

陆相断陷湖盆层序构成样式及砂体预测模式 ——以南堡凹陷东营组为例

董月霞¹, 王建伟², 刁帆², 赵忠新², 杜景霞², 孟令箭²,

(1. 中国石油冀东油田分公司, 河北唐山 063004; 2. 中国石油冀东油田勘探开发研究院, 河北唐山 063004)

摘要:以渤海湾盆地南堡凹陷东营组为例,通过不同构造带的层序构成样式分析,阐明了陆相断陷湖盆的层序构成样式对砂体分布的控制作用,为陆相断陷湖盆砂体分布预测提供了理论依据。通过南堡凹陷东营组沉积充填时不同构造背景下形成的层序样式及其对储集砂体控制作用的分析,归纳出两种构造背景下的4种层序构成样式,即在北部断坡带构造背景下发育的多断坡带型、单断坡带型和转换带型以及在南部滩海地区斜坡带构造背景下发育的缓坡坡折型。在此基础上,建立砂体预测模式指导储层预测,对确定优质储集体的分布具有指导意义。

关键词:坡折带;层序构成样式;砂体预测模式;地层-岩性油气藏;南堡凹陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Sequence stratigraphic patterns and sand body prediction models of fault-depressed lacustrine basins: a case study from the Dongying Formation in the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

Dong Yuexia¹, Zhao Zhongxin², Wang Jianwei², Du Jingxia², Meng Lingjian², Diao Fan²

(1. Jidong Oil Company, PetroChina, Tangshan, Hebei 063004, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan, Hebei 063004, China)

Abstract: Through analysis of sequence stratigraphic patterns in different structural belts, this paper illustrates the control of sequence stratigraphic pattern on sandbody distribution, and provides theoretical evidences for the sandbody prediction in fault-depressed lacustrine basin. Four sequence stratigraphic patterns in two different structural settings are identified based on the analysis of the sequence stratigraphic pattern and its control on reservoir sandbody in different structural settings of Dongying sedimentary period. They include the multiple faulted-slope-zone pattern, single faulted-slope zone pattern and transform zone pattern in the northern fault-break zone setting and the gentle slope-break pattern in the slope structure setting in southern beach area. On this basis, a sandbody prediction model was established to guide reservoir prediction which is of great significance for determining the distribution of favorable reservoir.

Key words: slope-break belt, sequence stratigraphic pattern, sand body prediction model, stratigraphic-lithologic reservoir; Nanpu Sag

随着含油气盆地勘探开发的不断深入,地层-岩性油气藏逐渐成为主要的勘探领域,应用储层预测方法识别地层-岩性油气藏的重要性也日趋明显。以往常规的沉积相研究过于宏观,如果以此成果作为预测模式开展储层预测研究无法满足生产要求。因此,在层序地层格架研究基础上,以层序样式控砂为指导,对有利储集砂体在三维空间的展布特征进行研究显得尤为重要。近年来,南堡凹陷通过分区带开展层序地层学研究和砂体预测,进行了地层-岩性油气藏的勘探与开发,取得了明显的成果。

1 区域地质概况

南堡凹陷是渤海湾盆地黄骅坳陷北部的一个北断南超的箕状凹陷。凹陷北部陡坡以西南庄-柏各庄断层为界,与老王庄、西南庄、柏各庄和马头营凸起毗邻,南部缓坡与沙垒田凸起呈超覆关系(图1)。南堡凹陷古近系东营组和沙河街组主要发育扇三角洲、辫状河三角洲和河流三角洲沉积。物源主要来自东北部及北部,属于分散物源体系,其中沙(沙河街组)三段、东(东营组)三段和东一段砂体极为发育^[1]。

