于弱还原—还原环境,沉积物主要受湖流作用。本研究区半深湖分布范围有限,岩性主要为深灰、黑灰色泥岩、页岩及油页岩,偶夹薄层灰、泥灰岩和泥质粉砂岩(图4)。对应的,测井曲线上表现为平直偶见指状的特征,指状曲线主要为湖底扇砂岩沉积(图4)。在地震剖面上可以看到,半深湖主要对应强振、高连续、平行席状反射地震相(图4)。

4 层序结构及沉积充填特征

柳赞地区沙河街组是古近系多幕裂陷充填沉积,沙河街组沉积期主要对应于裂陷I幕~裂陷III幕(图1),其中沙三5亚段、4亚段沉积期对应于裂陷I幕,沙三3亚段到沙二段沉积期对应于裂陷II幕,沙一段对应于裂陷III幕。主力含油层0-III油组沉积主要受裂陷II幕的控制。在大多数裂陷盆地中,大的幕式构造运动控制高级次的沉积旋回,而次级的幕式构造运动控制次级层序单元的发育及层序格架内沉积体系的发育与演化^[24-25]。在本次研究中,沙三1—3亚段发育的两个三级层序SQ1和SQ2分别对应于裂陷II幕中的次级旋回沉积。

4.1 SQ1层序结构及沉积充填特征

SQ1层序沉积时期对应裂陷II幕的开始,该时期湖侵体系域(PSS1)沉积厚度较薄,整体以湖退体系域(PSS2-PSS4)沉积为主。在地震剖面上,SQ1从底部PSS1准层序组到顶部PSS4准层序组地震反射特征总体表现为振幅先减弱再增强的特征(图5);结合实钻岩性特征可以发现,振幅变化与岩性差异变化具有很好的一致性,随着湖平面的上升,岩性由富砂相转变为富泥相,在最大湖泛面附近存在全区稳定分布的泥岩层,随着后期湖平面的下降,岩性又变得以富砂相

为主(图5)。

SQ1层序底部湖侵体系域对应于PSS1准层序组,为一个退积式(正旋回)准层序组。在地震剖面上,PSS1准层序组表现为中振幅差连续性特征,早期以厚层湖相砂泥岩互层沉积为特征,晚期主体以泥岩沉积为主(图5)。

湖退体系域可以划分为3个准层序组(PSS2、PSS3和PSS4),分别对应IV油组、III油组和II油组。其中PSS2为一个进积式(反旋回)准层序组,在地震剖面上表现为弱振幅差连续性杂乱反射特征,由于PSS2准层序组紧挨最大湖泛面,因此仍以湖相厚层泥岩沉积为主(图5)。PSS3准层序组为SQ1湖退体系域的第2个准层序组,也是研究区目的层主要含油层之一。从测井曲线上可以看出PSS3整体表现为进积式(反旋回)准层序组的特征,为快速湖侵缓慢充填沉积(图3,图5)。相比于PSS2,PSS3准层序组在地震剖面上同相轴振幅增强,连续性也变好;结合岩性曲线特征可以看出该层段主要为砂泥岩互层沉积,曲线表现为齿化钟形、漏斗形和平直曲线的组合,解释为扇三角洲前缘或者滨浅湖相沉积(图5,图6a)。平面上,该沉积时期水体相对较深,北东和正东两个方向的物源体系自柏各庄凸起和马头营凸起进入湖盆,依次形成扇三角洲平原、扇三角洲前缘、滨浅湖和半深湖沉积,砂地比分布范围为0.1~0.5(图6a)。受物源体系注入方向、注入量及断层分段差异活动的影响,PSS3准层序组沉积期柳赞地区不同井区平面上发育的沉积相差异较大。L2井区紧邻柏各庄断层且位于主物源注入方向上,以扇三角洲平原亚相沉积为主;而L90井区只在井区东部发育部分扇三角洲平原亚相,往西北方向,由于柏各庄断层活动性增强^[41],下降盘沉降幅度增大(图7),因此,逐渐过渡为扇三角洲前缘、滨浅湖、半深湖沉积。L1和L10井区分别位于L2和L90井区的前端,主要为扇三角洲前缘和滨浅湖沉积,L16井区位于构造低部位,主要为滨浅湖、半深湖沉积,发育少量前缘沉积(图6a)。从沉积相的时空演化上可以看出,PSS3准层序组沉积期早期断裂的差异活动形成了东高西低的构造地貌特征,后期沉积物大量注入,形成补偿沉积,沉积了湖退进积型三角洲(图5,图6a)。PSS4准层序组是SQ1湖退体系域的第3个进积式(反旋回)准层序组,在地震剖面上表现为强振幅中连续性的特征。结合岩性曲线可以发现,PSS4准层序组砂质含量明显增加,砂地比数值范围变化为0.2~0.6,曲线呈现微齿箱状与平直曲线的组合特征,解释为扇三角洲平原或扇三角洲前缘沉积(图5,图

