

高分辨率层序地层对比在河流相中的应用

邓宏文 王洪亮

(中国地质大学, 北京 100083)

李小孟

(胜海项目经理部, 山东东营 257000)

济阳拗陷北部胜海区上第三系馆陶组上段是以冲积-河流相为主的沉积。利用岩芯资料的高分辨率, 划分基准面短期旋回, 分析相序特征; 应用岩芯标定, 建立测井资料的基准面旋回响应模型; 通过井-震对比, 划分基准面中期旋回, 并分析各地震相的地质意义。在此基础上, 运用基准面旋回原理, 建立高分辨率等时地层格架, 研究河流层序发育特征与演化过程, 预测主要产层段储层的空间分布。

关键词 基准面 旋回 高分辨率 对比 河流相 储层预测

第一作者简介 邓宏文 女 50岁 教授 沉积学与储层预测

关于基准面的概念、基准面旋回和可容纳空间变化原理, 及其导致的同一沉积体系不同沉积环境中沉积物的体积分配和相分异作用, 以及以基准面旋回为参照格架的高分辨率地层对比技术, 作者已在数篇文章中论及^[1~2], 在此不再赘述。本文主要论述如何根据基准面旋回和可容纳空间变化原理, 运用钻井和地震剖面识别基准面旋回并进行高分辨率地层划分与对比。

济阳拗陷北部胜海区馆陶组可分为上、下两段。下段以块状含砾砂岩, 中、细砂岩夹棕红色泥岩为主; 上段则以细砂岩、粉砂岩与棕红、灰绿色泥岩互层为特征。由于馆陶组上段为冲积-河流相为主的沉积, 储层横向变化大, 地层对比十分困难。地震剖面多表现为水平、近于平行的强弱振幅交互的反射特征, 很难依据地震反射几何形态及反射终止类型, 进行层序分析和地层解释。因此, 馆陶组上段分析首先以钻井取芯资料、测井曲线为基础识别基准面旋回, 然后进行井-震对比确定地层层序界线。之后, 进行全区追踪对比及地震相的地质解释, 进而对储层分布及储层类型进行预测。

1 基准面旋回的识别

根据岩芯、测井及地震资料, 可在馆陶组上段识别出3种规模的地层旋回, 即长期、中期、短期旋回, 其分别响应相应级次的基准面旋回。

1.1 岩芯剖面基准面旋回的确定与旋回特征

由于岩芯剖面的高分辨特征, 往往是短期旋回识别的资料基础。

1.1.1 低可容纳空间短期旋回

最低可容纳空间、低 A/S 比值形成的短期旋回, 发育于馆陶组上段下部中期旋回中(图1)。旋回不对称, 仅发育上升半旋回, 下降半旋回表现为区域广泛分布的河道下切作用。短期旋回的底界面为明显的冲刷面, 砂岩之上由相互切割, 彼此叠置的河道砂岩、含砾砂岩组成, 厚度大, 以槽状交错层理为主。砂岩具顶底突变特征, 向上变细不明显, 其上为潮湿冲积平原薄层灰绿色泥岩, 表明该类型旋回主要为辫状河道沉积。

类似的短期旋回也出现在馆陶组中部的中期旋回内(图2A)。该旋回尽管同时具基准面上升半旋回与下降半旋回沉积, 但不对称性十分明显。其上升半旋回厚度大, 以相互叠置的砂岩为特征。每一单层砂岩均质性较好, 含油性饱和度高, 厚度20~30 m, 单层砂岩厚度向上变大。以槽状交错层理发育为特征, 顶部细粒部分可见平行层理、水流波状层理。由于 A/S 比值增大, 基准面下降旋回的沉积也部分保存下来, 由厚度较薄的潮湿洪积平原与厚3~7 m的决口扇、决口河道粉砂岩组成, 可发育小型槽状交错层理、波状层理。

另一种类型的短期旋回出现在馆陶组上段上部中期旋回基准面下降期(图2B), 为不对称旋回。短期旋回的上升半旋回由厚度较薄的河道砂岩组成, 下降半旋回则由干燥冲积平原垂向加积作用形成的棕红-砖红-紫色及杂色泥岩组成, 具土壤结构, 局部可见钙质结核, 层理不发育。