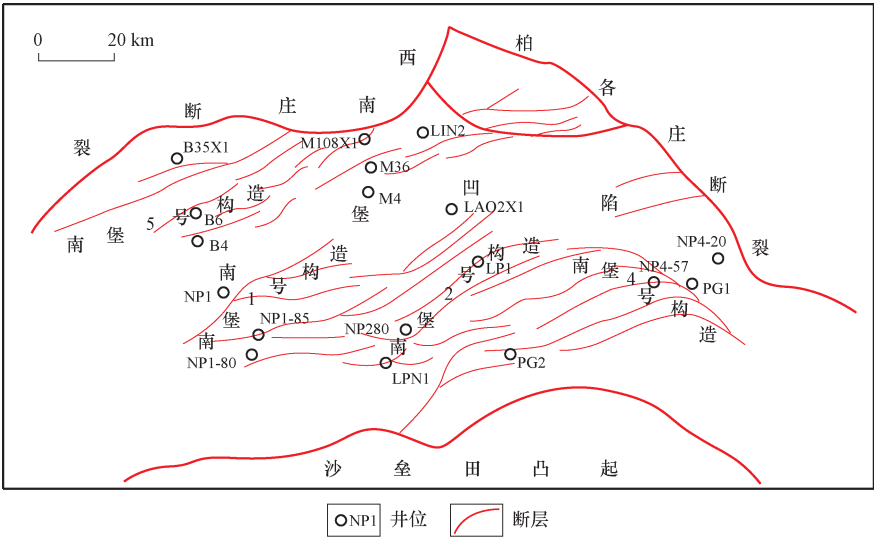


图 1 南堡凹陷构造格架

Fig. 1 Structure framework of the Nanpu Sag

2 层序地层格架的建立

通过对南堡凹陷骨干井(图 1)岩性组合样式、测井曲线的旋回性特征,结合地震反射特征的空间分布,建立了南堡凹陷古近系东营组层序地层对比格架,自下而上分别命名为 SQ8, SQ9, SQ10 和 SQ11(图 2)。通过层序内部高频层序单元变化的精细分析,不仅可揭示体系域本身的进积、加积和退积的构成特点,同时

还可准等时地确定其内部砂组或砂体的侧向变化和沉积微相的时空分布^[2-5],为在该等时格架中精细恢复储集沉积体的三维空间展布、地质模式的建立以及沉积体系的精细描述打下坚实的基础。

3 层序构成样式和砂体预测模式

沉积坡折是控制湖盆层序构成样式和体系域时空分布的关键,而陆相断陷湖盆的沉积坡折主要发育在

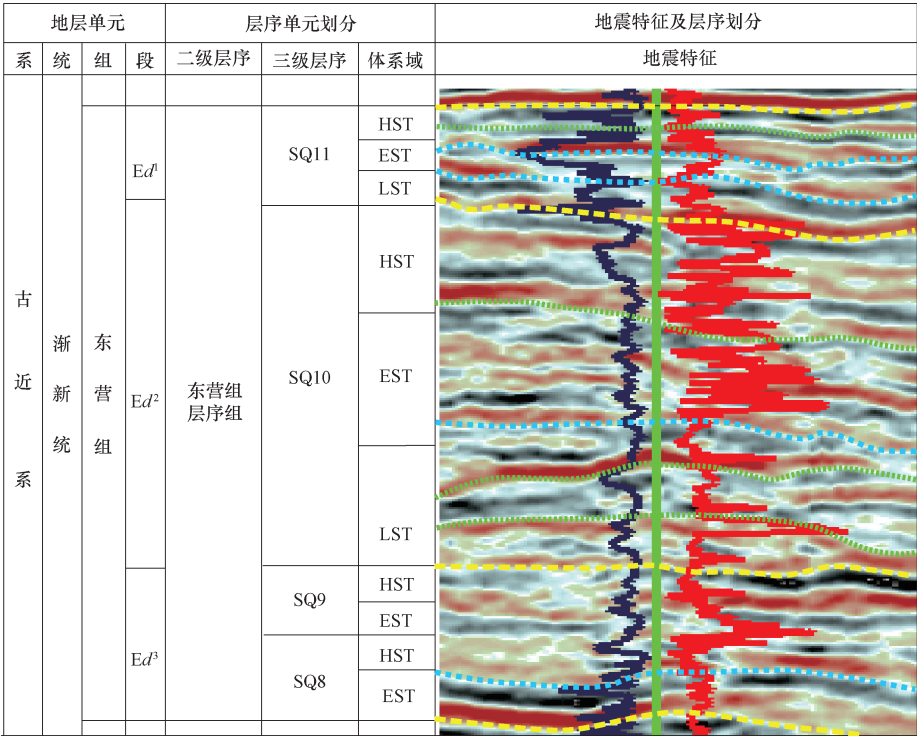


图 2 南堡凹陷东营组层序地层划分

Fig. 2 Sequence stratigraphic division of the Paleogene Dongying Formation in the Nanpu Sag

Ed¹. 东营组一段;Ed². 东营组二段;Ed³. 东营组三段

主控同沉积构造枢纽带或主轴面,如断裂带或背斜褶皱枢纽轴,因此断裂或褶皱等同沉积构造活动造成沉积斜坡发生明显变化,形成了凸起与斜坡、断坡与凹陷、斜坡与凹陷之间的边界地带,控制了陆相断陷湖盆低位期的滨岸坡折和高位滨岸坡折。通常,由断裂控制的沉积坡折为断坡带,由褶皱枢纽轴控制的沉积坡折为弯折带,而由断垒控制的坡折为断垒带^[6-8]。

