

# 层序地层地层基准面的识别、 对比技术及应用

邓宏文 王洪亮

(中国地质大学, 北京 100083)

李熙喆

(石油勘探开发科学研究院, 北京 100083)

高分辨率的等时地层对比的关键是识别地层记录中代表多级次的基准面旋回的多级次的地层旋回。每一级次的地层旋回内必然存在着能反映相应级次基准面旋回所经历时间的痕迹, 其沉积和地层特征主要为: (1)单一相物理性质的垂向变化; (2)相序和相组合变化; (3)旋回叠加样式的改变; (4)地层几何形态与接触关系。这些特征均反映可容纳空间和沉积物补给通量比值( $A/S$ )的变化。露头剖面、钻井剖面具有较高的分辨率, 是高级次旋回识别的基础, 可识别短期基准面旋回; 测井曲线基准面旋回的确定, 是在建立测井响应模型的基础上根据短期旋回的叠加样式识别中期基准面旋回; 地震剖面由于受分辨率的限制只能识别中长期基准面旋回。基准面旋回的转换点, 可作为高分辨率等时地层对比的优选位置, 即基准面旋回的二分时间单元的划分界线。时间-空间图解是对地层剖面进行时间-空间反演的最有效方法, 有助于检验层序对比的可靠性。几个具体应用实例说明, 基准面旋回识别和旋回等时地层对比技术虽源于海相地层, 但在非海相地层中, 其原理和方法仍然适用。

**关键词** 层序地层 基准面旋回 识别 对比技术 等时对比 应用

**第一作者简介** 邓宏文 女 50岁 教授 石油地质

高分辨率层序地层学理论的核心是: 在基准面旋回变化过程中, 由于可容纳空间与沉积物补给通量比值( $A/S$ )的变化, 相同沉积体系域或相域中发生沉积物的体积分配作用, 导致沉积物的保存程度、地层堆积样式、相序、相类型及岩石结构发生变化。这些变化是其在基准面旋回中所处的位置和可容纳空间的函数。基准面旋回所控制的地层单元的地层分布型式是有规律可循的, 因此是可以预测的。

高分辨率层序地层学是对地层记录中反映基准面变化旋回的时间地层单元的多元划分<sup>[1]</sup>, 因而该理论与技术应用的关键, 是如何在地层记录中识别代表多级次基准面旋回的多级次地层旋回, 并进行高分辨率的等时地层对比。这也是本文要论述的主要内容。

## 1 基准面旋回的识别与对比技术

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空间迁移的地层响应<sup>[1]</sup>。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能反映相应级次基准面旋回所经历时间的“痕迹”,如何据一维钻井或露头剖面上的这些“痕迹”识别基准面旋回,是高分辨率层序划分与对比的基础。

### 1.1 基准面旋回的识别

用来识别基准面旋回的沉积与地层特征可以概括为:(1)单一相物理性质的垂向变化;(2)相序与相组合变化;(3)旋回叠加样式的改变;(4)地层几何形态与接触关系。这些特征均反映着可容纳空间和沉积物补给通量比值( $A/S$ )的变化。

#### 1.1.1 岩性剖面上的识别标志

岩芯、钻井剖面,特别是三维露头剖面,较测井、地震反射剖面具有更高的分辨率,因而是高级次旋回识别的基础。在岩性剖面上,旋回界面识别标志如下:

(1) 地层剖面中的冲刷现象及其上覆的滞留沉积物,其或代表基准面下降于地表之下的侵蚀冲刷作用,或代表基准面上升时的水进冲刷面。后者与前者的区别是冲刷面之上多见盆内屑,且幅度较小。

(2) 作为层序界面的滨岸上超的向下迁移,在钻井剖面中常表现为沉积相朝盆地方向移动,如浅水沉积物直接覆于较深水沉积物之上,河流、浊流砂砾岩直接覆于深水泥岩之上,两类沉积之间往往缺失过渡环境沉积。

