

樊家川油田河流相储层高分辨率层序地层特征

于波, 付国民, 李永军, 刘社华

(长安大学 地球科学与国土资源学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 针对河流相储层标志层缺乏、砂体叠置掘蚀严重、难以精细等时对比的难点, 应用基准面旋回原理, 重点解剖典型取心井及其测井响应模式, 将樊家川油田主要含油层系中侏罗世延安组 Y8 ~ Y10 油组划分为 7 个短期、3 个中期、2 个长期基准面旋回层序, 对应于不同级次的储层成因单元, 同时建立以中期旋回为年代地层格架, 短期旋回为等时地层对比单元的层序地层格架, 对河流相多期叠覆储层进行了精细等时划分与对比, 详细分析了河流相储层短期基准面旋回类型及其叠加式样, 探讨了各级基准面旋回对储层分布的控制作用。

[关键词] 基准面旋回; 河流相; 高分辨率层序地层学; 樊家川油田

[中图分类号] TE14; TE343 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2005)04-0053-06

[作者简介] 于波(1979-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 从事油藏描述研究。

高分辨率层序地层学理论是近年来新崛起的层序地层学新学派, 该理论体系以全新的思路和技术方法, 系统地提出了诸多地层学的新概念和新模式^[1~5], 在油气储层对比及预测研究中得到了迅速的应用。笔者从高分辨率层序地层学出发, 剖析关键取心井, 对樊家川油田河流相储层展开高分辨率层序地层学分析, 建立本区含油层系高分辨率层序地层格架, 并进一步探讨了各级基准面旋回叠加式样及其对储层分布的控制。

1 地质概况

樊家川油田位于鄂尔多斯盆地西北缘、陕北斜坡与天环拗陷过渡部位樊家川鼻状构造南部, 整体为一轴部平缓两翼较陡的穹隆状构造, 主要储集层系中侏罗世延安组 Y10 油组、Y9 油组、Y8 油组沉积期盆内发育东西向展布的河流-湖泊三角洲沉积体系, 樊家川地区则处于西部斜坡三角洲分流平原相带, 以河流沼泽沉积为主, 其中 Y10 油组沉积时古地貌差异分化显著, 残丘与沟谷相间展布, 沉积

格局严格受古地貌控制, 为一套河流填积式的辫状河沉积; Y9 油组在填平补齐的基础上以曲流河沉积为主; Y8 油组沉积期主体河流迁出本区, 以泛滥沼泽沉积为主, 局部发育泛滥汉道^[9]。樊家川油田面积约 15 km², 已钻井 168 口, 目前进入开发中后期。

2 基准面旋回的确定

根据基准面旋回和可容纳空间变化原理, 地层的旋回性是基准面相对于地表位置的变化产生的沉积作用、侵蚀作用、沉积物路过形成的非沉积作用和沉积不补偿造成的饥饿性乃至非沉积作用随时间发生的空间迁移的地层响应, 地层记录中不同级次的地层旋回, 记录了相应级次的基准面旋回, 在每一级次的地层旋回内必然存在着反映相应级次的基准面旋回所经历时间的“痕迹”^[6,7]。用来识别基准面旋回的沉积和地层主要标志为: ①单一向物理性质的垂向变化; ②相序和相组合变化; ③旋回叠加式样的改变; ⑤地层几何形态与接触关系, 这些特征均反映可容纳空间与沉积物补给通量比值(A/S)的变化。

2.1 岩心剖面上短期旋回的确定及其特征

取心剖面对短期旋回的识别是行之有效的, 要选择 f4-3 井作为重点解剖对象, 岩心剖面短期

[收稿日期] 2004 05 12

[基金项目] 中国石油天然气总公司 2002 年科技攻关项目:

碎屑岩储层剩余油精细描述

基准面旋回界面识别的标志有:

(1)在点沙坝之下发育的较明显河流冲刷面及其上的滞留沉积,代表区域基准面下降地表之下,可容纳空间为零甚至为负的沉积背景,其为基准面旋回的开始。

(2)古土壤层及钙结壳为地层长期出露地表、发生沉积间断并侵蚀淋滤的结果,其代表基准面下降至最低点。

(3)岩相类型和岩相组合在垂向上的变化,如冲积河流沉积中代表水体向上“变浅”的相序或相组合和向水体逐渐“变深”的相序或相组合的转换处,是基准面旋回下降至上升的地层响应,转折点可作为层序界面。