1.1.2 高可容纳空间短期旋回

馆陶组上段高可容纳空间短期旋回出现在中期旋回中部(图2C)。旋回对称性强, 主要由潮湿冲积平原灰绿色、棕褐色泥岩夹薄层决口扇与漫岸粉砂岩组成, 常常缺乏较厚的河道砂岩。最高可容纳空间处甚至可出现暂时性水体中形成的薄层灰色钙质泥岩。

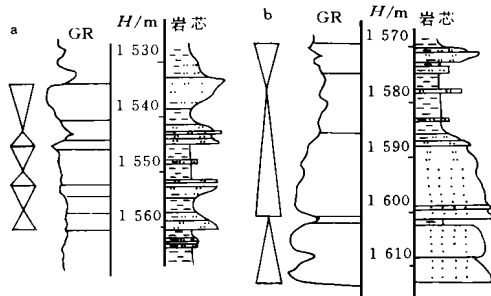


图3 埕北9井短期旋回的测井响应模型

a—潮湿冲积平原与决口扇、决口河道复合体;
b—河道相与小型决口扇

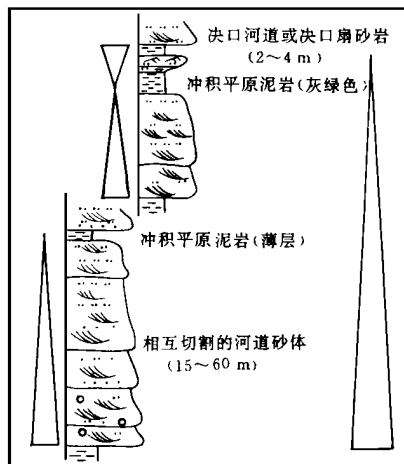


图1 下部中期旋回内短期旋回
相序特征

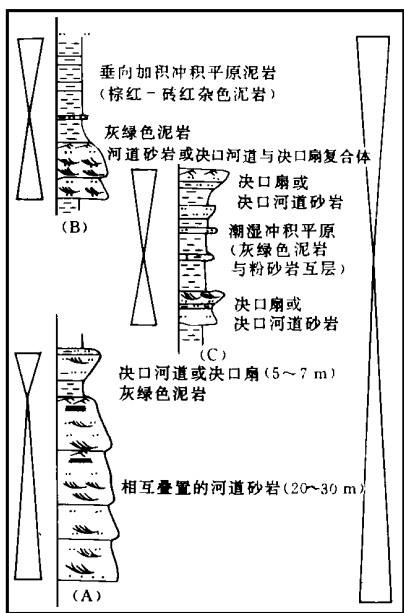


图2 中、上部中期旋回内短期旋回
相序特征

1.2 测井曲线基准面旋回的标定

测井曲线基准面旋回的确定, 特别是旋回界面的确定, 是在对取芯井段标定的基础上进行的。也就是说, 首先要利用取芯段建立短期旋回及界面的响应模型, 用于区域取芯井测井曲线的旋回划分。图3为根据自然伽马(GR)与岩芯标定后建立的