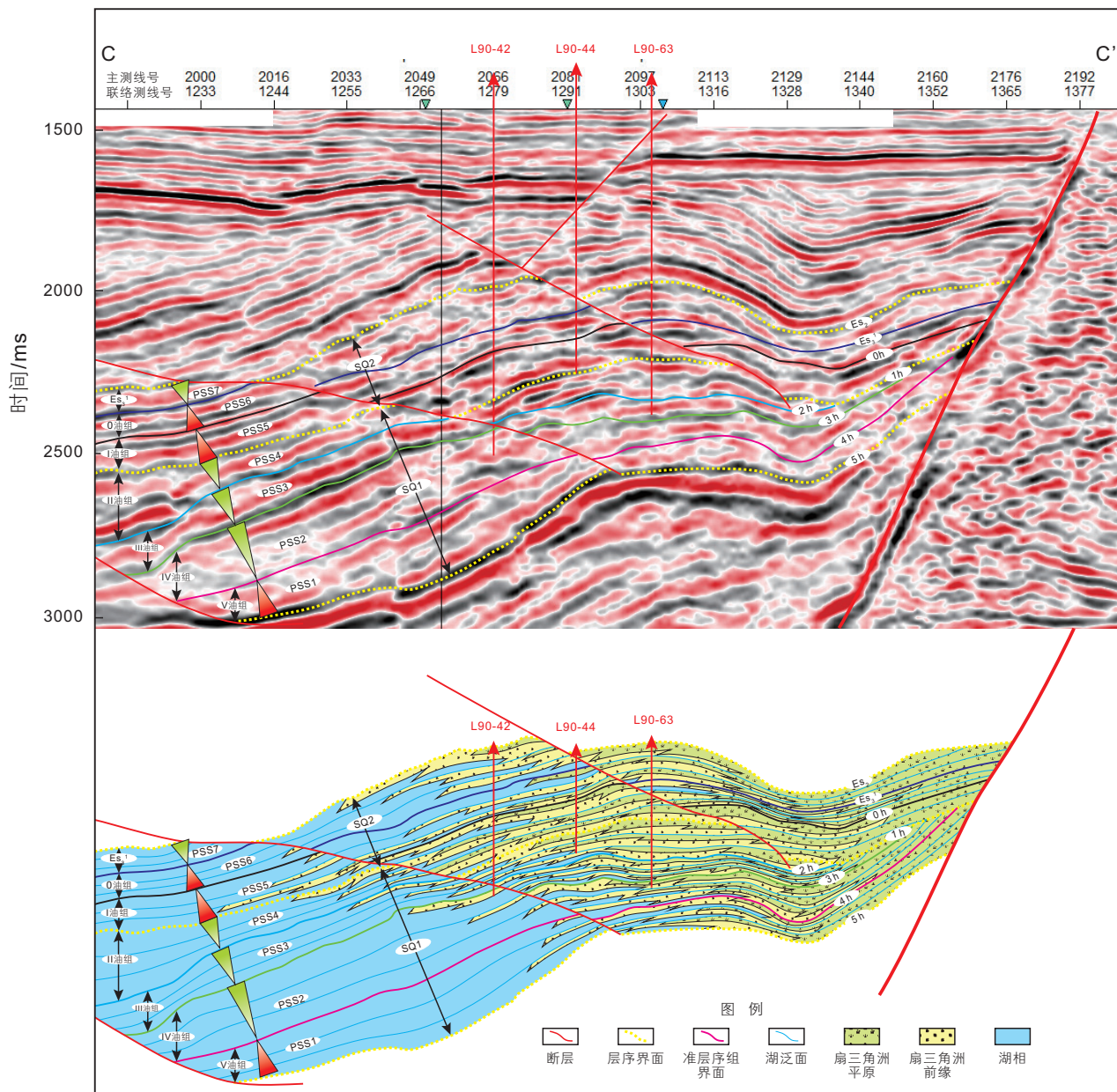


图 5 过 L90-42—L90-44—L90-63 井连井沉积相剖面图(剖面位置见图 1 CC')

Fig. 5 Sedimentary facies profile of well L90-42, L90-44 and L90-63 (the section position is shown in Fig. 1 CC')

6b)。平面上，物源体系相对上一沉积期具有继承性，依旧为北东和正东方向(图 6b)，但边界断层活动性及分段差异性减弱(图 7)，使得可容空间减小，沉积古地貌差异变小，研究区整体表现为滨浅湖背景下的扇三角洲沉积。随着物源体系的不断向前推进，扇三角洲前缘主体已覆盖至 L1、L10 和 L16 井区，L2 井区仍以扇三角洲平原沉积为主，L90 井区发育扇三角洲平原、前缘和滨浅湖沉积，半深湖不发育。根据沉积相的分布特征可以看出，PSS4 沉积时期，构造相对较为稳定，物源体系不断推进，整体相对 PSS3 发生进一步充填沉积(图 5，图 6b)。

4.2 SQ2 层序结构及沉积充填特征

SQ2 层序沉积期对应裂陷 II 幕内部第二期次级旋回沉积，相比于 SQ1，SQ2 沉积期盆地沉降速率变缓(图 1c)，边界断层横向活动总体较为均衡(图 7)，导致平面上沉积环境变化不大。该层序湖侵体系域(PSS5、PSS6)相对较厚，地震剖面上显示同相轴振幅由强变弱的特征，测井岩性曲线垂向上平直段增多，岩性由砂泥岩互层转变为富泥相(图 5)；湖退体系域(PSS7)地震振幅又变强，随着湖平面的下降，砂岩含量相对升高(图 5)。