(4)砂泥岩厚度的旋回变化,如层序界面之下砂岩粒度变粗、砂泥比向上变大;层序界面之上则反之。层序界面上下基准面旋回的这种转换特征常以地层堆积样式的变化表现出来。

根据以上基准面识别标志及结合 Y8 ~ Y10 油组沉积微相研究,共识别出 4 种短期基准面旋回类型(图 1)。

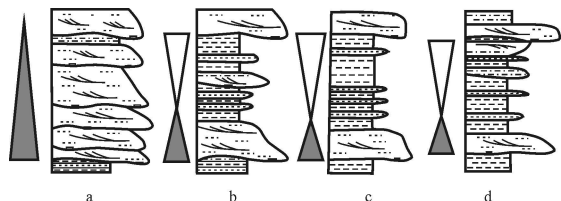


图 1 樊家川油田河流相储层短期旋回样式

Fig. 1 Short term base level sequence pattern of river facies reservoir in Fanjiachuan oil field

(1)以主河道沉积为主的短期旋回:该类型的旋回是研究区 Y10 油组主要的短期旋回形式特征,常发育于中期基准面上升早期,形成于低可容纳空间、 $A/S < 1$ 的条件下,旋回极不对称或仅有上升半旋回,上升半旋回由厚层的河道砂体组成,下降半旋回仅表现为区域广泛分布的河道下切作用。该类短期旋回底部发育冲蚀面及滞留泥砾,下部由多期河道叠置而成,具有明显层间冲刷和单层向上稍变细的特征,较大型交错层理发育,其上为薄层的河漫滩泥岩(图 1a)。从中期旋回发育早期至中期,这种短期旋回垂向组合发生规律性变化,即仅由砂砾岩组成的上升半旋回演变为顶部发育极薄层泥岩的不对称短期基准面旋回。

(2)河道-天然堤(决口扇)-河漫滩组合的短期旋回,该类型的旋回是研究区 Y9, Y8 油组均有发

育,是各油组中上部层位主要的短期旋回形式。短期旋回的上升半旋回由厚度较薄的河道或废弃河道砂岩组成(图 1b),厚度不大,砂体叠合性不强,主要为中细砂岩,具有向上变细的特征,下降半旋回则是由天然堤成因的浅灰色薄层砂岩和浅灰、棕褐色泥质粉砂岩、泥岩互层组成,偶夹决口扇砂体。砂岩发育小型交错层理,局部见小型冲刷构造,粉砂岩及泥岩发育砂纹层理,多夹有煤线。这种类型的旋回表明地层基准面相对上升中,提供了有利于沉积物堆积物较大的有效可容纳空间,有利于沉积作用发生。该类型的旋回主要出现在中期基准面上升中期至下降早期,较为对称,叠置形式亦表现为越向上旋回越对称。

(3)决口扇-漫滩组合的短期旋回:该类型的旋回是研究区 Y9 油组及 Y8 油组主要的短期旋回形式,在中期旋回的中部表现更为突出(图 1c),形成于高可容纳空间,具较好地对称性。基准面上升半旋回为浅灰色的决口河道或废弃河道细砂岩组成,砂层厚度大部分 < 15 m,基准面下降半旋回以灰绿色泥岩为主,有时夹薄层煤层,其中发育爬升波纹理和平行层理,植物碎片。

(4)河道-河漫滩-决口扇组合的短期旋回:该类型的旋回主要发育在 Y9 油组上部,旋回对称性差(图 1d),上升半旋回由次级河道微相的中细砂岩组成,厚度较小,下降半旋回由棕褐色河漫滩泥岩、粉砂质泥岩组成,其间发育紫红色、棕褐色砂泥岩互层的决口扇沉积,这种短期旋回主要出现在中期基准面旋回的下半旋回,缺乏较厚地河道砂岩沉积,上覆较厚地河漫滩和决口扇沉积,代表在基准面下降形成的低可容纳空间的沉积条件。

2.2 中期基准面旋回的识别及其特征

中期地层基准面旋回的确定,是在对短期基准面旋回的叠加样式和大规模侵蚀作用面分析的基础上进行的。由于取心资料有限,中期基准面旋回的确定更多的要依靠测井曲线,即首先用取心井建立短期旋回及其界面的测井响应模型,然后再运用到非取心井中进行旋回的划分。研究中,以取心较全的 f4 3 井的岩心和综合录井资料为基础,选择以自然电位为主、微电极为辅的测井系列来识别出如下几种短期基准面旋回的岩电响应模型(图 2):