响应模型, 用于区域取芯井测井曲线的旋回划分。图3为根据自然伽马(GR)与岩芯标定后建立的

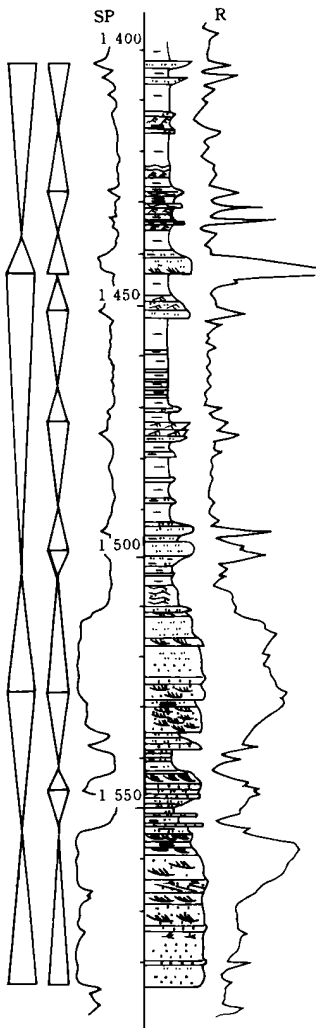


图4 取芯井段短期旋回与中期旋回相序特征

短期旋回的测井响应模型。图4为根据测井曲线确定的短期旋回及依据短期旋回相组合的变化和叠加样式识别的中期旋回。可以看出,中期旋回的转换位置,即最大可容纳空间的沉积多为潮湿冲积平原集中发育处,代表了地下水位较高时期;而中期旋回顶底界面分别为较大的冲积河道底部和干燥的冲积平原土壤组合,前者表明基准面下降到地表之下或与地表重合,后者代表地层长期出露地表的非沉积作用面。

1.3 井-震对比与地震地层分析

1.3.1 地震地层旋回识别

地震反射界面基本是等时面或平行于地层内的等时界面,而地层基准面旋回与界面具有成因地层单元和时间界面的含义,因此地震反射界面应平行于或相当于基准面旋回界面。

沉积剖面可以为水平或近于水平的,也可以是倾斜的,控制了沉积物堆积时沉积面的梯度。在沉积面为水平的地理位置,地层近于水平并相互平行,沉积相界线与层面一致,层的界面同时具有时间界面的意义。在这种情况下,地层的波阻抗差产生与层面平行又与时间界面平行的反射。研究区馆陶组上段地震反射面大致具有上述性质。

由于馆陶组上段的河流相沉积多表现为近于平行的水平反射,地震层序与界面的识别,很难以大陆边缘或海(湖)斜坡沉积中,常用的不整合或反映地层不协调的地震发射终止类型来分析,因而,地震地层的确定,是通过合成记录将自然电位与电阻率转换成双程传播时间坐标,对连井地震剖面进行标定,并结合地层旋回界面的地震标志和地震相的区域变化分析来进行的。

1.3.2 地震相的地质意义

根据井-震对比与以沉积学为基础的地质解释,可将馆陶组上段河流亚相的地震相特征概括如下:

(1) 低可容纳空间河道砂岩底部冲刷面,形成于区域基准面下降到地表之下时期。当基准面逐渐上升时,形成纵向上相互叠置、横向上叠加成片,分布较为稳定的辫状河道砂体。砂岩本身厚度较大,含泥少,均质性较强,因而易形成弱反射或无反射特征。

(2) 较高可容纳空间的河道砂岩较少叠置或为孤立河道砂岩,厚度较薄。砂岩向上变细明显,砂体非均质性较强,横向上延伸范围有限,因而地震反射应为冲积平原泥岩弱反射背景中的不连续,延伸范围较小的较强振幅、断续-较连续反射特征。

(3) 决口扇与决口河道复合体多发育在河道低部位,充填河道附近的冲积平原低地,沉积过程表现为低地缓倾地形上的进积或前积作用。决口扇分布面积较广,因而地震剖面上应表现为在潮湿平原与加积冲积平原厚层泥岩形成的弱反射背景中,具低角度,有时为叠瓦状的前积、中-中强振幅的反射。

1.3.3 地震地层旋回特征

馆陶组上段地震剖面的分辨程度, 决定了在地震反射中可以识别出与钻井中期基准面旋回相应的4个地震旋回, 自下而上, 分别命名为MSC1, MSC2, MSC3, MSC4, 各具特定的地震相特征(图5)。