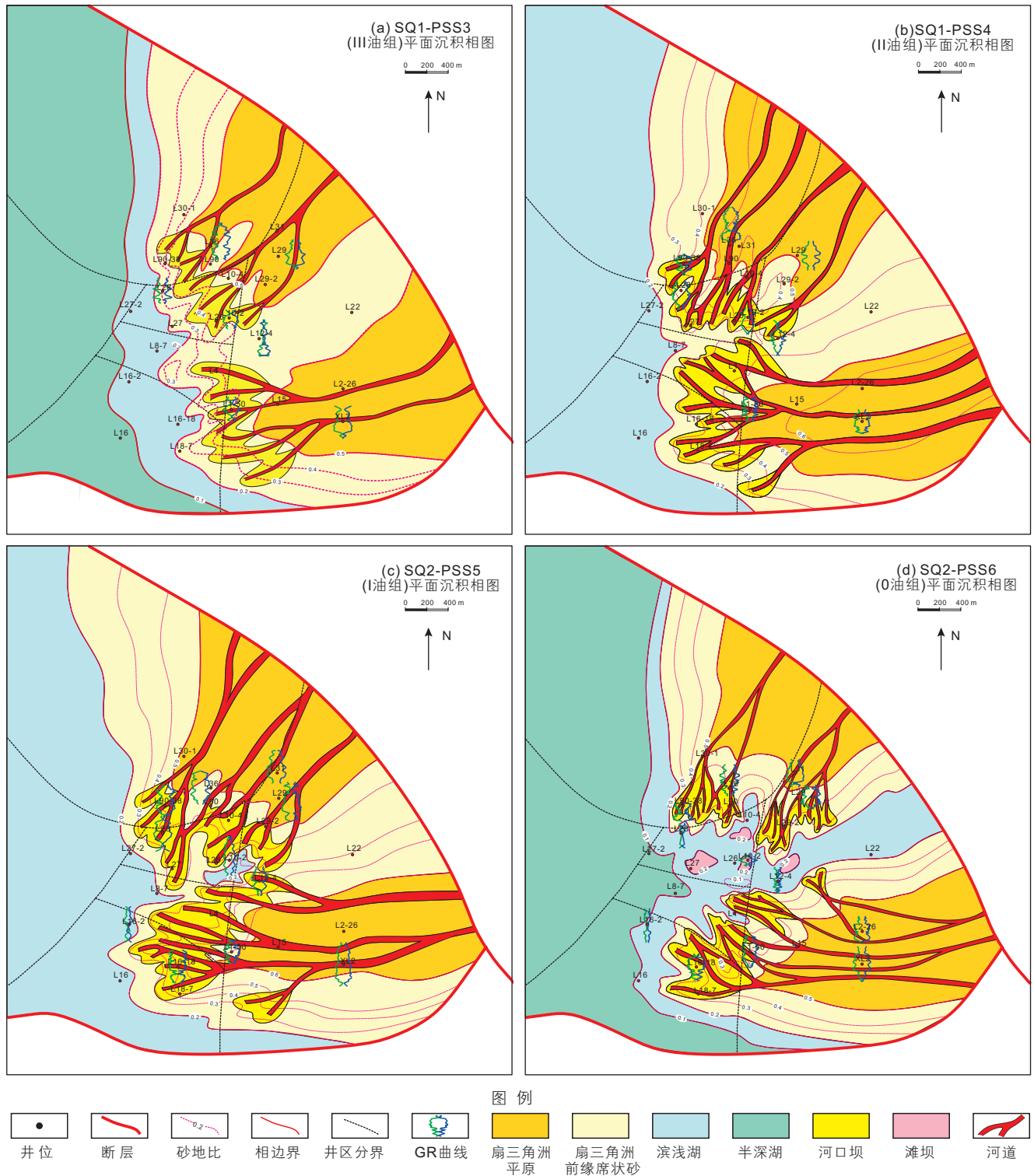


图6 柳赞地区沙三段0-III油组砂地比及沉积相平面展布图

Fig. 6 Sand to ground ratio and the distribution of depositional facies of the 0-III oil-bearing formation of Es₃ in Liuzan area

PSS5是SQ2湖侵体系域的第1个准层序组,整体表现为退积的特征。地震剖面上,PSS5准层序组表现为同相轴振幅较强,连续性中等一差的特征,说明沉积期水体相对较浅,水动力较强,结合测井曲

线可以看出该层段主要为微齿箱状与平直曲线的组合特征,解释为扇三角洲平原和扇三角洲前缘沉积(图5,图6c)。平面上,物源注入方向继承性发育,砂地比变化范围为0.2—0.6(图6c)。L90和L10井区主

要发育扇三角洲平原和前缘沉积,且以前缘沉积为主;L2井区以扇三角洲平原沉积为主,L1和L16井区变化为扇三角洲前缘沉积。从沉积相平面展布特征可以看出,PSS5沉积期,虽然发生了构造沉降,但物源供给充足,沉积水体仍较浅,整体表现为平原、前缘均较发育的特征(图6c)。PSS6是SQ2湖侵体系域的第2个准层序组,该准层序组仍为一个退积式准层序组,地震上整体表现为弱振幅的特征,测井曲线表现为齿化钟形、漏斗形和平直曲线的组合特征,说明PSS6沉积期主要为扇三角洲前缘和滨浅湖的富泥相沉积(图5,图6d)。平面上,该时期物源依旧为东北和正东向,湖盆范围逐渐扩大,砂地比变化范围变小,为0.1~0.5(图6d)。L90井区仅在东部发育部分扇三角洲平原和前缘亚相,往西和往L10井区迅速过渡为滨浅湖和半深湖沉积。L2井区由于柏各庄断层ef段活动性增强^[41](图1、图7),导致在部分位置开始出现滨浅湖沉积,但主体仍为扇三角洲平原和前缘亚相,向L1和L16井区过渡为前缘一半深湖沉积。根据沉积相的分布特征可以看出,PSS6沉积期发生了明显的湖侵,扇三角洲沉积明显后退,范围变小(图5,图6d)。

PSS7是SQ2的湖退体系域,该体系域对应为一个进积式准层序组,地震显示振幅中等-强的特征;测井曲线特征显示,相对湖侵体系域PSS6,砂岩含量明显升高。沉积解释主要为扇三角洲前缘沉积,说明发生了湖退作用,形成扇三角洲充填沉积(图5)。

5 沉积充填模式

研究区沙河街组为断陷湖盆裂陷期沉积,该时期盆地构造活动强烈,是沉积层序发育的主控因素,形成的层序称为构造层序^[42-44]。根据一个完整层序旋回中构造活动的强弱,可将其内部划分为不同的体系域,将构造活动较强时期形成的体系域称为构造活跃期体系域,构造活动相对较弱时期形成体系域称为构造宁静期体系域^[45]。在本次研究中,沙三1~3亚段发育的两个三级层序SQ1和SQ2形成于断陷盆地的裂陷II幕,是典型的构造层序。SQ1和SQ2的湖侵体系域主要形成于断裂强烈活动期,表现为可容空间迅速增大,湖侵退积的特征,为典型的构造活跃期体系域;而湖退体系域沉积期虽然仍发生构造沉降,但强度明显变小,沉积体不断向湖盆中心推进充填沉积,为典型的构造宁静期体系域。对于目的层主力含油层系0-III油组而言,III油组(PSS3准层序组)和II油组(PSS4准层序组)整体表现为构造宁静期扇三角洲进积充填沉积,而I油组(PSS5准层序组)和0油组(PSS6准层序组)表现为构造活跃期扇三角洲湖侵退积沉积。

5.1 构造宁静期体系域沉积充填模式

在本次研究中,PSS3和PSS4两个准层序组沉积期,研究区的构造活动在整个SQ1层序旋回中相对较弱,且整体趋于稳定(图7),物源供给大于湖盆构造沉降速率,所以整体表现为逐渐进积充填的沉积特征。