(1)河道叠加砂体型:曲线呈箱形及钟形,加积正粒序沉积序列,该类型多发育中期旋回上升旋回早期。

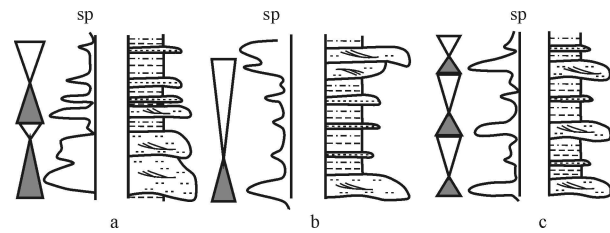


图2 樊家川油田河流相储层
短期基准面旋回的岩电响应模型

Fig. 2 Rock electricity responding model
of short term base level sequence of river
facies reservoir in Fanchuan oil field

(2)次级河道(废弃河道)-天然堤-漫滩组合型,曲线呈齿状指形,幅度较小,该类型多发育中期旋回上升晚期和下降早期。

(3)河道-河漫滩-决口扇组合型,曲线呈指形及齿状钟形,该类型多发育中期旋回上升晚期下降早期。

(4)河道与河漫滩组合型,曲线呈指形,该类型多发育中期旋回下降早期。

从整个岩性及岩性组合与测井响应的关系看,测井响应基本上反映了岩性的变化,能够有效地进行旋回划分。

2.2.1 大规模侵蚀作用的存在

大规模侵蚀作用的存在代表基准面较大幅度的下降,在延安组河流沉积为背景的条件下,多期河道砂体间的相互切割与叠置本身就反映了该套沉积接近基准面由降到升的转折位置,在这转折位置附近,随着基准面的上升,沉积了低可容纳空间的以河道砂体为主的短期旋回。而孤立的河道砂体所构成的自旋回仅代表了河流作用的自然迁移,与基准面变化没有明显的关系。因此,可以认为在低可容纳空间形成的以河道砂体为主的短期旋回代表了一期中期旋回的开始。

2.2.2 短期旋回叠加样式的组合

短期旋回特定的叠加样式是在中期基准面下降或上升的过程中,在大致相似的背景下形成的一套成因上有联系的岩石组合^[8,9],这些叠加样式常具有鲜明地测井响应,在研究区可以识别出3种类型的叠加样式。

垂向加积型叠加样式:其特征为每一期河流自旋回与上覆自旋回在厚度和砂/泥比值保持不变,短期旋回为极不对称的河流-河漫滩组合,发育于中期基准面下降的末期和基准面下降的初期,这种叠加样式特别在Y9, Y10油组中下部较发育。

退积型叠加样式:其特征为每一期河流自旋回与下伏自旋回相比,砂泥比值变小,下部河道砂体厚度逐渐变小,通常为基准面上升时高可容纳空间条件下形成,自下而上旋回趋于对称,这些叠加样式在延安组各油组中上部比较发育。

进积型叠加样式:其特征表现为短期旋回间自下而上河道砂体厚度增加,砂泥比值变大, A/S 减小,通常发育在中期旋回的顶部,代表河流作用逐渐加强,但出现较少,可能与侵蚀或发育不完全有关。

樊家川油田延安组中期旋回中短期旋回的叠加样式的演变,通常由退积型-垂向加积型-进积型、或垂向加积型-退积型-进积型、或仅由退积型构成,其中Y10油组主要发育垂向加积型-退积型-进积型的短期旋回叠加样式,Y8, Y9油组则以退积型-垂向加积型-进积型的短期叠加形式为主,在各油组上部以发育退积型的短期旋回叠加样式为主。在总体上,垂向加积型和退积型样式常见,进积型较少见,其原因可能与侵蚀或发育不完全有关。