南堡凹陷东营组沉积时期,区域层序地层格架为北断南超(南断垒)半地堑-地堑式格局,其构造坡折主要受控于盆缘和盆内的同生断裂,主要发育断坡带和断垒带两种沉积坡折。通过南堡凹陷东营组沉积充填时的构造面貌对层序高频单元及层序样式和储集砂体控制作用的分析,归纳出两种构造背景下的4种层序构成样式,即:在北部断坡带构造背景上发育的多断坡带型、单断坡带型、转换带型;在南部滩海地区斜坡带构造背景上发育缓坡坡折型(图3)。

3.1 断坡带层序构成样式和砂体预测模式

南堡凹陷北缘的西南庄和柏各庄断裂在古近系各层序发育时为断控沉积边界。由于北缘控凹生长断裂发育过程中,走向上的分段性、转换性和倾向上的多断裂特征,致使其控制北缘沉积坡折的断控边界主要有单断、多断及断裂间转换带三种类型,并相应发育3种层序构成样式和砂体预测模式:多断坡带型、单断坡带型和转换带型(图4)。

3.1.1 多断坡带型

多断坡带型层序样式由二阶或二阶以上北倾的断裂组成多断式构造坡折,这种构造坡折同生断层落差

大,但断层面缓且分布在边界断层的下降盘。其多阶的断坪和断坡不仅可控制低位、湖扩和高位期沉积的滨岸坡折位置,同时还可控制其层序样式、体系域构成和砂体沉积相带的分布。通常低位坡折位于盆内的次级同向主控断裂处,如高柳断裂带。高位坡折则位于盆缘——柏各庄断裂带。多断坡带型最显著的特点是不同体系域发育时构造坡折带之上和之下沉积环境变化快,且低位体系域砂体以发育近源、粗粒的冲积扇-扇三角洲沉积体系及浊积扇体系为特征,其储集砂体主要分布在低位和高位的内坡折——高柳断裂的下降盘(图4a)。

3.1.2 单断坡带型

单断坡带型层序构成主要发育在北缘西南庄断裂带的中、西段和柏各庄断阶带东段,层序的结构样式比较独特。由于断层的持续滑移,可容空间不断增加,一般多是连续沉积,层序界面不易识别。层序样式一般以加积型为主,物源供给强的情况下,可以形成弱进积,若物源供给弱,甚至可以形成退积水进型的层序结构样式。可预测的最有利储集砂体主要分布在低位坡折内前缘席状砂和坡脚深凹内盆底扇砂体,而高位坡折和低位坡折间的储集砂体主要为扇面的辫状河道砂体(图4b)。

3.1.3 转换带型层

转换带型层序样式主要发育于南堡凹陷北部断坡带西南庄断裂与高柳断裂间转换带部位。由于西南庄断裂向东至高柳断裂之间的交汇处部位的断距明显减小,甚至消失,导致断端位置上岩层的变形由断裂位移转换为褶皱变形,构成地貌上的古低地,是断-隆分支

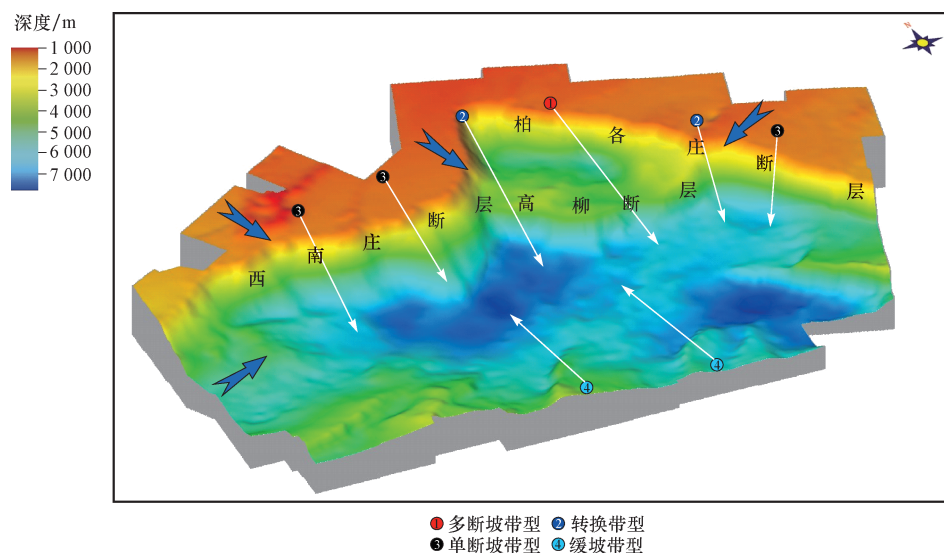


图3 南堡凹陷东营组沉积期古地貌及物源方向

Fig. 3 Paleogeomorphology and source direction in Dongying sedimentary period in the Nanpu Sag