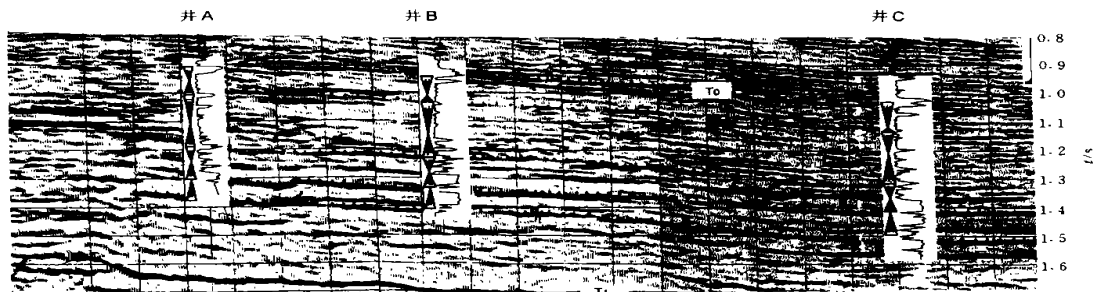


图5 沾化凹陷滩海地区馆陶组上段基准面旋回井-震对比

MSC1旋回底界面为基准面下降到地表之下河道冲刷作用形成的区域不整合面, 其上见地层自东向西的上超现象。旋回内部表现为弱反射地震相, 代表较低的可容纳空间形成的垂向上相互切割、横向叠置厚度大的连片的辫状河道砂体。MSC2中期旋回地震反射特征与 MSC1旋回大致相似, 但由于可容纳空间较下部增大, 保持了基准面下降半旋回。在该旋回内, 基准面由上升到下降的转换位置为强振幅、较连续反射, 代表该基准面旋回中最大可容纳空间沉积的泛滥盆地泥岩。MSC3, MSC4中期旋回与 MSC1, MSC2中期旋回的反射特征迥然不同, 以弱反射为背景, 局部与断续、较强振幅反射交互, 代表冲积平原泥岩与孤立河道砂体局部呈叠瓦状、低角度、弱至中振幅反射特征, 为冲积平原泥岩、决口扇、决口河道沉积组合。

2 高分辨率地层对比格架

尽管中期旋回内的相组合在平面上有较大的变化, 但由于厚度、旋回对称性变化较小, 仍可在胜海区较大范围内进行追踪与对比。同时, 由于三维地震剖面可分辨的地层单元也可与钻井、测井中可识别出的中期旋回相对应, 而且地震相与几何形态也可用中期旋回的性质加以解释及预测, 因而中期旋回是胜海区高分辨率地层格架建立与对比的基础(图5)。

根据高分辨率地层对比原则与方法^[1,2], 每一个中期基准面转换的位置均记录了基准面旋回变化中可容纳空间增加到最大值或减小到最小值单向变化的极限位置, 即基准面旋回二分时间单元界线。因而基准面旋回上升到下降或下降到上升的转换点可作为地层对比的优选位置, 由此可进一步将4个中期旋回划分为7个在地震剖面上可追踪, 平面上可作图的时间地层单元。

高分辨率地层对比格架为时间地层对比格架, 以其为基础可在赋予了地质内涵的地震剖面之上对砂体分布作预测。

3 河流储层预测

3.1 河流-冲积相储层的形成与演化

下第三系沉积后, 东营运动使盆地基底抬升, 造成区域地层基准面的下降, 东营组不同

程度地遭受剥蚀, 形成广泛的不整合, 底砾岩发育。之后, 盆地整体坳陷, 区域基准面上升, 堆积了上第三系河流-冲积平原为主的地层。早期, 由于可容纳空间低, 低 A/S 比值导致辫状河道发育, 沉积了以巨厚的砂砾岩为主的地层。随着基准面上升, 可容纳空间增大, 砂岩单层厚度向上减薄, 顶部泥岩增多, 构成上第三系馆陶组的第一个长期基准面旋回沉积, 即馆陶组下段。其后, 基准面又开始下降, 但下降幅度较东营组末期小。该下降旋回以馆陶组上段底部普遍发生的河道下切作用为特征。之后, 基准面又逐渐上升, 形成馆陶组第二个长期基准面旋回, 即馆陶组上段。旋回界面以馆陶组上段早期底部冲刷面及上覆 MSC1 不对称半旋回中相互叠置的辫状河道砂岩发育为标志。随 A/S 比值逐渐增大, MSC2 底部砾岩尽管仍具辫状河道砂岩特征, 但砂岩叠置层数减少, 单层厚度增大, 并发育了较厚冲积平原和基准面下降旋回的沉积。随着基准面进一步抬升, A/S 比值增大, 辫状河道环境逐渐演化成低弯度河流-冲积平原环境, 河道砂岩较少叠置, 多为孤立状, 分布于冲积平原泥岩中, 以 MSC3 为代表。河道砂岩多与下覆泥岩平整突变接触, 下切作用并不明显, 表明盆地基底一直处于坳陷稳定沉降期, 基准面位于地表之上或与地表重合, $A/S > 1$ 。之后, 基准面开始下降, 加之气候干燥, 逐渐形成了以棕红色-砖红色泥岩垂向加积作用为主的干燥冲积平原泥岩沉积, 以 MSC3 上部及 MSC4 旋回为代表。