河流相储层中期基准面旋回以上升半旋回为主向上“变深”的不对称旋回为主,层序界面为具有一定规模的代表中期基准面旋回下降到最低点位置时发生的区域性侵蚀冲刷面,上升半旋回由向上“变深”的非对称性旋回由低可容纳空间向高可容纳旋回转化,并逐渐过渡为不完全对称旋回;下降半旋回由不完全对称旋回过渡为向上变浅的非对称旋回,或仅表现为很薄的侵蚀残积层,相应的沉积演化序列自下而上为:侵蚀冲刷面-叠置的河道砂体-溢岸细粒沉积及天然堤、决口扇沉积-冲积平原泥岩。

2.2.3 中期旋回中短期旋回的相序特征

在中期旋回的不同位置,即随可容纳空间的变化,短期旋回的相序特征及其层序结构呈规律性变化(图3)。

(1)在低可容纳空间,上升旋回早期及下降旋回晚期,发育两种形式的短期旋回:其一为中期旋回上升早期的以河道砂体相互叠置的非对称短期旋回,这种旋回上升半旋回为相互叠置的河道砂岩及少量冲积平原泥岩组成,下降半旋回表现为河道的下切和冲刷,层序底界发育明显地冲刷面。另一类形式的短期旋回为在中期旋回下降晚期形成的不对称短期旋回,短期旋回的上升半旋回由厚度较薄的次级河道或决口河道砂岩组成,砂体多为透镜状分布,叠合性较差,下降半旋回由于干燥冲积平原

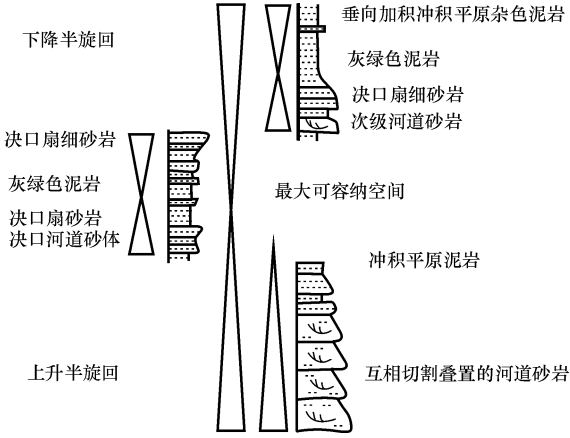


图 3 河流相储层中期旋回中短期旋回相序特征
Fig. 3 Facies order character of short term base level sequence of river reservoir in Fanjiachuan oil field

垂向加积形成的杂色泥岩组成。

(2)在高可容纳空间,中期上升旋回晚期及下降旋回早期,所发育短期旋回较对称,主要有潮湿冲积平原灰绿色泥岩、粉砂岩夹薄层决口扇与堤岸粉砂岩组成,砂体多为席状,粒度较细,有时出现暂时性水体中形成的薄层钙质灰岩及植物碎片。

2.2.4 中期基准面旋回划分

根据中期基准面界面特征及其内部短期旋回叠加样式演变规律,将樊家川油田 Y8 ~ Y10 油组共分为 3 个中期旋回(图 4)。

MSC1:形成于盆地扩张初期,旋回样式表现为一上升半旋回为主的不对称型,包含了整个 Y10 沉积期,主要为盆地超覆河谷充填型的辫状河沉积体系,由两个短期上升半旋回组成,地层叠加形式为加积至退积型,旋回底部为大型冲刷面,含河床滞留砾石,顶部为溢岸及岸后沼泽细粒粉砂岩、泥岩及其煤线。

MSC2:发育于 Y9 期,形成于区域盆地构造沉降、湖盆快速扩张阶段,总体为一套分流平原曲流河沉积层序,旋回样式表现为以上升半旋回为主的不完全对称型,由 3 个短期上升半旋回组成,旋回中下部主要为在低可容纳空间下沉积的纵向上叠置的复合河道砂体,上部主要为溢岸及其岸后沼泽沉积夹有较粗粒的决口扇沉积,总体为加积至退积地层叠加样式,随可容纳空间逐渐增大,砂泥比降低,短期旋回组成底部以单一河道叠加砂岩为主,为完全不对称的上升半旋回,中上部以河道-河漫滩组合为主,为较不对称完全旋回。

MSC3:发育于 Y8 期,形成于区域性湖泊开始充填淤浅阶段,在研究区总体为一套岸后沼泽、局

部为分流汉道的沉积层序, Y9 期主体河流已迁出本区。旋回样式表现为不对称性,在延安地区由 4 个短期旋回组成,中下部为不完整上升半旋回,上部为完整的下降半旋回,在研究区仅划分出两个不对称旋回,为河道-河漫滩-决口扇组合。