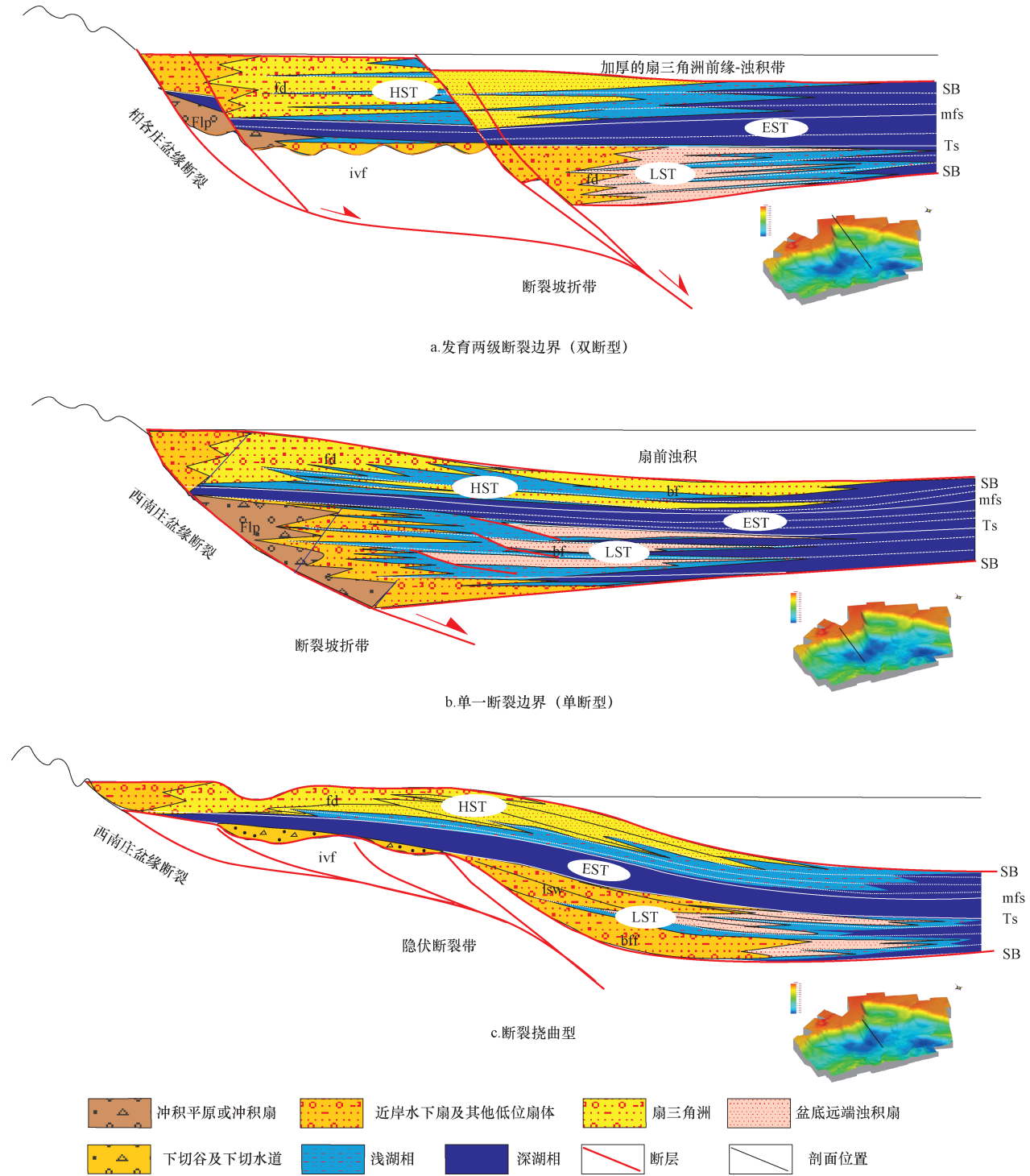


图 4 南堡凹陷北缘东营组 3 种层序构成样式和砂体预测模式

Fig. 4 Three types of sequence stratigraphic patterns and sandbody prediction models of the Dongying Formation at the north margin of the Nanpu Sag

SB. 层序界面; mfs. 最大湖泛面; Flp. 冲积平原或冲积扇; HST. 高位体系域; Ts. 初始湖泛面; bff. 近岸水下扇及其它低位扇体; EST. 湖扩体系域; fd. 扇三角洲; ivf. 下切谷及下切水道; LST. 低位体系域; lsw. 低位楔状体; bf. 盆底远端浊积扇

水系进入次深凹内的主要通道,并直接影响坡折内层序的构成。转换带不仅连通古隆起剥蚀区和次深凹,并控制次深凹内低位体系域的发育规模和范围,同时还是湖扩展体系域深湖和滨浅湖区及高位体系域的扇三角洲沉积相带主要分界区;由于同沉积构造的持续活动,转换带在同一构造背景下,不同的层序发育时位