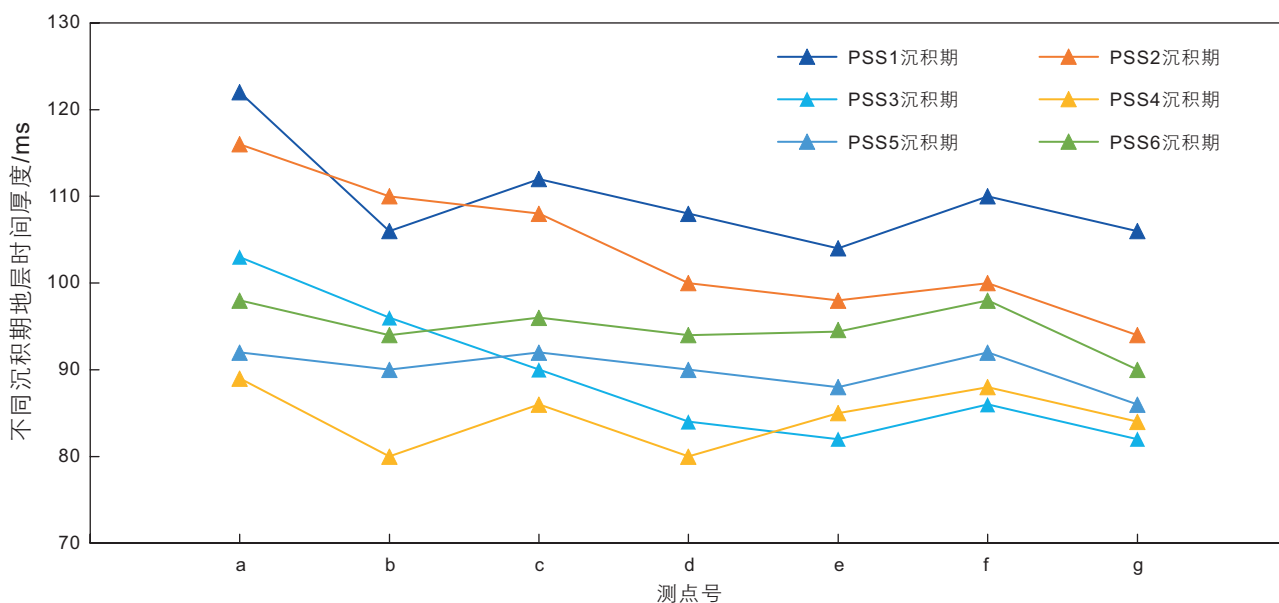


图7 柳赞地区沙三段不同沉积期断层活动性图

Fig. 7 Fault activity in different depositional period of Es₃ in Liuzan Area

对于两个准层序组而言,分别又表现为两期快速湖侵-缓慢沉积充填的过程。PSS3 准层序组沉积期,受同期断层差异活动的影响,导致沉积古地貌整体而言呈现东高西低的特征,水体相对较深,研究区主体表现为滨浅湖背景下的扇三角洲沉积,且呈现小平原大前缘的特征。到PSS4 准层序组沉积期,断层活动性减弱且差异性变小(图7),可容空间与沉积物供给之比进一步减小,水体逐渐变浅,沉积体系继续向前推进,研究区主体表现为平原、前缘均较发育的特征。总体而言,构造宁静期体系域沉积时,可容空间逐渐减少,水体逐渐变浅,扇三角洲沉积逐渐向湖心推进(图8)。

5.2 构造活跃期体系域沉积充填模式

PSS5 和PSS6 两个准层序组沉积期,研究区整体进入下一次级幕式沉积,构造活动相比于SQ1 层序旋回有所减弱,但其内部仍表现为逐渐增强的特征(图7)。PSS5 准层序组沉积期,断层活动性在整个SQ2 层序旋回中相对较弱,且整体趋于稳定,构造沉降导致的可容空间增量相对较少且沉积物供给充足,导致该沉积期水体仍较浅,沉积体系推进较远,研究区主体表现为扇三角洲平原、前缘均较发育的特征。PSS6 准层序组沉积期,断层活动性相比于PSS5 沉积期进一