2.2.5 长期基准面旋回划分

综合研究整个盆地中部沉积建造分析,可以识别出两个长期基准面旋回,也代表了盆地在中侏罗世延安期两次大的构造沉降旋回。

LSC1:由 MSC1 和 MSC2 组成,包括 Y10 至 Y9 沉积期,底部界面为区域性间断面和大规模的冲刷侵蚀面,下部以发育了一套厚度较大、粒度较粗的“宝塔砂岩”为主要标志,可进行区域对比,上升半旋回从 Y10 延伸至 Y9 中上部,整个上升半旋回体现了盆地扩张、湖泊开始形成到第一次出现最大湖泛面,下降半旋回发生于 Y9 中上部,形成湖盆扩张之后开始缓慢收缩阶段,樊家川位于整个湖泊-三角洲沉积体系之水上分流平原地带,对湖水变化反应迟钝,缺少记录,仅从河道沉积地层叠加样式有所反映。

LSC2:包含了整个 Y8 Y7, Y6 沉积期,区域上以“裴庄砂岩”出现为标志,是构造局部抬升,盆地开始填平补齐的产物,其后区域湖盆开始逐渐充填淤浅。

3 高分辨率地层格架的建立

根据岩心剖面划分的短期旋回对测井曲线进行标定,建立短期旋回及其界面的响应模型,应用于其他未取心井测井曲线的基准面旋回划分。此次研究主要对未取心井的自然电位曲线进行了标定,然后在单井旋回解释模型的基础上,对研究区的所有钻井进行连井解释,并运用旋回等时对比的原理,建立研究区高分辨率层序的层格架。

依据所识别的中期基准面旋回,选取下降半旋回与上升半旋回的转换点(基准面下降至最低,可容纳空间最小)为界,将樊家川油田延安组主要储集层系划分为 3 个等时地层单元,对应于 Y8 ~ Y10 油组。根据测井曲线所划分的短期旋回,选取短期旋回上升半旋回与下降半旋回转换点(基准面上升至最高,可容纳空间最大)作为时间地层单元的界线,将樊家川油田 Y8 ~ Y10 油组划分为 6 个次一级的等时地层单元,对应于 6 个成因地层单元。