(3) 岩相类型或相组合在垂向剖面上转换的位置,如水体向上变浅的相序或相组合向水体逐渐变深的相序或相组合的转换处。

(4) 砂、泥岩厚度旋回性变化,如层序界面之下,砂岩粒度向上变粗,砂泥比向上变大;层序界面之上则反之。这种旋回的变化特征常以叠加样式的改变表现出来。

根据上述特征可在不同沉积环境中识别短期基准面旋回(图1)。

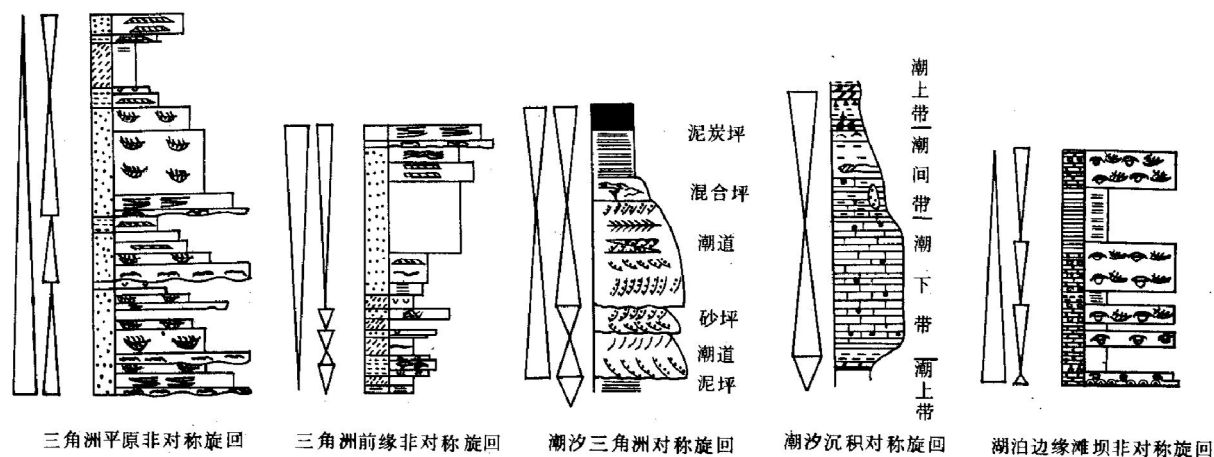


图1 不同沉积环境下识别出的短期旋回特征

#### 1.1.2 测井曲线识别标志

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,首先要利用取芯井段建立短期旋回及界面的测井响应模型,用以指导区域非取芯井测井曲线的旋回划分。测井曲线对于较长期基准面旋回叠加样式的分析确定尤为有

效,这是因为组成较长  
期旋回的短期旋回特定  
的叠加样式,是在较长  
期基准面旋回上升与下  
降过程中向其幅度的最  
大值(最大可容纳空间)  
或最小值(最小可容纳  
空间)单向移动的结果,  
也就是在大致相似的  
地质背景下形成的一  
套成因上有联系的岩  
石组合。这些叠加样式  
常常具有鲜明的测井响  
应(图2),向湖(海)盆  
方向推进的叠加样  
式(进积)形成于较长期  
基准面下降期,此时