置稳定,但下切通道由于河流的侧向侵蚀而有摆动。低位坡折内近岸水下扇及低位楔状体之中储集砂体最为发育(图 4c)。

3.2 缓坡带层序构成样式和砂体预测模式

南堡凹陷南部整体以斜坡形式与沙垒田凸起相

连,形成了南部滩海地区缓坡型层序构成样式和砂体预测模式(图5)。由于构造运动的幕式特征及同沉积断裂对沉积砂体展布的控制作用,南部沉积斜坡的坡折点对有利砂体的发育起到重要的影响,尤其对低位域砂体和高位域的水下分流河道及河口坝砂体分布起到重要的控制作用。同时南堡凹陷南部斜坡带东营组后期构造活动强烈,局部地区发生反转翘倾,遭到强烈剥蚀,形成剥蚀带或超覆带,通常可以通过超覆尖灭线的位置(即缓坡带低水位滨岸坡折位置)预测断陷湖盆深湖区和低位体系域的空间分布范围。

该模式揭示了沿坡折上找河道砂体,坡折下的内斜坡和深洼区找寻低位扇体和低位辫状河三角洲河道和河口坝的重要性。

4 砂体预测模式建立实例

4.1 老爷庙地区砂体预测模式的确定

老爷庙地区位于南堡凹陷的中西部,是一个受西南庄断层控制的、继承性发育的滚动背斜构造。滚动背斜形成于沙一段沉积期,东营组沉积期成型,东营组沉积期末定型。背斜构造轴向北北东,被断层复杂化,具有较强的继承性。

由于老爷庙地区控凹边界断裂为单条铲式生长断裂,断坡陡而深,下降盘沉降速率大,因此,当层序充填沉积时,低位、湖扩和高位期的滨岸坡折均限于该断裂构成的陡断坡带内,其沉积相明显受控于该单断坡折

带,属于单断坡带型层序构成样式和砂体预测模式(图4b)。

同时,伴随着该盆缘断裂的同生走滑作用,导致其断陷内地层滚动变形,形成对沉积物源有控制的滚动背斜。沿该背斜轴明显可划分出高位坡折、低位坡折和坡脚,其中低位坡折直接控制低位湖区和低位扇三角洲前缘和湖底扇的发育,坡脚控制深湖区和盆地扇的发育^[9]。

根据构造坡折的变化,可以建立老爷庙地区的砂体预测模式:

1) 高位坡折主要发育扇三角洲沉积体系及深湖沉积,在顺物源方向地震剖面上前积地震反射特征明显,连续性好,延伸较长(图6, SQ10 高位域)。

2) 低位坡折和坡脚主要发育陡坡近岸水下扇或扇三角洲体系组成(图4b),其岩性以砂砾岩、含砾不等粒砂岩、细砂岩为主,构造坡折带控制砂体平面分布范围,在高分辨率地震剖面上低位近岸水下扇和扇三角洲均表现为杂乱的丘形或下平上凸的透镜状反射(图6),横向相带窄,相变块。

