

文章编号: 1000-0550(2013)04-0600-08

高分辨率层序地层学在河流相油田开发中的应用^①

胡光义¹ 陈飞¹ 孙立春¹ 范廷恩¹ 赵春明² 吴胜和³

(1. 中国海洋石油总公司 研究总院 北京 100027; 2. 中国海洋石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300452;

3. 中国石油大学 北京 102249)

摘要 河流相是我国陆相盆地重要的油气储集层系类型之一,开发阶段应用高分辨率层序地层学进行河流相高精度小层划分,对于指导河道砂体的精细划分对比有重要意义。由于受到河流相地层自旋回沉积、沉积间歇面的作用、河型和砂体叠置样式的变化以及基准面旋回的级次的划分等复杂因素的影响,在开发阶段进行高精度层序对比时,难度更大。运用高分辨率层序地层学原理和方法,综合分析河流相模式的特点,充分利用河流相岩相、相序的组合特征随空容纳空间规律性变化,结合各种关键面的约束控制、油水界面在小层内部空间的分布位置以及河道的切割充填作用,进行精细河流相小层划分对比。旨在摸索一套油田开发中后期河流相高精度层序划分的思路和方法,以指导油田的生产开发。并以渤海Q油田明化镇组为例,在实际应用中取得了较好的效果。

关键词 高分辨率层序地层对比 河流相 开发阶段应用 渤海Q油田

第一作者简介 胡光义 男 1961年出生 教授级高级工程师 油气田勘探开发地质 E-mail: hugy@cnooc.com.cn

中图分类号 TE121.3 **文献标志码** A

0 引言

河流相是我国中、新生代陆相盆地重要的油气储集层系类型之一,在陆相盆地碎屑岩储层已动用储量中,河流相储层约为53%^[1-2]。东部中生代含油气盆地已开发的油田中,河流相储层的石油地质储量占46%以上,仅胜利油区就有1/3的储量分布在新近系河流相储层当中^[1-4]。由于河流相沉积砂体时空演化的多变性和复杂性,尤其是砂岩单层厚度相对较小且横向变化大,缺少岩性标志层,受地震资料分辨率所限^[5]。因此,河流相等时地层单元的划分与对比一直是困扰油气田开发的重要难题^[4]。

以基准面变化为驱动机制的高分辨率层序地层学^[6]自提出以来,其理论、概念和方法日臻完善^[7-12],改变了盆地分析及沉积学的原始思路^[12]。这一方法不仅考虑了基准面旋回过程与储层结构层次性,以及不同级次旋回划分标准的关系;而且重点强调了基准面旋回对砂体结构成因、沉积序列的控制作用;同时也明确了较短周期旋回对较长期旋回的影响及多层次逐级对比的技术方法^[13,14]。但是,针对复杂多变的河流相沉积体系,随着开发程度的加深,高分辨率层序地层学在小层精细对比中的矛盾也愈来愈凸显,很难单独通过钻井来识别小级别基准面。

因此这就要求在高级别基准面旋回控制下,从砂体成因演化角度,综合多种信息,充分利用多种对比手段进行小层等时对比。

1 问题的提出

沉积学与层序地层学的研究对沉积盆地提出了许多新的课题,如油气勘探中新发现储集体的成因解释和分布规律、沉积盆地高精度岩相古地理重建、油气田开发过程中的储集层精细表征和描述等等^[15]。我国已经投入开发的河流相储层是一个复杂的非均质体系,纵向上具有多级次的旋回性,平面是复杂的微相组合^[16],这就给精细的小层划分对比带来很多问题。主要问题表现在以下几个方面:(1)河道叠置样式虽然能反映垂向“基准面”的变化,但是往往只代表局部地区,很难在区域上进行对比追踪;(2)缺乏广泛发育的标志层;(3)河流环境包含辫状河、曲流河和网状河等多种相类型,沉积特征差异较大,导致地层在垂向和横向上具有不同特点,难以确定较为统一的对比标准。

1.1 自旋回的影响

与其他沉积环境相比,河流相的自旋回作用更加明显^[17]。异旋回是响应基准面变化的产物,通常控制地层的叠置样式,能形成有时间地层对比意义的成

①“十二五”国家重大专项课题“海上开发地震关键技术及应用研究”(编号:2011ZX05024-001)部分研究成果

收稿日期:2012-09-10;收修稿日期:2012-12-03

因地层单元^[18]。而自旋回则通常是与基准面变化无关的事件作用的产物^[17],是局部的、无规律性或规律性不强的,在时间和空间上是不可靠的^[19]。譬如洪水事件导致的河道的决口、河道凸岸沉积的侧向迁移等都属于自旋回沉积。在基准面不发生变动的情况下,河流自身水动力的变化,这种变化可以是洪水事件的出现或者水动力反常的突然增强所导致,从而引起了河流的迁移摆动,产生了沉积的正韵律性。但是,多个这种河流沉积序列在纵向上的叠置,也可以理解为基准面上升旋回的产物。

1.2 沉积间歇面的作用

识别河道沉积间歇面,特别是对单一河道沉积间歇面的识别,是解剖复合砂体和精细小层划分的基础。沉积间歇面是受水流量变化影响一期连续稳定沉积结束到下一期连续稳定沉积开始之间形成的、有别于上下邻层的岩性的沉积层序^[20]。从电测曲线上看,间歇面的 GR 高、SP 偏于基线位置、电阻率低。

这种间歇面大到区域性沉积剥蚀间断面,小到下一次洪水沉积之间的沉积间隔。河流相的沉积间歇面主要包括泥质夹层、灰质(钙质)夹层和物性夹层等 3 种类型^[21]。正确识别沉积间歇面的规模类型,才能有效的识别基准面旋回的级次,正确的进行小层的划分对比^[22]。