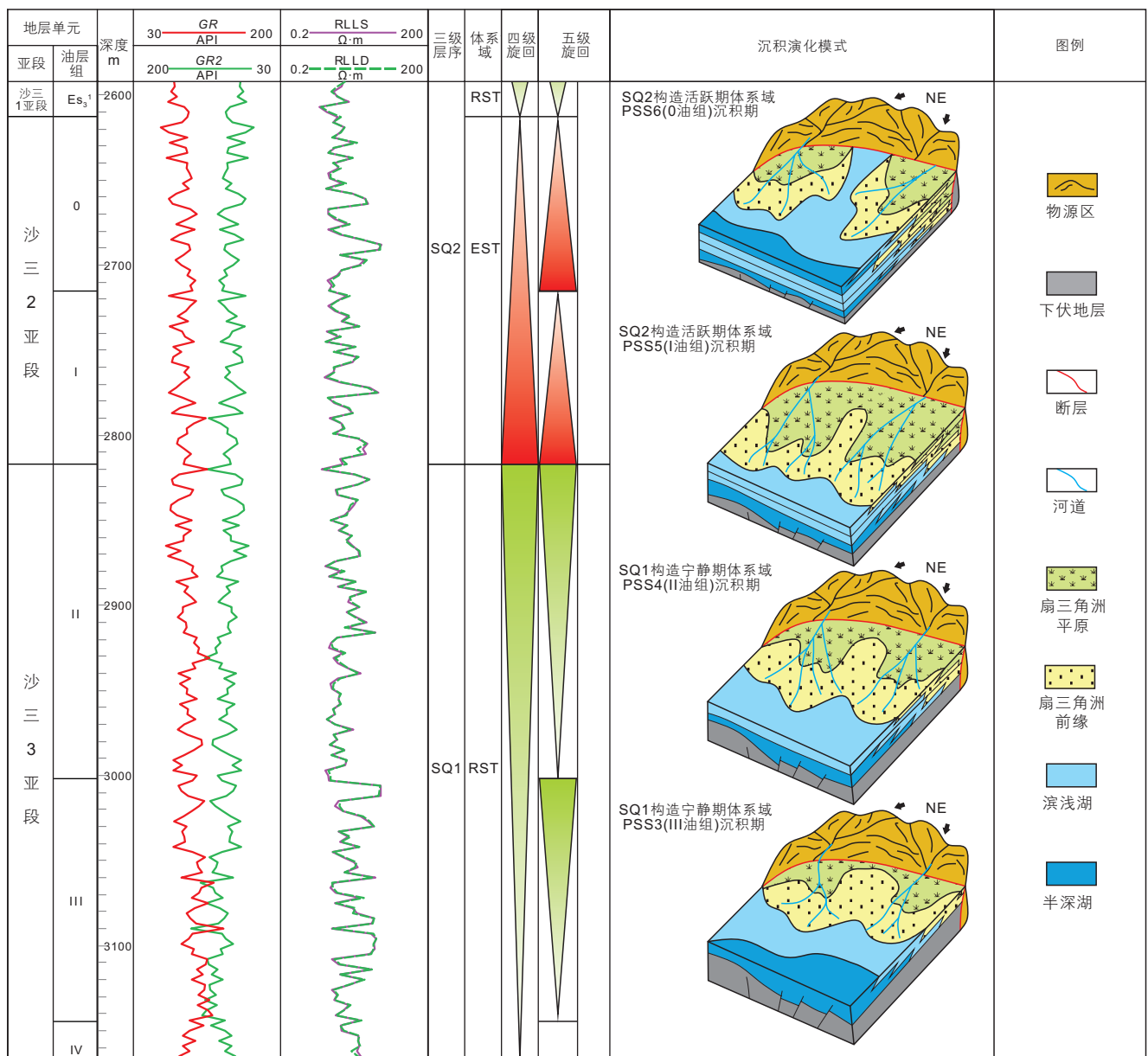


图8 柳赞地区沙三段0~III油组层序地层及沉积演化模式

Fig. 8 Sequence stratigraphy and sedimentary evolution model of the 0~III oil-bearing formation of Es₃ in Liuzan Area

步增强(图 7), 研究区可容空间与沉积物供给量之比进一步增大, 导致水体快速上升, 扇三角洲快速退积, 在研究区主体表现为滨浅湖背景下的扇三角洲沉积。此外, 柏各庄断层东段相比西段而言活动性有所增强, 使北东和东部两个物源体系形成的扇三角洲被滨浅湖给分隔开。总体而言, 构造活跃期体系域沉积时, 构造活动逐渐增强, 可容空间与沉积物供给之比逐渐增大, 水体逐渐加深, 扇三角洲沉积体系表现为逐渐后撤沉积的特征(图 8)。

6 油气勘探开发意义

在层序地层演化过程中, 一般在层序边界附近湖平面相对较浅, 砂岩最为发育。对应到研究区目的层可以看到, 在SQ1 层序的构造宁静期体系域中晚期(III 油组和II 油组沉积期)以及SQ2 层序的构造活跃期体系域早期(I 油组沉积期), 可容空间与沉积物供给之比较小, 沉积物相对供给速率高, 扇三角洲推进远, 且前缘有利储层砂体最为发育(图 6)。同时, SQ2 层序构造活跃期体系域末期(0 油组沉积期), 可容空间与沉积物供给量之比最大, 湖平面上升到最高, 形成的湖相泥岩在该区形成很好的盖层, 从而使得I、II 和III 油组砂岩储层与上覆 0 油组盖层形成很好的储盖组合(图 5), 因此I、II 和III 油组成为该区油气开发主力层系。

三级层序内幕层序地层格架可以更好的约束准层序及更小尺度层序地层单元的划分与对比, 以此作为格架约束下的砂体、油水分布特征也更加的合理(图 9)。以主力含油区块L90 井区主力含油层系PSS5 准层序组(I 油组)为例, 在层序、准层序组层序地层格架的约束下, PSS5 可以进一步划分为 5 个准层序(PSS5-1~PSS5-5), 对应于 5 个砂层组(I1~I5), 砂层组内部根据测井曲线的旋回特征可进一步细分单层。对于每一个准层序而言, 其均表现为快速湖侵缓慢充填的沉积过程, 因此在准层序沉积末期砂体最为发育(图 9)。多个准层序(PSS5-1~PSS5-5)共同构成了一个退积式的准层序组 PSS5, 在 PSS5-1~PSS5-3 准层序沉积期, 由于湖平面相对较浅, 因而其内部发育的砂体规模和厚度均较大; 随着湖平面的上升, PSS5-4、PSS5-5 沉积期砂体规模明显变小。断-砂的有利配置是油气成藏的关键^[46], 根据现今的油藏剖面特征可以发现(图 9), 研究区油层的发育特征与砂体发育特征相似。PSS5 准层序组总体上呈现“下油上水”的特征, 准层序组沉积早期的厚层砂体与断层配置关系好, 有利于成藏, 随着砂体规模的变小, 断砂配置关系变差, 油层逐渐不发育; 而对于每个准层序而言, 油层又主要发育在准层序的顶部。L90 井区的实例分析表明: 研究区主力含油层系层序地层及沉积特征的研究, 可以指导精细砂体及油藏分布研究, 为解决油水矛盾、寻找有利砂体发育区提供新的帮助。