据上述原则,对研究区逐井进行划分对比,图 5

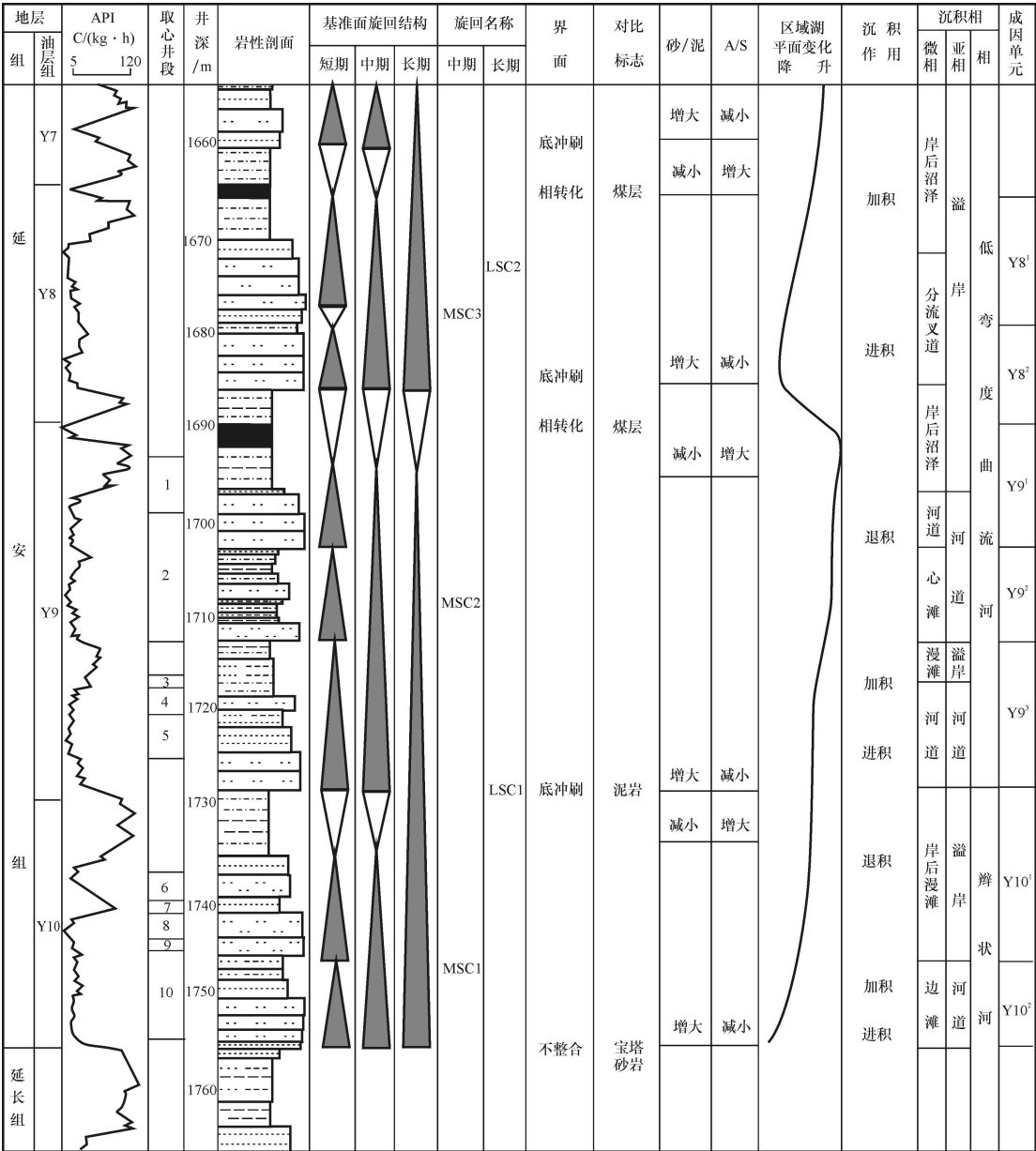


图 4 樊家川油田 f4 3 井高分辨率层序地层剖面

Fig. 4 High resolution sequence stratigraphy section of f4 3 well in Fanjiachuan oil field

为垂直古水流方向高分辨率层序地层对比剖面, 这一划分方法比较好地保证了储层对比的等时性。

4 基准面旋回对储层分布的控制

通过基准面旋回的划分、对比及其高分辨率层序地层格架的建立, 不同级次的基准面旋回叠加控制了储层的分布特征, MSC1-2 河道砂体发育, 沉积作用处于长期旋回的早期, 砂体纵向上连通较好, 为延安组主要储集层系, MSC3 总体砂泥比较低, 单砂层具变薄变细的趋势, 反映了可容纳空间的增

大; 其次, 短期基准面旋回在中期基准面旋回中的位置不同, 在很大程度上控制了短期旋回内部沉积分异及其堆积方式, 在中期基准面上升早期, 短期基准面旋回以河道砂体为主形成自旋回, 为上升半旋回及不对称旋回, 在这样低可容纳空间条件下形成厚层的粗碎屑河道砂体沉积, 砂体侧向叠置, 分布范围广, 连通性好, 其分割性表现为砂体间的非均质性变化和薄的泥质夹层的作用; 在中期基准面旋回中期, 短期旋回以河道-天然堤-河漫滩组合或以河道-河漫滩组合为主, 可容纳空间增大, 砂泥比值降低, 作为主要储层的河道砂体彼此独立, 相互