多个河道单元叠置出现的沉积间歇面,横向上延续性稳定或呈现出渐变趋势,可在全区追溯对比。

局部存在的沉积间歇面,一般延伸不稳定,主要为河道的上部单元、决口扇的上部或者河道和决口扇的复合体的上部单元。识别过程中一定要注意区分沉积间歇面是单元间还是单元内的,也就是全区分布还是局部分布。a 井—b 井中部沉积间歇面分布较为连续,而 b 井上部和下部只是在局部有分布(图 1)。

1.3 河型和砂体叠置样式的变化

河道类型转化是地貌、气候以及沉积物供给的综合反映^[23-25],实际受控于基准面升降导致的可容纳空间变化的影响。在平面上表现为不同河型在同一河流体系中的首尾相接,在空间上表现为不同河型在垂向上的相互叠置^[23]。

基准面发生变化时,河道可以不发生侵蚀和充填,而可以通过河道形态或河道类型的变化适应基准面升降引起的河床坡度的变化^[26]。基准面快速下降时,河道发生侵蚀或充填;基准面缓慢下降时,河道弯曲度增大,河道深度变小、宽度变大,容易形成高弯曲度曲流河^[26-27]。

基准面上升早期,相对湖平面开始下降, $A/S < 1$, 河流发生下切以及沉积物过路。相对湖平面上升,河道迁移摆动能力相对较强,平面上连片、垂向上叠置,形成复合河道砂体,主要以低弯曲度曲流河为主。不同期次、不同级次的砂体叠置,砂体内部发育各种形式的冲刷面,形成泛连通结构。随着基准面的不断上升, A/S 比值增大,河道叠置程度与连续性变差。

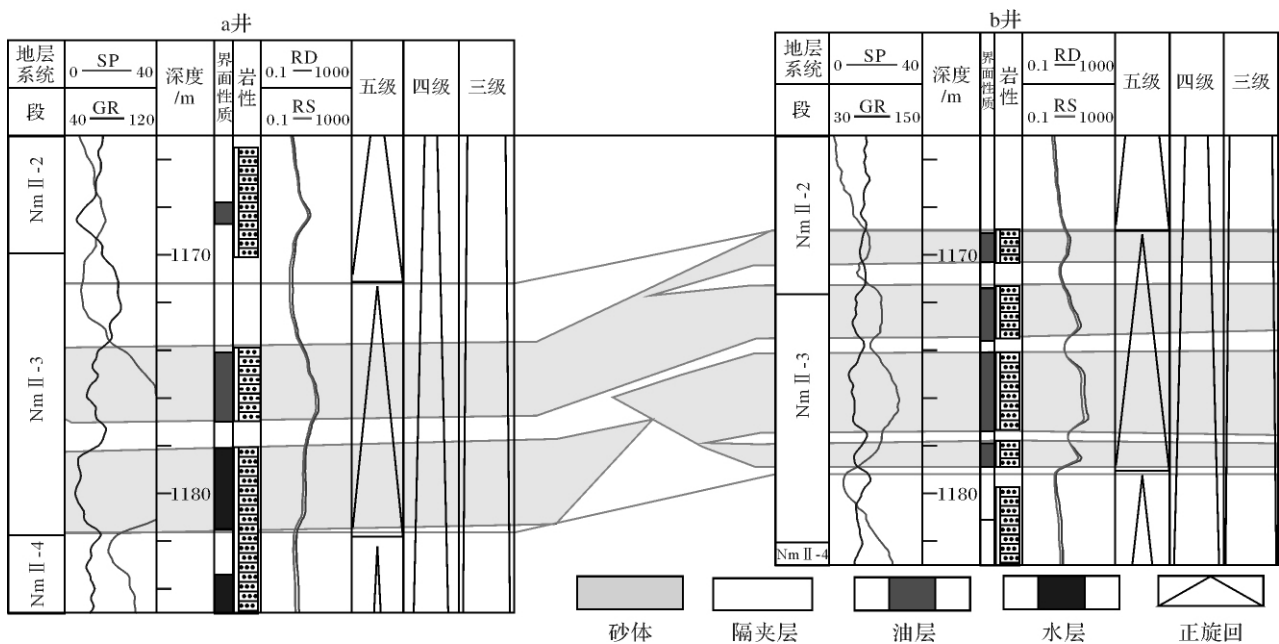


图 1 渤海 Q 油田明下段叠置砂体沉积间断面展布图

Fig. 1 Discontinuity interface of superimposed sand body in Lower Member of Minghuazhen Formation at Q oilfield in Bohai

当达到 $A/S > 1$,湖平面达到顶点 ,河道弯曲度增大 ,河道规模变小 ,砂体变薄 ,河道砂体呈透镜状发育于细粒泛滥平原沉积内 ,河道砂体彼此孤立、连通性差 ,河道逐步形成高弯度曲流河沉积。

1.4 基准面旋回的级次

基准面旋回的多级次性导致地层旋回的多级次性 ,而划分出的级别又表现出很强的相对性。另一方面 ,人们可能过多地强调层序旋回性的方面 ,而忽略了地质作用的阶段性。导致不同人对于地层旋回级别的理解却可能有很大区别^[17-28]。短期旋回具有成因层序的意义 ,因而最短期的地层旋回也可以称为一个成因层序^[17]。短期旋回可识别程度与地层剖面所形成的古地理位置、沉积相成因类型和沉积速率等因素有关。同时 ,借助于岩芯和测井 ,将其空间分布 ,特别是不同微相的分布作为定义和识别不同级别沉积层序的一个重要标准。基准面旋回级次的划分根据客观标志的易分辨性确定 ,层序的分级不宜过多 ,与实际生产开发需求的层次相对应。