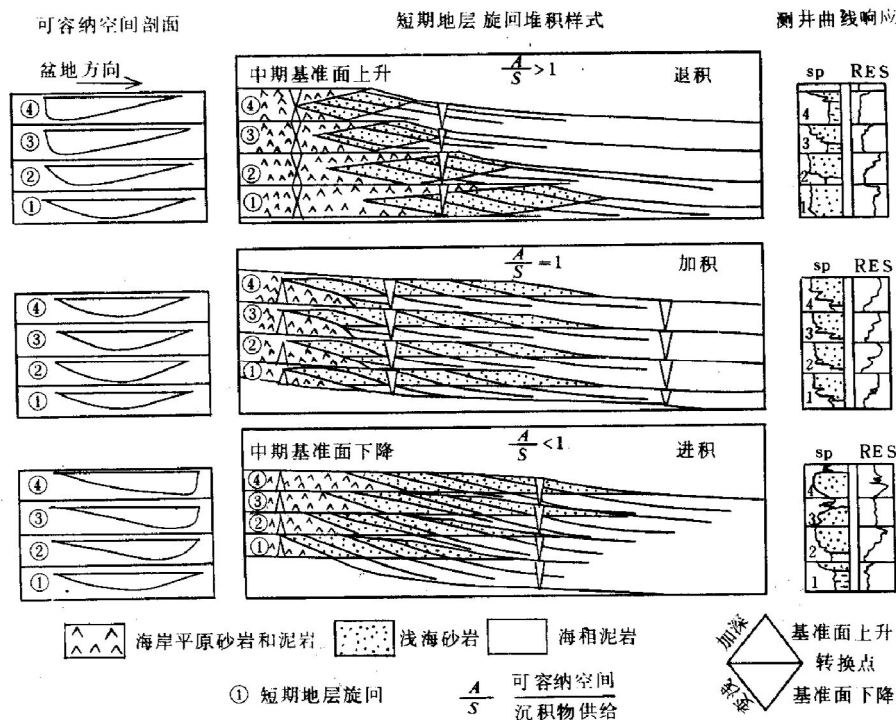


图2 短期旋回叠加样式及其测井响应\*

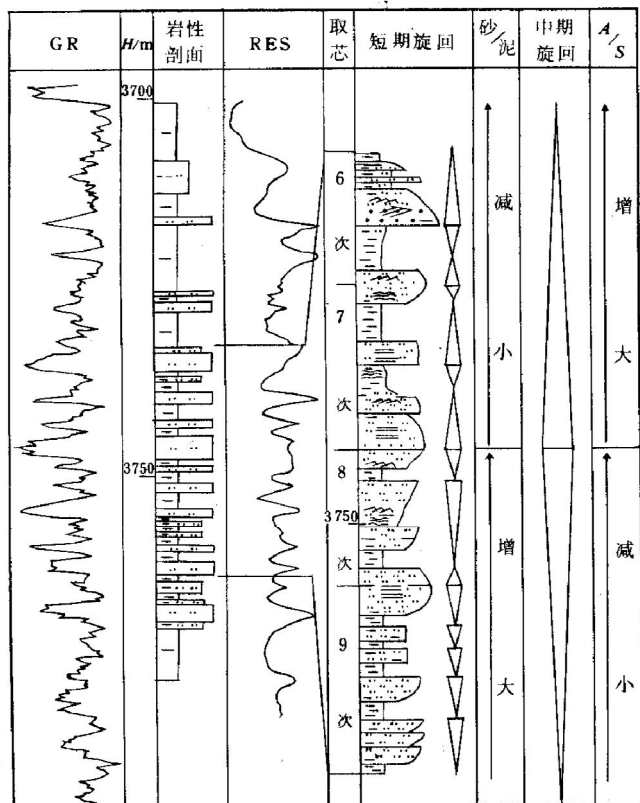


图3 进积-退积对称型中期基准面旋回  
岩性-电性响应

$A/S < 1$ ,即沉积物供给速率大于可容纳空间增加速率,岩石学方面的性质与下伏旋回相比具可容纳空间减小的特征;向陆推进的叠加样式(退积)形成于较长期基准面旋回的上升时期,此时 $A/S > 1$ ,即可容纳空间增加速率大于沉积物供给速率,上覆短期旋回的性质与相邻下伏旋回相比,在沉积学、岩石学方面表现出可容纳空间增大的特征;短期旋回呈加积叠加样式,则出现在较长期基准面旋回上升到下降的转换时期, $A/S = 1$ ,相邻短期旋回形成时可容纳空间变化不大。东濮凹陷前梨园洼陷沙河街组三段,说明如何运用测井曲线中短期旋回的叠加样式分析中期基准面旋回(图3)。

#### 1.1.3 地震剖面上的识别标志

地震反射界面基本是等时的或平行于地层内的时间面,因而可以运用地震反射剖面进行基准面旋回分析;但受地震信息分辨率的限制,地震反射剖面通常只能用来识别长

\* Cross T A. High-resolution stratigraphic correlation from the perspective of base-level cycles and sediment accommodation. 西北欧层序地层会议材料, 1994