3) 远端发育由泥岩及油页岩为主的浅湖沉积体系,在地震剖面上位于远离边界断层的凹陷深部,地震反射表现同相轴连续性好的强反射^[10]。

总体上,有利储层最有可能是分布于低位坡折内前缘席状砂和坡脚深凹内盆底扇砂体。

4.2 南堡3号构造砂体预测模式的确定

南堡3号构造位于南堡凹陷南部,是一个具有潜

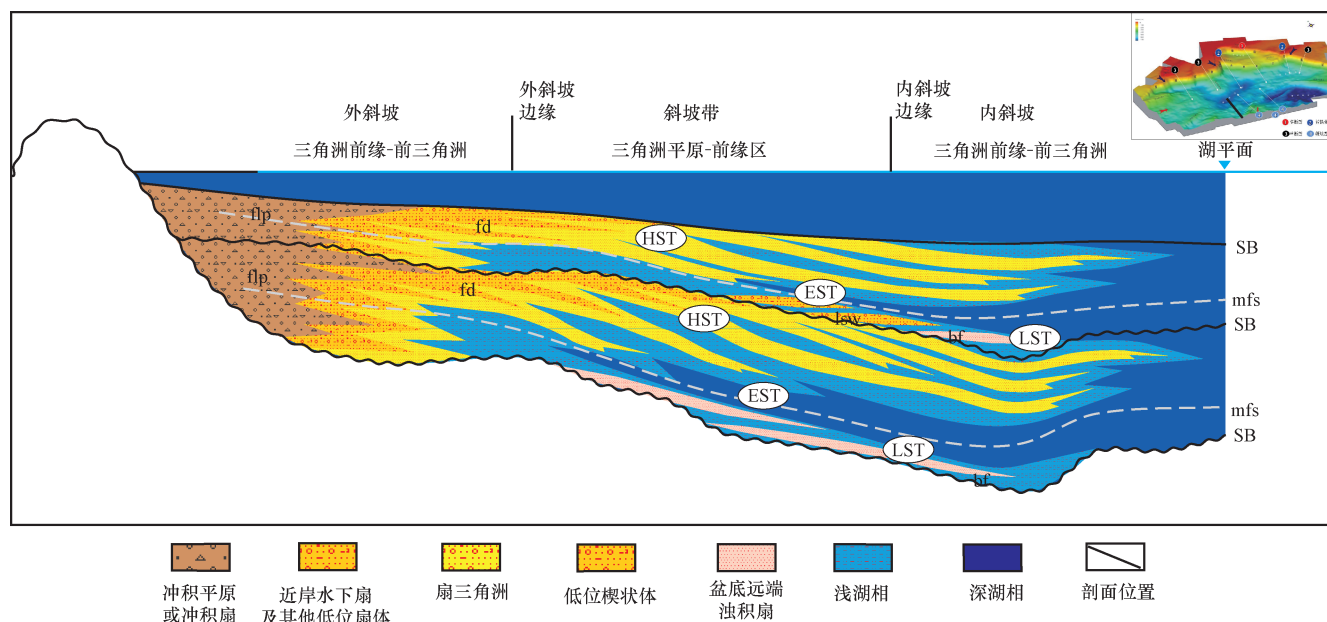


图5 南堡凹陷南部缓坡带层序构成样式和砂体预测模式

Fig. 5 Sequence stratigraphic pattern and sand body prediction model in the southern gentle slope belt of the Nanpu Sag

SB. 层序界面; mfs. 最大湖泛面; HST. 高位体系域; EST. 湖扩体系域; fd - 扇三角洲; LST - 低位体系域; lsf. 低位楔状体; bf. 盆底远端浊积扇