2 高分辨率层序格架内河流相精细小层对比

2.1 河流相模式指导

河道类型、砂体结构及相模式演化受控于准面旋回升降的影响 ,通过对砂体结构及其相模式的分析 ,可以宏观的识别准面旋回变化 ,从而正确的划分层序格架。

基准面下降到最低可容空间最小 ,发生大面积的侵蚀暴露。随后基准面缓慢上升期 ,水流局限于大型侵蚀沟谷内 ,河道在侵蚀河谷内频繁摆动迁移 ,主要

由下切河谷中的河道充填物和河漫滩上的细粒越岸沉积物组成。河流发育于宽广的河流阶地中 ,以粗粒沉积为主 ,形成横向上和纵向上互相切割的复合河道砂体 ,发育低弯度曲流河。基准面缓慢上升早期 ,可容纳空间增长较慢 ,形成多层横向连续、厚度大的砂体。泛滥平原上的细粒沉积物可能会受河道改造。基准面缓慢上升晚期 ,随可容空间增长速度的提高 ,垂向加积速度也会增大 ,形成彼此孤立、横向上受限的河道以及分布广泛的泛滥平原沉积。此阶段主要以过渡型曲流河为主。基准面下降时期 ,河道宽度变大、深度变小 ,悬浮负载为主 ,泛滥平原上的加积速度也会降低 ,河道砂体的密度向上增大 ,形成横向相对孤立的砂体与土壤层 ,以高弯度曲流河为主(图2)。这一模式明确了基准面升降对体系域演化的控制和可容空间变化对砂体展布特征的影响。这一解释模式与 Wright 等和 Shanley 等^[29-30]提出的冲积层序地层模式中河流砂体样式的演变规律有很强的相似性。

2.2 岩相、相序组合特征

河流沉积环境具有一定岩相组合构成的相序组合特征 ,是一定古地貌和能量条件的产物 ,反映了 A/S 比值的变化^[31]。在研究区主要有以下几种类型的岩相相序组合。

(1) 厚层块状砂岩相 ,厚度一般为几十厘米 ,厚的可达 1 m ,无原生沉积构造。水动力较强沉积物快速堆积产物。岩性都较粗 ,以粗砂岩和中砂岩为主 ,局部含有砾石和泥砾 ,泥砾一般具有定向排列(图 3A、3B)。有时 ,因钙质胶结的粉砂岩 ,内部无层理整体呈块状 ,但是厚度一般较小(图 3C) ,反映了水动力较弱条件下 ,沉积物快速沉积而成。厚层块状砂岩一

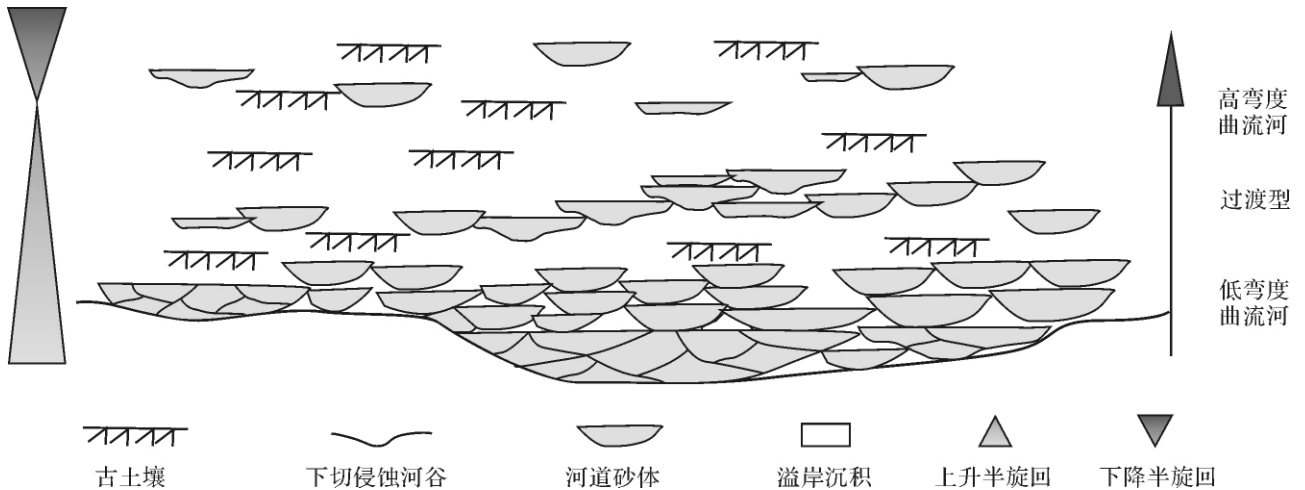


图2 河流相河型与层序地层模式(据 Wright 等 ,1993 略有改动)

Fig. 2 Fluvial facies channel patterns and sequence stratigraphic model (after Wright , et al. ,1993)