3.2 储层时空分布特征

馆陶组上段沉积处于盆地基准面又一次上升时期, 随着可容纳空间的增大, A/S 比值的增加, 河道经历了由辫状河到低弯度曲流河的演化, 砂岩厚度向上逐渐减小, 层数减少, 粒度变细。河道砂岩在馆陶组中下部(MSC1, MSC2) 以辫状河道为主, 厚度一般为20~50 m, 由细砂岩为主组成, 均质性好, 横向上延伸距离广, 具连片分布特征, 但缺少良好的盖层或侧向封堵层。馆陶组中上部(MSC3, MSC4) 储层主要为发育于冲积平原内的独立河道砂岩、点砂坝、决口河道与决口扇, 单层厚度5~15 m(图6)。由于河道的频繁改道, 它们在时间上与空

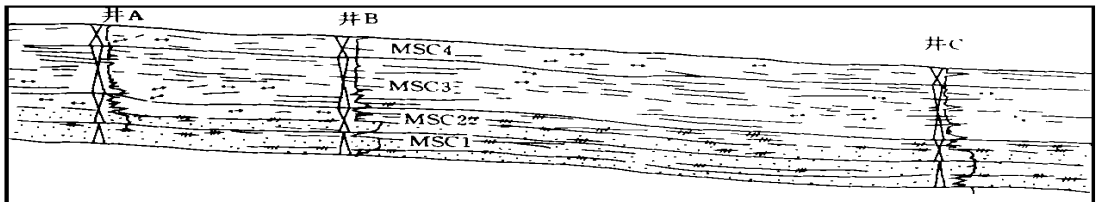


图6 沾化凹陷滩海地区馆陶组上段地震解释剖面

间上分布复杂, 且不连续, 横向连通性差, 多呈透镜状夹于冲积平原泥岩之间。因而作为储层多具独立的油气系统, 不同的油层间很难找到统一的油水界面。砂岩物性好, 孔隙度为35%, 平均渗透率达 $6\,172 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。与馆陶组下段大面积分布的辫状河道砂岩相比, 易在构造上倾向方向因砂体尖灭而形成岩性圈闭。加之临界泥岩盖层的封堵及区域盖层的存在, 含油性好, 含油饱和度高, 是馆陶组上段的主要储层。

MSC3和MSC4中河道砂岩储层分布具有一定的规律性。以MSC3为例, 基准面上升半旋回河道和低弯度曲流河砂坝发生频率较高的区域(地震上多呈强振幅反射), 与基准面下降半旋回河道和曲流河砂坝集中发育位置恰好错开。也就是说, 在同一地理位置上, 基准面上升期河道集中发育部位, 在基准面下降期以冲积平原及充填其间的决口扇砂发育为主(地震剖面上

为弱反射背景上的断续中振幅反射)。反之，基准面上升期冲积平原较发育区，在基准面下降期河道迁移至该区。河道集中分布区空间演化的这种规律性的产生，主要是地形高差效应；而地形的高低随时间的迁移可能有两个主要原因：（1）河道发育的地理位置是多期曲流河砂体叠加的综合结果，当沉积物补给充分，则使地形增高，造成河流改道或发生决口，在基准面下降期河道集中出现在原来的地形洼地上，即冲积平原位置；（2）河道砂岩与冲积平原沉积差异压实的结果造成厚度差，由此也导致地形的变化。上述规律为河道储层横向预测提供了依据，图7分别为某井区 MSC3旋回上升半旋回与下降半旋回主河道砂体的分布特征，可以看出在基准面旋回变化中，主河道砂体分布地理位置的迁移。