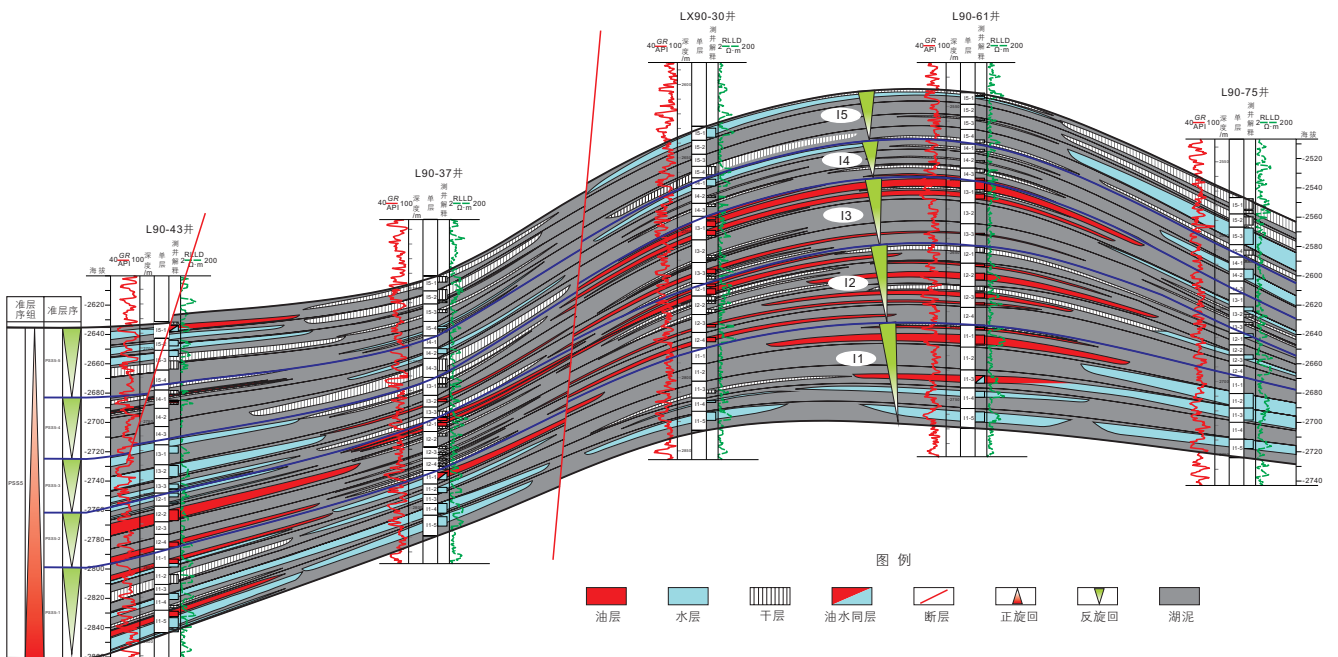


图 9 L90 井区 I 油组过 L90-43 井—LX90-30 井—L90-75 井油藏剖面
 Fig. 9 Reservoir profile of I oil-bearing formation of well L90-43, LX90-30 and L90-75 in L90 well block

7 结论

通过本次研究重新梳理、认识了柳赞地区沙三段1-3亚段层序地层格架及其沉积演化特征,重点解剖、揭示了主力含油层系0-III油组的层序结构及沉积充填模式,主要取得以下几点认识:

(1)以层序界面及不同级次湖泛界面为控制,柳赞地区沙三1-3亚段整体可划分为2个三级层序(SQ1和SQ2),4个体系域和7个准层序组(PSS1~PSS7),其中主力含油层系III油组和II油组为三级层序SQ1湖退体系域中的两个进积式准层序组(PSS3和PSS4),I油组和0油组为三级层序SQ2湖侵体系域中的两个退积式准层序组(PSS5和PSS6)。

(2)研究区沙三1-3亚段沉积期,主要发育扇三角洲平原、前缘、滨浅湖和半深湖沉积,边界断层的横向活动性差异导致了相同沉积期沉积环境的横向差异

变化。PSS3准层序组沉积期,研究区主体为滨浅湖背景下的补偿型扇三角洲沉积,呈现小平原大前缘的特征;PSS4准层序组沉积期,水体继续变浅,表现为扇三角洲平原、前缘均衡发育的特征;PSS5和PSS6准层序组沉积期进入下一期幕式旋回沉积,早期研究区主体仍以扇三角洲平原、前缘均衡发育为特征,晚期随着水体逐渐加深,扇三角洲沉积体系逐渐后撤,主体以滨浅湖、半深湖沉积为主。

(3)根据研究区目标层序单元沉积期构造活动的强弱,可将其进一步划分为构造宁静期湖退体系域和构造活跃期湖侵体系域。构造宁静期体系域中晚期(III油组和II油组)和构造活跃期体系域早期(I油组)易发育厚层有利储集砂体,与上覆构造活跃期末期湖侵泥岩(0油组)可形成有利储盖组合。

(4)三级层序内部层序地层格架及沉积体系的细化研究有利于深化认识砂体、流体的分布特征,解决开发矛盾,指导油藏的开发调整。

参考文献

- [1] 陶士振,袁选俊,侯连华,等.中国岩性油气藏区带类型、地质特征与勘探领域[J].石油勘探与开发,2016,43(006):863-872.[TAO S Z, YUAN X J, HOU L H, et al. Play types, geologic characteristics and exploration domains of lithological reservoirs in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(006): 863-872.]
- [2] 于翠玲,李宝刚.渤海湾盆地东营凹陷牛庄洼陷岩性油气藏平面富集主控因素[J].吉林大学学报(地球科学版),2019,49(01):240-247.[YU C L, LI B G. Main factors controlling planar enrichment of lithologic reservoirs in Niuzhuang Sub-Sag, Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(01): 240-247.]
- [3] 郝芳,邹华耀,方勇.隐蔽油气藏研究的难点和前沿[J].地学前缘,2005,12(04):481-488.[HAO F, ZOU H Y, FANG Y. The difficulties and frontiers of subtle oil/gas reservoir research[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(04): 481-488.]
- [4] 金凤鸣,侯凤香,焦双志,等.断陷盆地断层-岩性油气藏成藏主控因素——以饶阳凹陷留107区块为例[J].石油学报,2016,37(08):986-995.[JIN F M, HOU F X, JIAO S Z, et al. Major controlling factors of fault-lithologic reservoir accumulation in rifted basin: a case study of Liu 107 block, Raoyang sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(08): 986-995.]
- [5] PROSSER S. Rift-related linked depositional systems and their seismic expression [J]. Geological Society London Special Publications, 1993, 71(1): 35-66.
- [6] RAVN Å R, STEEL R J. Architecture of marine rift-basin successions[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(1): 110-146.
- [7] VAIL PR A F. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology: Cycles and events in stratigraphy[J]. AAPG Bulletin, 1991, 11(3): 617.
- [8] LIN C S, ERIKOSON K, LI S T. Sequence architecture, depositional systems and their controls of lacustrine sequence of the Erlan Basin[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(11): 2017-2043.
- [9] VAIL P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy. Part 1: Seismic sequence stratigraphy interpretation procedure[J]. AAPG Studies in Geology, 1987, 27(1): 1-10.
- [10] CROSS T A. High-resolution stratigraphic correlation from the perspective of base level cycles and sediment accommodation[J]. Proceedings of Northwestern Europe Sequence Stratigraphy Congress, 1994, 43(6): 105-123.
- [11] 顾家裕,陆相盆地层序地层学格架概念及模式[J].石油勘探与开发,1995,022(004):6-10.[GU J Y. Framework concepts and models of sequence stratigraphy in non-marine petroliferous basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 022(004): 6-10.]
- [12] 操应长,姜在兴,夏斌,等.陆相断陷湖盆T-R层序的特点及其控制因素——以东营凹陷古近系沙河街组三段层序地层为例[J].地质科学,2004,39(1):111-122.[CAO Y C, JIANG Z X, XIA B, et al. Characters and controlling factors of T-R sequence in lacustrine deposits of rift basin: An example from the Dongying Depression, Eastern China[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1): 111-122.]
- [13] 纪友亮,张善文,王永诗,等.断陷盆地油气汇聚体系与层序地层格架之间的关系研究[J].沉积学报,2008,26(4):617-623.[JI