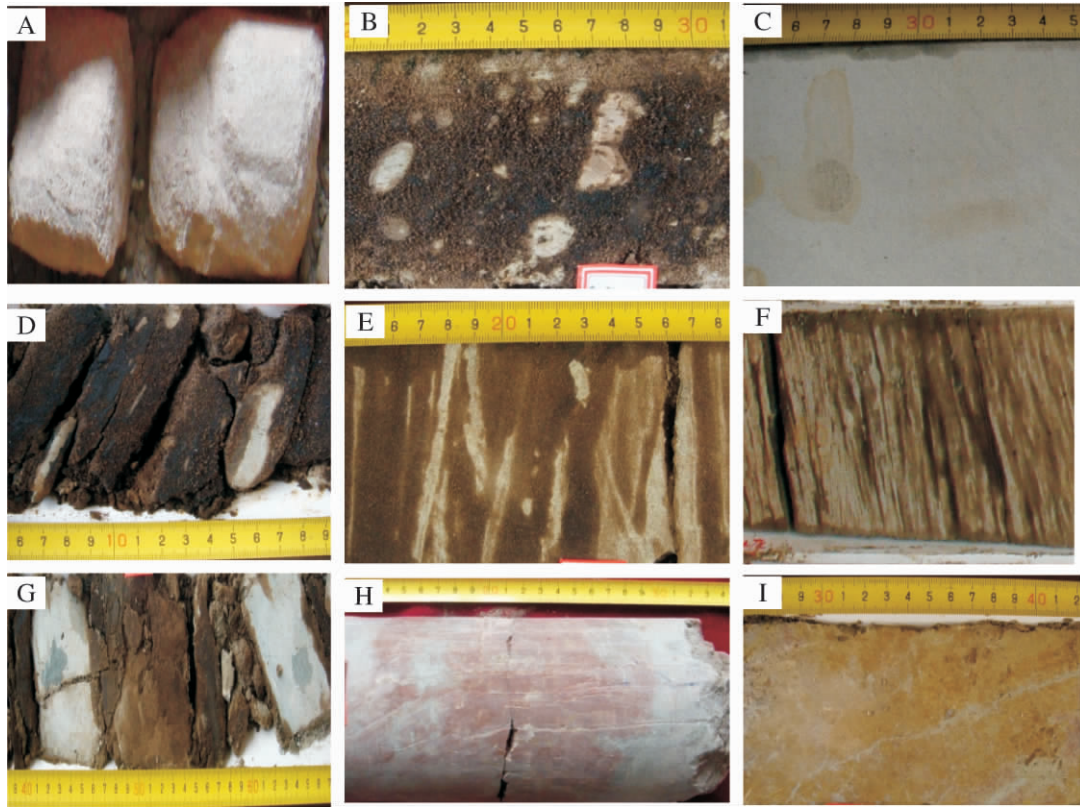


图3 渤海Q油田明化镇组河流相岩相类型特征

A. 厚层块状浅灰色粗砂岩, 149.08 m a 井; B. 厚层块状、富含含浅灰色泥砾, 泥砾定向排列, 1304.7 m b 井; C. 钙质胶结粉砂岩, 1349.5~1350 m b 井; D. 平行交错层理, 含泥砾细砂岩, 1357.1 m b 井; E. 楔状交错层理, 含泥砾粉细砂岩, 1489.28 m b 井; F. 砂纹层理, 粉砂岩, 1350~1352.52 m b 井; G. 粉砂岩与泥岩互层, 1424.5~1424.8 m b 井; H. 泥岩夹薄层砂岩, 泥岩为棕红色, 1134.52 m c 井; I. 含结核土灰色泥岩, 1480.6 m b 井

Fig. 3 Characteristics of fluvial facies lithofacies at Q oilfield in Bohai

一般为河道底部的砂体, 砂体彼此切割相互叠置, 主要形成复合型砂体。底部突变接触, 顶部与上覆的正粒序砂岩呈过渡接触, 一般代表了层序的底界面。

(2) 平行层理砂岩相, 岩性主要为细—粉砂岩(图3D)。富含片状暗色炭屑, 且其常沿层理面有绿灰色泥砾分布。常与槽状交错层理和板状交错层理共生。一般发育于河道的中下部。

(3) 槽状交错层理砂岩相, 岩性主要为细—粉粒砂岩, 沿层理面有油气分布(图3E)。代表强水动力条件, 一般位于河道中上部或者河道的边部靠近天然堤的地方。有时, 也会是决口扇的沉积而成, 但是一般为反韵律—正韵律组成的复合韵律。以大规模侧向迁移摆动为主, 主要形成复合型砂体类型。

还有一种砂纹层理粉砂岩相, 内部波浪纹理发育, 是细粒沉积物在水流作用下形成(图3F)。水动力相对较弱, 一般出现于河流决口扇、天然堤与洪泛平原沉积微相。

(4) 砂岩夹泥岩相, 粉砂岩中交错层理可见, 泥岩为块状构造, 泥岩厚度较小, 常小于0.2 m。常具正粒序和底冲刷构造(图3G)。反映水动力在强、弱交替情况下的特征。处于河道的边部, 为侧叠型向孤立型砂体转变的类型。

(5) 泥岩夹砂岩相, 大套泥岩中粉砂岩发育, 粉砂岩厚度一般都较薄, 层厚小于0.1 m。泥岩颜色一般发红, 而粉砂岩层一般发灰色(图3H)。

(6) 厚层泥岩相, 厚度大于0.4 m。泥岩一般为浅灰色、土黄色和红褐色, 质地不纯, 呈块状。内部见结核, 反映了泛滥平原的蒸发环境(图3I)。泥岩相组合表现了一种低能的快速沉积的环境, 反映了较高的可容纳空间。

2.3 关键面的约束对比

关键界面主要包括标志层、地层转换面^[17]、洪泛面、不整合面和地震强反射面等。标志层在岩性及电性剖面上有着明显特征, 能够有效的横向对比。研究

区通过分析发现了四个相对稳定的辅助标志层。一是馆陶组的底部巨厚砂砾岩体,其厚度大,分布面积广,侧向连通性好,全区稳定分布。馆陶组底部是公认的区域角度不整合,故这套标志层有很好的可对比性。二是 Nm II 油组底界砂岩、与泥岩突变接触,地震反射轴上为强反射底界。三是 Nm IV 油组顶部大段高伽玛泥岩段,棕红、灰绿色泥岩。四是明下段顶部-明上段底部高阻砂泥岩互层,浅灰色、土黄色砂岩与浅棕红、灰黄色泥岩。这些层段具有分布稳定、特征明显、等时界限的特点,可作为区域对比标志层。在开发阶段,在生产油田范围内,本油田地层的砂体发育层段作为标志层使用能起到很好的效果。地层转换在地层剖面上常表现为地层叠加样式的变化。洪泛面通常由具有一定厚度的颜色较深、质地较纯泥质岩或较上覆、下伏岩性粒度相对较细的细粒沉积组成,并可以在一定范围内追踪。不整合面上、下地层