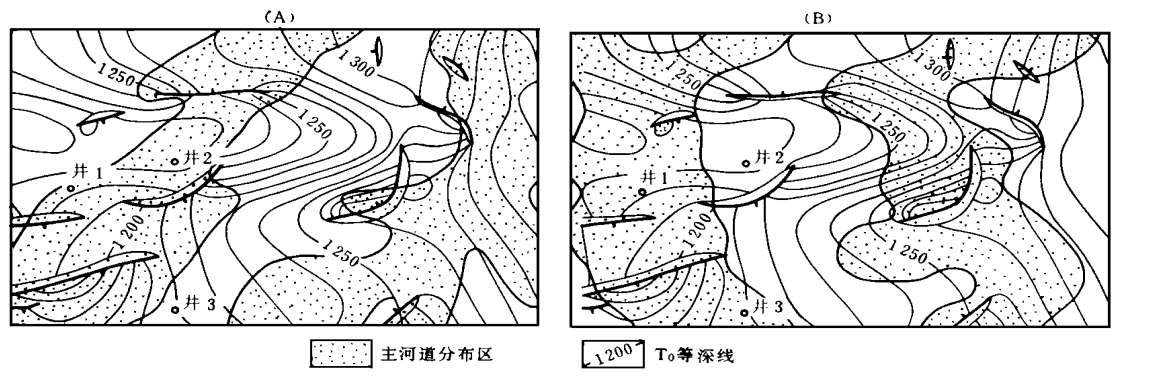


图7 一个完整的基准面上升(A)和下降(B)旋回的主河道砂体分布图

4 结束语

冲积-河流相层序地层分析表明在地层基准面、体积分配、相分异等基本原理基础上建立的高分辨率层序地层划分与对比技术同样适用于陆相地层。该理论与对比技术能加深对冲积-河流相地层形成发育和演化，以及相分布特征的认识，从而提高河流相储层预测的精度。

参 考 文 献

- 1 邓宏文. 美国层序地层研究中的新学派——高分辨率层序地层学. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 90~97
- 2 邓宏文, 王洪亮, 李熙. 层序地层地层基准面的识别、对比技术及应用. 石油与天然气地质, 1996, 17(3): 177~184

(转第114页)

constructed based on the analyses of seismic data and well-logs. (1) The onlap curve that represents base-level changes could be obtained by the correlation of differential subsidence, decompaction and stratigraphic restoration based on the identification of basin-margin onlap, coastal onlap and marine onlap in seismic sections. (2) Milankovitch cycles could be identified through spectral technique of well-logs; accommodation curve reflecting base-level cycles could be established by means of corrected Fischer plot. Sedimentary base-level curves obtained by different analysis techniques of seismic sections and well-logs in North Tarim show good consistency, and they could be in the analyses of sequence stratigraphy, determination of sequence orders, correlation of interwell strata units and the study of tectonic and depositional histories of a basin.

(上接第95页)

**APPLICATION OF HIGH-RESOLUTION SEQUENCE
STRATIGRAPHIC CORRELATION
TO FLUVIAL FACIES**

Deng Hongwen Wang Hongliang
(*China University of Geosciences, Beijing*)

Li Xiaomeng
(*Shenghai Company, Dongying, Shandong*)

Abstract

The Upper Guantao Formation of the Tertiary in Shenghai Region, Jiyang Depression is dominated by fluvial flood plain facies. Different scales of sequence cycles could be identified according to the cores, logs and seismic data of the formation. Short-term base level cycles could be identified based on rock cores, intermediate-term base level cycles could be identified through log-seismic data correlation. Then the principle of the base level cycles was used to build high resolution isochronous stratigraphic correlation framwork, study the evolution property and the process of fluvial sequences, predict the spatial distribution of oil reservoirs.