- Y L, ZHANG S W, WANG Y S, et al. The relationship between the scales of petroleum collective system and the scales of sequence boundary[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(4): 617–623.]
- [14] 冯有良, 鲁卫华, 门相勇. 辽河西部凹陷古近系层序地层与地层岩性油气藏预测[J]. *沉积学报*, 2009, 27(01): 57–63. [FENG Y L, LU W H, MEN X Y. Eocene sequence stratigraphy and stratigraphic and lithologic reservoirs prediction in Liaohe West Depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(01): 57–63.]
- [15] 刘鹏, 张立强, 黄志佳, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷馆陶组层序地层格架及有利区带预测[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(02): 17–24. [LIU P, ZHANG L Q, HUANG Z J, et al. Sequence stratigraphic framework and favorable zone prediction in Guantao Formation of Raoyang sag, Bohai Bay Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2014, 38(02): 17–24.]
- [16] 彭丽, 伍轶鸣, 练章贵, 等. 陆相断陷湖盆高频层序特征及其沉积演化——以渤海湾盆地济阳坳陷沙三下亚段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(04): 789–798. [PENG L, WU Y M, LIAN Z G, et al. Features and sedimentary evolution of high-frequency sequence in continental lacustrine rift basin: Example of the lower Shahejie member 3 in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(04): 789–798.]
- [17] FENG Y, JIANG S, HU S. Sequence stratigraphy and importance of syndepositional structural slope-break for architecture of Paleogene syn-rift lacustrine strata, Bohai Bay Basin, E. China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 69: 183–204.
- [18] ZHOU Y, JI Y, PIGOTT J D. Tectono-stratigraphy of Lower Cretaceous Tanan sub-basin, Tamtsag Basin, Mongolia: Sequence architecture, depositional systems and controls on sediment infill[J]. *Marine and petroleum geology*, 2014, 49: 176–202.
- [19] 杨延强, 吴胜和, 陡坡型扇三角洲上一类特殊类型河口坝的研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(01): 97–103. [YANG Y Q, WU S H. Study of a unique type of mouth bar deposition in steep slope-type fan deltas[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(1): 97–103.]
- [20] 穆立华, 彭仕必, 尹志军, 等. 冀东柳赞油田古近系沙河街组层序地层及岩相古地理[J]. *古地理学报*, 2003, 5(003): 304–315. [MU L H, PENG S M, YIN Z J, et al. Sequence stratigraphy and lithofacies Palaeogeography of the Shahejie Formation of Paleogene in Liuzan Oilfield, Eastern Hebei Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2003, 5(003): 304–315.]
- [21] 刘欣, 刘震, 卢朝进, 等. 南堡凹陷柳赞地区沙河街组三段中上部物源演化及砂体分布控制因素[J]. *石油学报*, 2017, 38(08): 888–901. [LIU X, LIU Z, LU C J, et al. Evolution of sedimentary source and controlling factors of sandstone body distribution in the middle-upper part of the third Member of Shahejie Formation in Liuzan area, Nanpu depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(08): 888–901.]
- [22] 刘可行, 甘华军, 陈思, 等. 南堡凹陷高北地区“异迁移”型层序构型成因及其对沉积的意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(10): 3603–3617. [LIU K X, GAN H J, CHEN S, et al. Genetic mechanism of allogenic migrated sequence stratigraphic architecture in the Gaobei Area of Nanpu Sag and its significance for sedimentation[J]. *Earth Sciences*, 2020, 45(10): 3603–3617.]
- [23] 管红, 朱筱敏. 南堡凹陷东营组层序地层格架与沉积体系[J]. *沉积学报*, 2008, 05: 730–736. [GUAN H, ZHU X M. Sequence framework and sedimentary facies of Ed Formation in Paleogene, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 05: 730–736.]
- [24] 顾家裕, 郭彬程, 张兴阳. 中国陆相盆地层序地层格架及模式[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(5): 11–15. [GU J Y, GUO B C, ZHANG X Y. Sequence stratigraphic framework and model of the continental basins in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(5): 11–15.]
- [25] 林畅松, 刘景彦, 张英志, 等. 构造活动盆地的层序地层与构造地层分析——以中国中、新生代构造活动湖盆分析为例[J]. *地学前缘*, 2005, 12(4): 365–374. [LIN C S, LIU J Y, ZHANG Y Z, et al. Sequence stratigraphy and tectono-stratigraphic analysis of tectonically active basins: A case study on the Cenozoic-Mesozoic lacustrine basins in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(4): 365–374.]
- [26] 王华, 姜华, 林正良, 等. 南堡凹陷东营组同沉积构造活动性与沉积格局的配置关系研究[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(1): 70–77. [WANG H, JIANG H, LIN Z L, et al. Relations between synsedimentary tectonic activity and sedimentary framework of Dongying Formation in Nanpu Sag[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(1): 70–77.]
- [27] 杨延强, 吴胜和, 齐立新, 等. 南堡凹陷柳赞油田沙三~3亚段扇三角洲相构型研究[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 29(05): 21–30+5. [YANG Y Q, WU S H, QI L X, et al. Study on microfacies architecture of fan delta in Es₃³ reservoir of Liuzan Oilfield, Nanpu Sag[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2014, 29(05): 21–30+5.]
- [28] 史冠中, 王华, 徐备, 等. 南堡凹陷柏各庄断层活动特征及对沉积的控制[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(01): 85–90. [SHI G Z, WANG H, XU B, et al. Activity of Baigezhuang Fault of Nanpu Depression and its controlling on sedimentation[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(01): 85–90.]
- [29] 范雪松. 南堡凹陷高柳地区沙三段构造特征及其对沉积与成藏的控制[D]. 中国地质大学(北京), 2015. [FAN X S. Tectonic characteristics of the third number of Shahejie Formation and tectonic effects on sedimentary system and reservoir forming in Gaoliu region of Nanpu Sag[D]. *China University of Geosciences (Beijing)*, 2015.]
- [30] 朱红涛, 刘可禹, 朱筱敏, 等. 陆相盆地层序构型多元化体系[J]. *地球科学*, 2018, 43(3): 770–785. [ZHU H T, LIU K Y, ZHU X M,