突变接触,发育各类冲刷现象。

2.4 油水界面性质对比

油水界面性质在油田开发中对油藏范围内小层对比有着极为重要意义^[14]。被不同的隔夹层所分开的小层之间存在不同的油水界面,每个油水系统内部均表现出具有统一的油水界面,油层位于高部位而水层应当位于低部位(图4)。另外,通过对产液剖面和吸水剖面的分析以及压力测试都可以检验小层受效程度,从而明确小层对比的准确性。

2.5 河流切割充填对比

由于河流的冲刷作用,其底部一般发育切割充填构造,因此可以根据河道沉积的特点进行精细小层对比。初期,河流以下切侵蚀作用为主,地层遭受侵蚀,形成低弯度的下切侵蚀河道。早期,在侵蚀河道内部河道频繁摆动迁移,填充粗粒物质,砂体彼此切割,相互叠置,形成广阔的相互叠置复合河道砂体结构。后

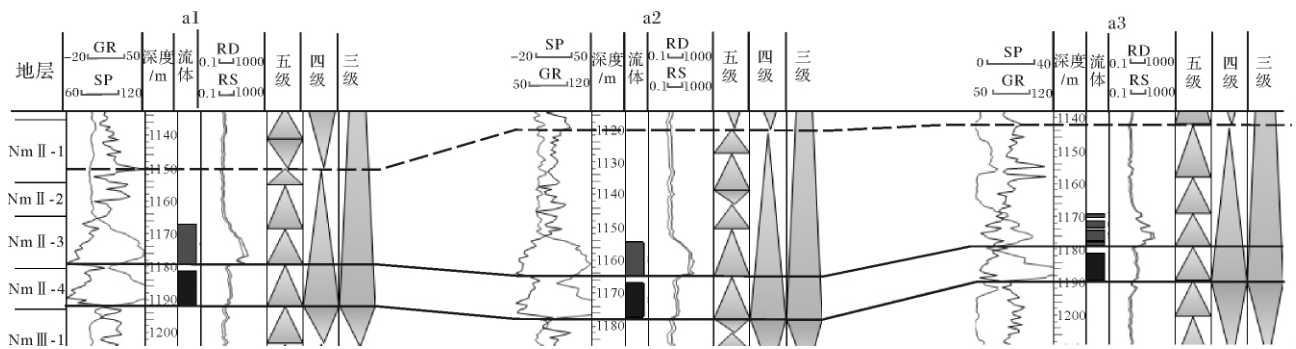


图 4 渤海 Q 油田明化镇组河流相油水界面性质对比

Fig. 4 Oil-water interfacial correlation of fluvial facies of Minghuazhen Formation at Q oilfield in Bohai

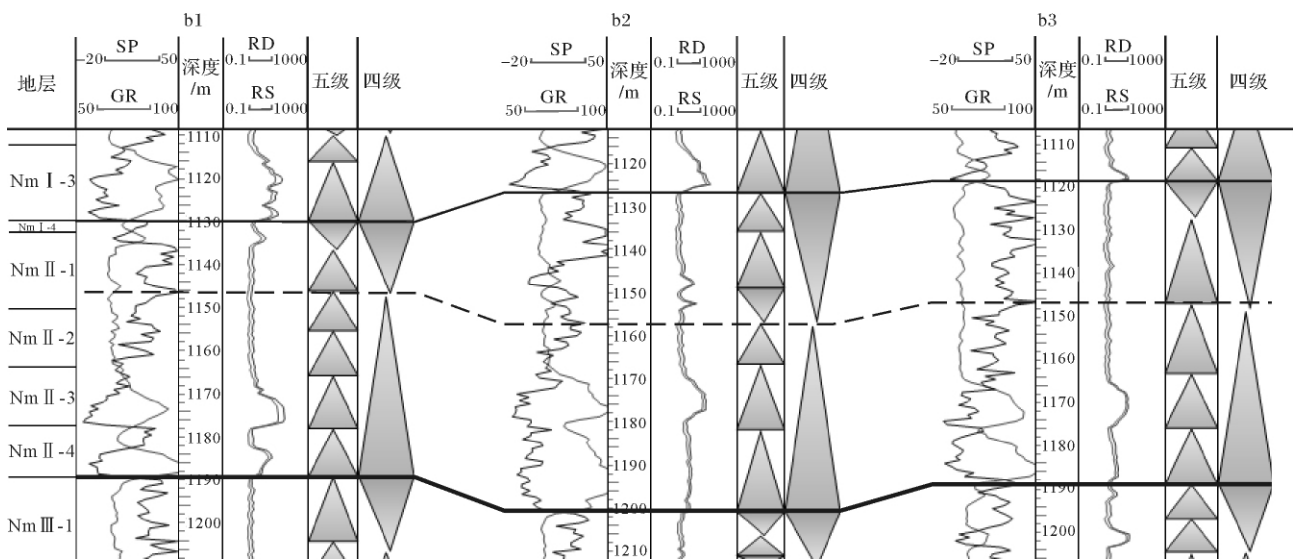


图 5 渤海 Q 油田明化镇组河流相河道切割充填对比

Fig. 5 Channel cutting and filling correlation of fluvial facies of Minghuazhen Formation at Q oilfield in Bohai