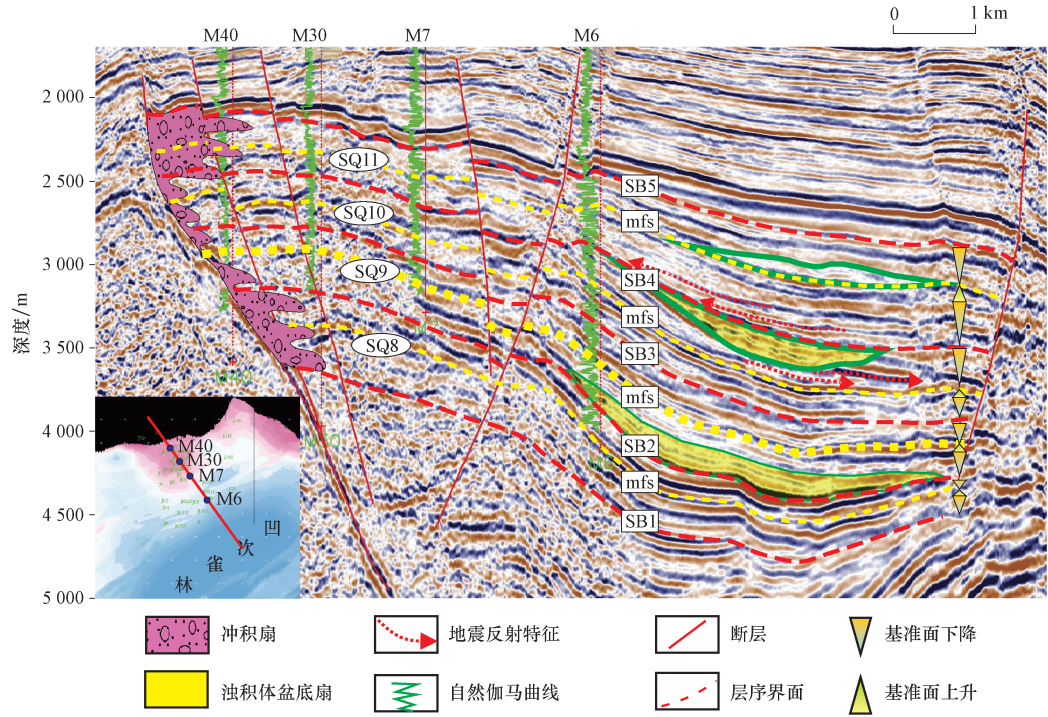


图 6 南堡凹陷老爷庙地区地震层序精细解释

Fig. 6 Seismic sequence interpretation of Laoyemiao region in the Nanpu Sag

SQ. 三级层序;SB. 层序界面;mfs. 最大湖泛面

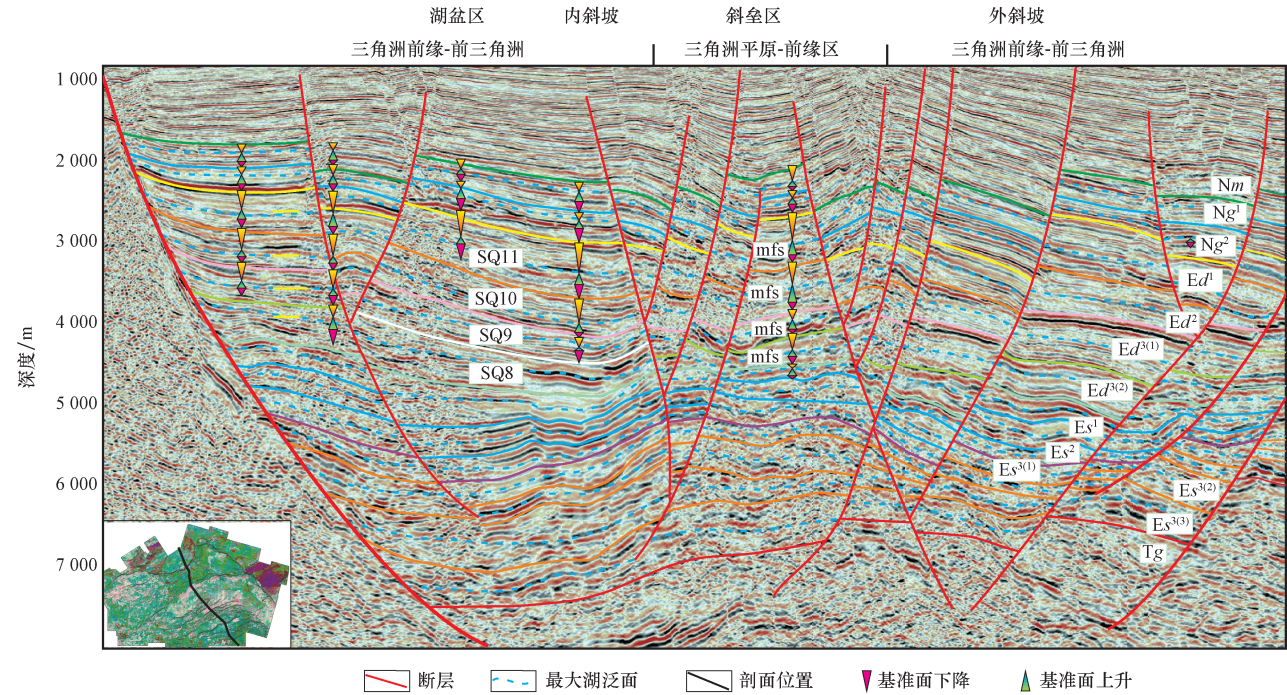


图 7 南堡凹陷南堡 3 号构造地震层序精细解释

Fig. 7 Seismic sequence interpretation of No. 3 structure in the Nanpu Sag

Nm. 明化镇组;Ng¹. 馆陶组一段;Ng². 馆陶组二段;Ed¹. 东营组一段;Ed². 东营组二段;Ed³⁽¹⁾. 东三一下段;Ed³⁽²⁾. 东三二下段;Es¹. 沙河街组一段;Es². 沙河街组二段;Es³⁽¹⁾. 沙三一下段;Es³⁽²⁾. 沙三二下段;Es³⁽³⁾. 沙三三下段;Tg. 第三系底

山背景的断背斜构造,背斜形成于中生界末期,东营组末定型,被断层复杂化,具有较强的继承性。南堡 3 号以缓坡与沙垒田凸起相邻,具有发育大型辫状河三角洲沉积的有利构造背景,且被曹妃甸次洼和林雀次洼环绕,具有洼中隆的有利构造背景。

由于南堡 3 号构造以缓坡形式与凸起相连,因此,

当层序充填沉积时,低位、湖扩和高位期沉积相明显受控于坡折带,属于缓坡型层序构成样式和砂体预测模式(图5)。同时南堡3号构造斜坡带受北缘控凹边界铲式正断层长期继承性活动的影响,导致缓斜坡带形成一系列反向调节同生断层,在缓坡背景上可进一步细分内斜坡、斜垒带和外斜坡,沙河街组末期和东营组末期的沉积超覆尖灭线位置即为缓坡带低水位滨岸坡折(内斜坡)位置,而同生调节断裂带控制了湖扩和高位体系域的沉积相带(斜垒带和外斜坡)分布(图7)。

根据不同坡折区的特点,可以建立南堡3号构造砂体预测模式:

1) 斜垒带和外斜坡在湖扩期发育滩坝砂和滨浅湖沉积;高位期发育三角洲平原相分流河道和河口坝沉积及滨岸平原沉积;低位期主要发育下切河道、滨岸平原或暴露剥蚀。

2) 内斜坡在低位期发育扇三角洲体沉积,形成层序下部的底块砂;湖扩期和高位期发育发育三角洲前缘相、前三三角洲和湖泊相的沉积。

总体上,有利储层最有可能分布于坡折下的内斜坡深洼位扇体和斜垒区高位辫状河三角洲河道和河口坝砂体。

5 结论

1) 通过精细解剖南堡凹陷各个构造带古近系各体系域的内部沉积和高频单元构成,提出对各构造带砂体有预测功能的4种层序构成样式和砂体预测模式,即在北部断坡带构造背景上发育的多断坡带型、单断坡带型和转换带型以及在南部滩海地区斜坡(或斜垒)带构造背景上发育的缓坡坡折型。

2) 多断坡带型模式储集砂体主要分布在低位体系域和高位体系域的内坡折;单断坡带型模式可预测的最有利储集砂体主要分布在低位体系域坡折内前缘席状砂和坡脚深凹内盆底扇砂体;转换带型模式主要可用来预测深凹内低位体系域的发育规模和范围;缓坡模式中坡折上的河道砂体,坡折下的内斜坡和深洼区的低位扇体以及高位辫状河三角洲河道、河口坝是寻找储层的有利目标。

参 考 文 献

[1] 周海民,董月霞,刘蕴华,等.冀东南堡凹陷精细勘探实践与效果[J].中国石油勘探,2003,8(1):11-15.
Zhou Haimin, Dong Yuexia, Liu Yunhua, et al. Precise exploration practice and results of Nanpu Depression in Jidong oilfield [J]. China Petroleum Exploration, 2003, 8(1): 11-15.

[2] 林畅松,刘景彦,刘丽君,等.高精度层序地层分析:建立沉积相和储层规模的等时地层格架[J].现代地质,2002,16(3):276-281.
Lin Changsong, Liu Jingchang, Liu Lijun, et al. High resolution sequence stratigraphy analysis: construction of chronostratigraphic sequence framework on facies and reservoir scale [J]. Geoscience, 2002, 16(3): 276-281.

[3] 王家豪,王华,廖远涛,等.陆相断陷盆地二级层序时限构造沉降与湖平面变化的响应关系[J].地球学报,2009,30(2):194-200.
Wang Jiahao, Wang Hua, Liao Yuntao, et al. Lake-level variation response to tectonic subsidence in a second-order sequence of continental rift basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(2): 194-200.

[4] 林畅松,张燕梅,刘景彦,等.高精度层序地层学和储层预测[J].地学前缘,2000,7(3):111-117.
Lin Changsong, Zhang Yanmei, Liu Jingyan, et al. High resolution sequence stratigraphy and reservoir prediction [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 111-117.

[5] 林畅松,潘元林,肖建新,等.构造坡折带——断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念[J].地球科学,2000,25(3):260-265.
Lin Changsong, Pan Yuanlin, Xiao Jiaoxin, et al. Structural slope-break zone: key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins [J]. Earth Science, 2000, 25(3): 260-265.

[6] 王华,廖远涛,陆永潮,等.中国东部新生代陆相断陷盆地层序的构成样式[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(1):277-285.
Wang Hua, Liao Yuntao, Lu Yongchao, et al. Sequence architecture styles of Cenozoic continental rift basins in East China [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(1): 277-285.

[7] 吴因业,朱如凯,罗平,等.沉积学与层序地层学研究新进展——第18届国际沉积学大会综述[J].沉积学报,2011,29(1):199-206.
Wu Yinye, Zhu Rukai, Luo Ping, et al. Advance on sedimentology and sequence stratigraphy: a summary from 18th international sedimentology congress [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(1): 199-206.

[8] 赵贤正,卢学军,崔周旗,等.断陷盆地斜坡带精细层序地层研究与勘探成效[J].地学前缘,2012,19(1):10-19.
Zhao Xianzheng, Lu Xuejun, Cui Zhouqi, et al. Detailed research of fine sequence stratigraphy and exploration results in the slope zone of faulted basin [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 10-19.

[9] 朱如凯,白斌,刘柳红,等.陆相层序地层学标准化研究和层序岩相古地理:以四川盆地上三叠统须家河组为例[J].地学前缘,2011,18(4):131-143.
Zhu Rukai, Bai Bin, Liu Lihong, et al. Research on standardization of continental sequence stratigraphy and palaeogeography: a case study from the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 131-143.

[10] 陆永潮,杜学斌,陈平,等.油气精细勘探的主要方法体系——地震沉积学研究[J].石油实验地质,2008,30(2):3-4.
Lu Yongchao, Du Xuebin, Chen Pin, et al. Main methods system of fine petroleum exploration- seismic sedimentology [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(2): 3-4.

(编辑 张玉银)