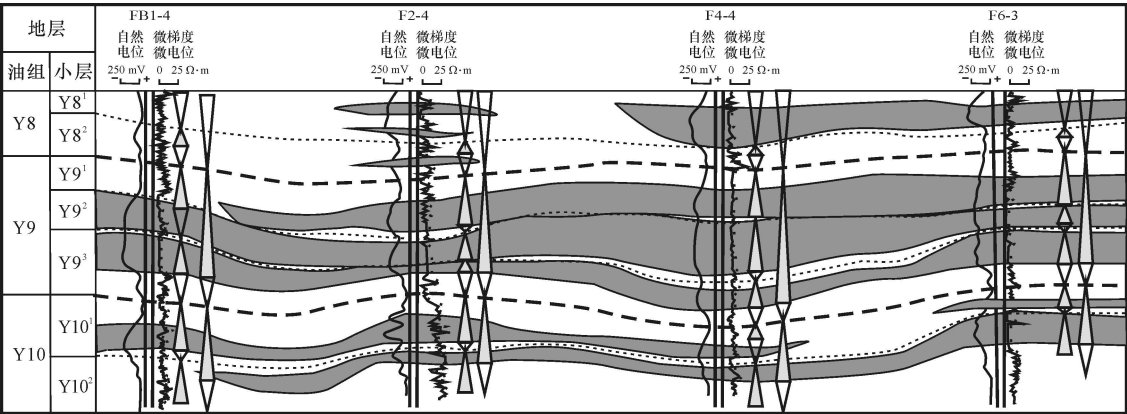
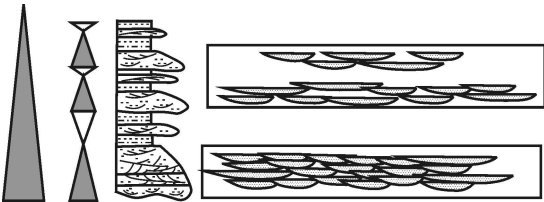


图 5 樊家川油田垂直古水流方向高分辨率层序地层对比剖面

Fig. 5 High resolution sequence stratigraphy reference section in vertical direction to age old stream in Fanjiachuan oil field

连通几率较小，河间薄层砂比例增大，其分割性表现为泥包砂特征(图 6)。此外，在中期基准面上升早期，河道砂体彼此切割和叠置，砂体间连通性较好，局部残留的泥质夹层形成油层隔层，油层分布范围大，在基准面上升晚期，河道砂岩多彼此独立，相互连通几率较少，储层单元多为单个河道砂体及河间薄层砂，储集性能较差，但可形成较好的泥岩盖层。



据文献[6]改动

图 6 河流相储层中期旋回不同位置砂体分布模型

Fig. 6 Sand body distributing model in middle term cycle sequence in river facies reservoir

[参 考 文 献]

[1] 邓宏文, 王洪亮. 层序地层基准面的识别、对比技术及应用

[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(3): 177~184

[2] 邓宏文, 王洪亮, 李小孟. 高分辨率层序地层对比在河流相中的应用[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(2): 90~114

[3] 邓宏文. 美国层序地层研究中的新学派[J]. 石油与天然气地质, 1995, 2(16): 90~97.

[4] 郑荣才. 四川盆地侏罗统大安寨段高分辨率层序地层学[J]. 沉积学报, 1998, 16(2): 1~8

[5] 郑荣才, 吴朝荣. 浅谈陆相盆地高分辨率层序地层研究思路[J]. 成都理工学院学报, 2000, 23(3): 241~244

[6] 付国民, 李永军, 石京平. 樊家川油田河流相储层砂体非均质模型及剩余油分布[J]. 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(1): 15~19

[7] 陈恭洋. 碎屑岩油气储层随机建模[M]. 北京: 地质出版社, 2000

[8] 陈波, 陈恭洋. 二区一断块高分辨率层序地层[J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 263~267.

[9] Cross T A. 据高分辨率层序地层学认识地层结构对比概念体积积分相异和储层的间隔单元划分[J]. 国外油气勘探, 1998, 8(3): 285~294

[10] 付国民. 河流相储层地质建模及剩余油分布规律研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2003

High resolution sequence stratigraphy features of the river facies reservoir in the Fanjiachuan oil field

YU Bo, FU Guo-min, LI Yong-jun, LIU She-hua

(School of Earth Sciences and Resources Management, Chang'an University, Xi'an 710054 China)

Abstract The river facies reservoir is short of symbol layer and sandbody is folded and picked, so fine isochronous sandbody comparing and dividing are difficult. On the basis of the theory of the base level cycle, 7 short term cycle sequence, 3 middle term cycle sequence, 2 long base level cycle sequence can be distinguished from the Y8~Y10 oil formation of the principal oil bearing ones in the Yanan Formation of Middle Jurassic age. The base level cycle sequence is corresponding to different grade genetic units. At the same time, all graded sequence structure types, stacking patterns and chrono-stratigraphic framework are established on the basis of the middle term cycle sequence and short term cycle sequence and the reservoir distribution by the different base level cycle is discussed.

Key words: base level cycle; river facies; high resolution sequence stratigraphy; Fanjiachuan oil field

[英文审定: 周军]