期, 河流将早期河流沉积单元上部部分或全部被冲蚀, 并沉积新的河道砂岩, 形成垂向上相互叠加的厚层河道砂岩。晚期, 河道弯曲度增大, 细粒物质被保存下来, 砂体具有单层式, 砂体彼此孤立、砂体与砂体之间的连通性差。因此河道具有顶平底凸的特点, 河道位置一般表现为下凸形态, 为小层对比的界面(图 5)。随着河道的迁移摆动, 在种变化在剖面表现为一定的规律性。此外, 宏观上由于沉积的继承性, 小层界面应该具有厚度变化趋势的一致性。

3 河流相层序对比实例分析

渤海 Q 油田位于渤海湾盆地的石臼坨凸起上, 在潜山披覆构造背景下形成的并被断裂复杂化的、受岩性和构造双重因素控制的河流相大型油田^[32]。主要含油层系发育于新近系明化镇组(Nm)下段, 并进一步细分为 Nm0、Nm I、Nm II、Nm III、Nm IV 和 Nm V 共 6 个油组。研究区内钻遇地层平均厚度为 482 m, 区域上分布比较稳定。岩石类型为长石砂岩, 岩性主要为中—细砂岩及粉砂岩, 泥岩呈灰绿色。

应用高分辨率层序地层学的理论和方法, 在三级和四级层序框架以及关键面的约束控制下, 以河流相沉积模式为指导, 对其进行岩相、相序组合特征的分析, 结合油水界面在空间的分布位置, 综合多种方法对渤海 Q 油田的明化下段地层进行小层划分和对比, 划分了 38 个五级层序、13 个四级层序和 4 个三级层序, 其中五级层序厚度约为 12.7 m(图 6)。

小层内部河道砂体的结构类型、叠加样式和相对保存程度具有一定的规律性。在层序界面附近, 基准面上升早期, 由于可容纳空间较低, 河流下切形成河道的下切侵蚀, 下切河道规模较大最厚处达 15 m。河道迁移摆动能力相对较强, 单套砂体规模变大, 河道呈大规模冲刷充填。随后, 随着基准面缓慢上升, 河流水体能量大, 沉积物负载量大, 发育相互切割、彼此叠置的河道砂岩, 砂体内部发育各种形式的冲刷面。当基准面达到快速上升阶段时, 地层表现为退积的叠加样式, 形成复合河道砂体。基准面达到最高时期, 河道弯曲度增大, 形成彼此孤立、横向上受限的河道。整体上呈现多期河道相互叠加, 河道间有明显的隔(夹)层。基准面下降时期, 可容纳空间达到最大, 沉积物供给相对不足, 河道作用相对较弱, 侧积作用不甚发育, 使得河道规模变小, 侧向连通性差, 呈窄小的条带状孤立分散于泛滥平原中, 横向上相对孤立的砂体与土壤层。

4 结论

(1) 开发阶段应用高分辨率层序地层学进行河流相高精度小层划分时, 应该考虑以下几个问题, 包括河流相地层各类自旋回沉积、沉积间歇面的作用、河型和砂体叠置样式的变化以及基准面旋回的级次的划分。旨在通过这些问题的分析, 达成一定的共识, 并在小层精细划分应多加注意。

(2) 开发阶段应用高分辨率层序地层学进行河

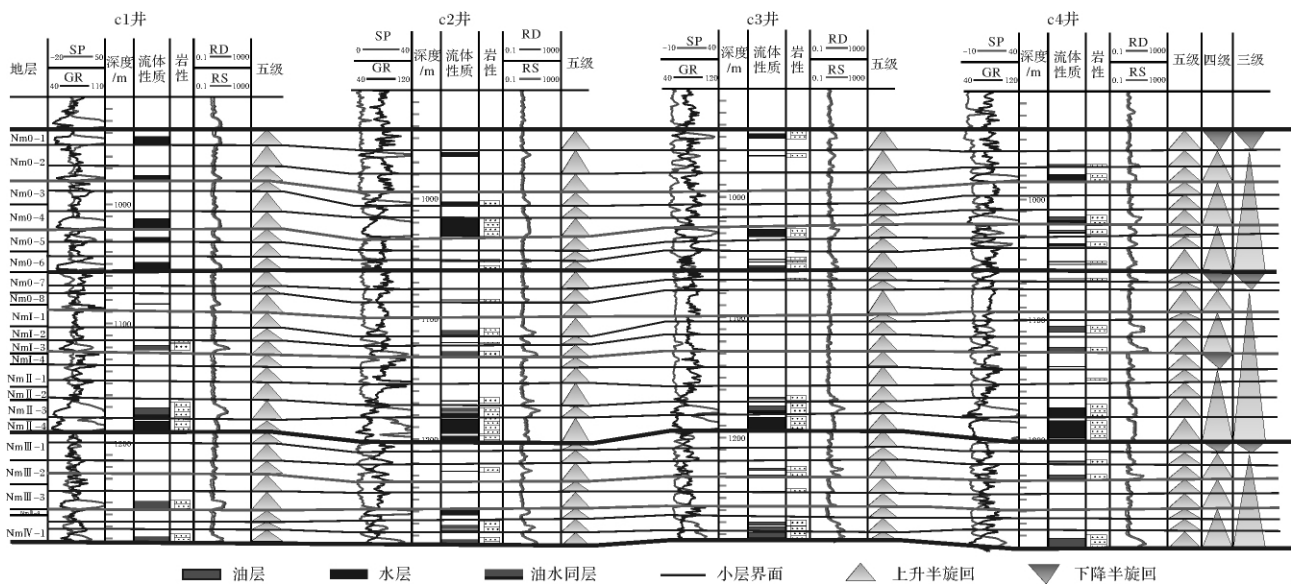


图 6 渤海 Q 油田明化镇组河流相高精度层序划分对比

Fig. 6 Fluvial facies correlation section based on high resolution sequence at Q oilfield in Bohai