- et al. Varieties of sequence stratigraphic configurations in continental basins[J]. *Earth Science*, 2018, 43(3): 770–785.]
- [31] 张锐, 纪友亮, 岳文珍, 等. 陡坡带扇三角洲高分辨率层序地层学——以柳赞油田北区沙三~3 亚段下部砂层组为例[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(15): 3587–3590. [ZHANG R, JI Y L, YUE W Z, et al. High-resolution sequence stratigraphy for fan delta at steep slope belt: Taking the lower sand groups of the third-submember sedimentation of Member III of Shahejie Formation in the North Region of Liuzan Oilfield as an example[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(15): 3587–3590.]
- [32] 李丕龙. 陆相断陷盆地油气地质与勘探: 卷五陆相断陷盆地层序地层学应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003. [LI P L. *Petroleum geology and exploration in continental faulted basins: Volume V application of sequence stratigraphy in continental faulted basins*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.]
- [33] 薛良清, GALLOWAY W E. 扇三角洲、辫状河三角洲与三角洲体系的分类[J]. *地质学报*, 1991, 065(002): 141–153. [XUE L Q, GALLOWAY W E. Classification of fan delta, braided river delta and delta system[J]. *Acta Geology*, 1991, 065(002): 141–153.]
- [34] 林畅松, 郑和荣, 任建业, 等. 渤海湾盆地东营、沾化凹陷早第三纪同沉积断裂作用对沉积充填的控制[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2003, 11: 1025–1036. [LIN C S, ZHENG H R, REN J Y, et al. The control of syndepositional faulting on the Eogene sedimentary basin fills of the Dongying and Zhanhua sags, Bohai Bay Basin[J]. *Science in China, (Series D)*, 2003, 11: 1025–1036.]
- [35] MCPHERSON J G, SHANMUGAM G, MOIOLA R J. Fan-deltas and braid deltas: Varieties of coarse-grained deltas[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1987, 99(3): 331–340.
- [36] HOU Y, HE S, WANG B. Tectono-sequence stratigraphic analysis on Paleogene Shahejie Formation in the Banqiao sub-basin, Eastern China[J]. *Marine and petroleum geology*, 2012, 36(1): 100–117.
- [37] WU D, ZHU X, SU Y. Tectono-sequence stratigraphic analysis of the lower cretaceous Abu Gabra formation in the fula sub-basin, Muglad basin, southern Sudan[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 67: 286–306.
- [38] JIA L, ZHONG D, JI Y. Architecture of tectonic sequences, depositional systems, and tectonic controls of the sedimentary fills of the rift - related Wenchang Formation in the Lufeng Depression, Pearl River Mouth Basin, China[J]. *Geological Journal*, 2019, 54(4): 1950–1975.
- [39] 何起祥, 刘招君, 王东坡, 等. 湖泊相浊积岩的主要特征及其地质意义[J]. *沉积学报*, 1984, 04: 33–46+132–133. [HE Q X, LIU Z J, WANG D P, et al. The main characteristics of lacustrine turbidite and its geological significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1984, 04: 33–46+132–133.]
- [40] SAKELLARIOU D, LYKOUSIS V, ALEXANDRI S. Faulting, seismic stratigraphic architecture and Late Quaternary evolution of the Gulf of Alkyonides Basin—East Gulf of Corinth, Central Greece[J]. *Basin Research*, 2007, 19(2): 273–295.
- [41] 康海涛, 王宏语, 樊太亮, 等. 南堡凹陷高柳地区沙三段构造—层序地层特征[J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(06): 30–37+47. [KANG H T, WANG H Y, FAN T L, et al. Structure-sequence stratigraphic characteristics of the third member of Shahejie Formation in Gaoliu area, Nanpu Sag[J]. *Lithologic Hydrocarbon Reservoir*, 2015, 27(06): 30–37, 47.]
- [42] 冯有良, 李思田, 解习农. 陆相断陷盆地层序形成动力学及层序地层模式[J]. *地学前缘*, 2000, 03: 119–132. [FENG Y L, LI S T, XIE X N. Dynamics of sequence generation and sequence stratigraphic model in continental rift-subsidence basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 03: 119–132.]
- [43] 解习农, 任建业, 焦养泉, 等. 断陷盆地构造作用与层序样式[J]. *地质论评*, 1996, 03: 239–244. [XIE X N, REN J Y, JIAO Y Q, et al. Tectonism and sequence patterns of down-faulted basins[J]. *Geological Review*, 1996, 03: 239–244.]
- [44] 冯有良, 周海民, 任建业, 等. 渤海湾盆地东部古近系层序地层及其对构造活动的响应[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(10): 1356–1376. [FENG Y L, ZHOU H M, REN J Y, et al. Sequence stratigraphy of the paleogene in the eastern Bohai Bay Basin and its response to tectonic activities[J]. *Science in China: Earth Science*, 2010, 40(10): 1356–1376.]
- [45] 刘君龙, 纪友亮, 杨克明. 川西须家河组前陆盆地构造层序及沉积充填响应特征[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(06): 11–23. [LIU J L, JI Y L, YANG K M. Tectonic sequence and sedimentary filling response characteristics of the foreland basin of Xujiahe Formation in western Sichuan[J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 2015, 39(06): 11–23.]
- [46] 付广, 陈雪晴. 断裂封闭能力有效性和时间有效性研究方法及其应用[J]. *石油科学通报*, 2016, 1(02): 183–190. [FU G, CHEN X Q. A study of fault sealing effectiveness and timeliness and its applications[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2016, 1(02): 183–190.]

(责任编辑 姜福杰 编辑 付娟娟)