流相高精度小层划分时,要从宏观上综合分析河流相模式的特点做到成因合理解释,微观上充分利用河流相岩相、相序的组合特征,结合各种关键面的约束控制、油水界面在小层内部空间的分布位置以及河道的切割充填作用,进行精细河流相小层划分。针对界面附近河道砂体,由于河道的强烈侵蚀下切,其叠置样式下切程度复杂,要依据岩相、相序的组合特征和河道的切割充填作用进行小层和砂体的细分对比。针对湖泛面附近要考虑沉积间歇面的作用,并结合岩相、相序的组合特征进行分析对比。

(3) 河流相的砂体结构是沉积物的供给与可容纳空间之间比值变化的函数。要依据不同可容纳空间下河道砂体的叠置规律和保存程度进行砂体的细分对比。不同的可容纳空间变化下河道发生规律性的侵蚀、充填、迁移和漫溢,从而控制了层序地层格架内河道砂体构叠置样式、砂体形态、规模和连通性。

参考文献(References)

- 1 裘怿楠. 中国陆相碎屑岩储层沉积学的进展[J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 16-23 [Qiu Yanan. Developments in reservoir sedimentology of continental clastic rocks in China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(3): 16-23]
- 2 裘怿楠. 石油开发地质方法论(一)[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(2): 43-47 [Qiu Yanan. The methodology of petroleum development geology(I) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1996, 23(2): 43-47]
- 3 李阳. 河道砂储层非均质模型[M]. 北京: 科学出版社, 2001 [Li Yang. Channel Sand Reservoir Bed Anisotropic Model [M]. Beijing: Science Press, 2001]
- 4 邓宏文, 吴海波, 王宁, 等. 河流相层序地层划分方法——以松辽盆地地下白垩统扶余油层为例[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 621-627 [Deng Hongwen, Wu Haibo, Wang Ning, et al. Division of fluvial sequence stratigraphy: An example from the Lower Cretaceous Fuyou oil-bearing layer, the Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(5): 621-627]
- 5 崔永谦, 秦凤启, 卢永和, 等. 河流相沉积储层地震精细预测方法研究与应用——以渤海湾盆地冀中拗陷古近系河道砂为例[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 688-692 [Cui Yongqian, Qin Fengqi, Lu Yonghe, et al. Research and application of detailed seismic prediction in fluvial reservoirs: an example from the Palaeogene channel sand in the Jizhong Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(5): 688-692]
- 6 Cross T A, Lessenger M A. Sediment volume partitioning: Rational for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation [C] // Gradstein F M, Sandvik K O, Milton N J. Sequence Stratigraphy Concepts and Applications. NPF Special Publication, 1998: 171-195
- 7 邓宏文, 王红亮, 王居峰, 等. 层序地层构成与层序控砂、控藏的自相似特征——以三角洲-沉积扇体系为例[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(5): 491-495 [Deng Hongwen, Wang Hongliang, Wang Jufeng, et al. Self-similarity of constitution of sequence stratigraphy and distribution of sand-bodies and lithologic reservoirs: Taking delta-turbidite fan system as an example [J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(5): 491-495]
- 8 郑荣才, 彭军. 陕北志丹三角洲长6油层组高分辨率层序分析与等时对比[J]. 沉积学报, 2002, 20(1): 92-100 [Zheng Rongcai, Peng Jun. Analysis and isochronostratigraphic correlation of high resolution sequence stratigraphy for Chang-6 oil reservoir set in Zhidan Delta, Northern Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1): 92-100]
- 9 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 Jiayu, Guo Bincheng, Zhang Xingyang. Sequence stratigraphic framework and model of the continental basins in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(5): 11-15]
- 10 Weimer P, Posamentier H W. Siliciclastic sequence stratigraphy recent developments and application [J]. *AAPG Memoir*, 1994, 58: 1-492
- 11 Van der Werff W, Johnson S. High resolution stratigraphic analysis of a turbidite system, Tanqua Karoo Basin, South Africa [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20: 45-69
- 12 Miall A D. The Geology of Fluvial Deposits—sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology [M]. Springer, 1996: 75-310
- 13 郑荣才, 柯光明, 文国华, 等. 高分辨率层序分析在河流相砂体等时对比中的应用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2004, 31(6): 641-647 [Zheng Rongcai, Ke Guangming, Wen Guohua, et al. Isochronic correlation of fluvial sandbodies by high-resolution sequence technique [J]. *Journal of Technology: Science & Technology Edition*, 2004, 31(6): 641-647]
- 14 袁新涛, 沈平平. 高分辨率层序框架内小层综合对比方法[J]. 石油学报, 2007, 28(6): 87-91 [Yuan Xintao, Shen Pingping. Continental strata correlation of high-resolution sequence in reservoir development phase [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(6): 87-91]
- 15 孙龙德, 方朝亮, 李峰, 等. 中国沉积盆地油气勘探开发实践与沉积学研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(4): 385-396 [Sun Longde, Fang Chaoliang, Li Feng, et al. Petroleum exploration and development practices of sedimentary basins in China and research progress of sedimentology [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(4): 385-396]
- 16 李阳. 河流相储层沉积学表征[J]. 沉积学报, 2007, 25(1): 48-52 [Li Yang. Characterization of sedimentology in fluvial facies reservoir [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(1): 48-52]
- 17 邓宏文. 高分辨率层序地层学应用中的问题探析[J]. 古地学报, 2009, 11(5): 471-480 [Deng Hongwen. Discussion on problems of applying high resolution sequence stratigraphy [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(5): 471-480]
- 18 Richard J Moiola. Architecture of the Upper Cretaceous ferron deltaic complex, western interior seaway, Utah USA. Abstracts of International Conference on Nonmarine Basin System [C]. RIPED of CNPC,

2007. 3: 10-12
- 19 黄彦庆, 张尚峰, 汤军. 高分辨率层序地层学中自旋回作用的探讨[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(2): 6-8 [Huang Yanqing, Zhang Shangfeng, Tang Jun. Discussion on problems of autocyclicly in high resolution sequence stratigraphy[J]. Journal of Oil and Gas Technology 2006 28(2): 6-8]
- 20 撒利明, 王天琦, 师永民. 油田开发中后期岩相单元的细分研究[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 595-599 [Sa Liming, Wang Tianqi, Shi Yongmin. Subdivision of lithofacies units during middle-late stage of oil development[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 595-599]
- 21 冯伟光. 河流相储层中层类型定量识别[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(5): 40-43 [Feng Weiguang. Quantitative recognition of interbed types in fluvial reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency 2009, 16(5): 40-43]
- 22 渠芳, 陈清华, 连承波. 河流相储层细分对比方法探讨[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(1): 17-21 [Qu Fang, Chen Qinghua, Lian Chengbo. Discussion on the method for the subdivision and comparison of fluvial reservoir[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science 2008, 23(1): 17-21]
- 23 王随继. 黄河下游不同河型河道的水沙效应及演变趋势分析[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1163-1171 [Wang Suiji. Analysis of effect of water and sediment load and evolution trend of the different channel patterns in the lower Yellow River[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1163-1171]
- 24 Reinfelds I, Cohen T, Batten P, *et al.* Assessment of downstream trends in channel gradient, total and specific stream power: a GIS approach[J]. Geomorphology, 2004, 60(3-4): 403-416
- 25 Jain M, Tandon S K. Fluvial response to Late Quaternary climate changes, western India[J]. Quaternary Science Reviews, 2003, 22(20): 2223-2235
- 26 Cross T A, Lessenger M A. Sediment volume partitioning: rationale for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation[C]// Accepted for Publication in Norwegian Petroleum—Fore-
- nin Conference Volume, 1996: 1-248
- 27 王嗣敏, 刘招军. 高分辨率层序地层学在陆相地层研究中若干问题的讨论[J]. 地层学杂志, 2004, 28(2): 179-184 [Wang Simin, Liu Zhaojun. Discussion on some problems of high resolution sequence stratigraphy in the study of continental stratigraphy[J]. Journal of Stratigraphy, 2004, 28(2): 179-184]
- 28 王英民. 对层序地层学工业化应用中层序分级混乱问题的探讨[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(1): 9-15 [Wang Yingmin. Analysis of the mess in sequence hierarchy applied in the industrialized application of the sequence stratigraphy[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(1): 9-15]
- 29 Wright V P, Marriott S B. The sequence stratigraphy of fluvial depositional systems: the role of floodplain sediment storage[C]// Cloetingh S *et al.* eds. Basin Analysis and Dynamics of Sedimentary Basin Evolution. Sedimentary Geology, 1993, 86: 203-210
- 30 Shanley K W, McCabe P J. Alluvial architecture in a sequence stratigraphic framework: a case history from the Upper Cretaceous of southern Utah, U. S. A. [C]// Flint S, and Bryant I, eds. Quantitative Modeling of Clastic Hydrocarbon Reservoirs and Outcrop Analogues. International Association of Sedimentologists Special Publication, 2007, 15: 21-25
- 31 耳闯, 牛嘉玉, 顾家裕, 等. 辽河双台子构造带沙三段主要的沉积相类型与成因分析[J]. 地质学报, 2011, 85(6): 1028-1037 [Er Chuang, Niu Jiayu, Gu Jiayu, *et al.* Main sediment type and genesis of E₂s³ in Shuangtaizi structure belt, the West Sag, Liaohhe[J]. Acta Geologica Sinica 2011, 85(6): 1028-1037]
- 32 赵春明, 胡景, 霍春亮, 等. 双曲流河与辫状河沉积砂体连通模式及开发特征——以渤海地区秦皇岛32-6油田为例[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(6): 88-91 [Zhao Chunming, Hu Jing, Huo Chunliang *et al.* Sandbody interconnectivity architecture and development characteristics of meandering river and braided river deposits: a case study of Qinhuangdao 32-6 Oilfield, Bohai area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(6): 88-91]

Application of High-resolution Sequence Stratigraphy of Fluvial Facies in Development of Oilfield

HU Guang-yi¹ CHEN Fei¹ SUN Li-chun¹ FAN Ting-en¹ ZHAO Chun-ming² WU Sheng-he³

(1. Research Institute, CNOOC, Beijing 100027; 2. Tianjin Branch of CNOOC Limited, Tianjin 300452;

3. China University of Petroleum, Beijing 100083)

Abstract: Fluvial sandbody is one of the most important hydrocarbon reservoirs in China. Using of high-resolution sequence stratigraphy in fluvial facies in development of oilfield is very important to the Guidance of fluvial sandbody Subdivision and Correlation. There are complex factors, including fluvial facies autocyclicly sediment, the effect of sedimentary surface, channel pattern and sandbody architecture, and the orders of base-level cycles, which resulted in the difficulty to define subdivision and correlation. According to the theory and approach of high-resolution sequence stratigraphy, combining with fluvial facies model, lithofacies and facies sequence and association, and key surface correlation, reservoir fluid correlation and channel erosion and fill, fluvial reservoir subdivision and comparison have been carried out. Provided a clue and methods on the fluvial facies subdivision and correlation in development of oilfield of intermediary and later stage, in order to be helpful to product and develop of oilfield. In Minghua-zhen Formation Bohai Q Oilfield, It has achieved good results in the practical application.

Key words: high-resolution sequence strata correlation; fluvial facies; oilfield development; Bohai Q oilfield