期基准面旋回。用于识别旋回界面的主要地震标志如下:

(1) 区域分布的不整合或反映地层不协调关系的地震反射终止类型,即常规的地震地层分析标志。

(2) 与中期或长期基准面旋回上升到下降转换位置(最大可容纳空间),相对应的高振幅连续反射界面或一组反射。

(3) 与测井曲线和岩芯观察到的区域相变可对比的地震反射特征(振幅、连续性、频率、地震相等),在区域上发生重大变化。

(4) 与测井曲线和岩芯中可观察到的地层叠加样式变化可对比的地震反射几何形态的变化(如由高振幅、水平反射到低振幅S形反射)。

图4为运用地震剖面识别出的中期基准面旋回(东濮凹陷沙河街组三段)。

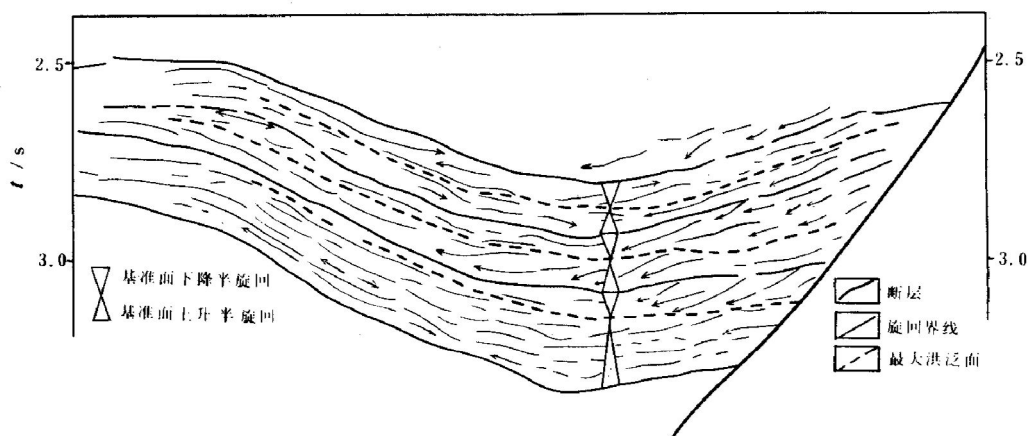


图4 地震剖面上识别出的中期基准面旋回

依据露头、岩芯、测井与地震剖面确定的基准面旋回要相互验证。较低级次的测井旋回的识别须在岩芯、露头标定的基础上进行,其划分结果还可以通过合成地震记录及转换成双程旅行时间的测井曲线,将地震不整合或其它类型界面标定到钻井中去验证。而地震旋回边界的识别也要以连井剖面上的测井旋回分析为基础。

## 1.2 地层旋回等时对比技术

高分辨率地层对比是同时代地层与界面的对比,不是旋回幅度和岩石类型的对比,一个完整的基准面穿越旋回及与其伴生的可容纳空间的增加与减小,在地层记录中由代表二分时间单元(每部分分别代表基准面上升与下降)的完整的地层旋回组成,有时仅由不对称的半旋回和代表侵蚀作用和非沉积作用的界面构成。

Cross 认为\*,在成因层序的对比中,基准面旋回的转换点(turnround point),即基准面由下降到上升或由上升到下降的转变位置,可作为时间地层对比的优选位置。因为转换点为可容纳空间增加到最大值或减少到最小值的单向变化的极限位置,即基准面旋回的二分时间单元的划分界线。转换点在地层记录中某些位置表现为地层不连续面,某些地理位置则表现为连续的岩石序列。岩石与界面出现的位置和比例,是可容纳空间和沉积物供给的函数。因而在对比中,要通过地层过程的分析掌握什么时候岩石与岩石对比、岩石与界面对比或面与面对比。时间-空间图解是对地层剖面进行时间-空间反演的最有效的方法,极有助于对地质过

\* Cross T A. 1994 annual report, department of geology and geological engineering, Colorado School of Mines

程(时间+空间)的地层响应(岩石+界面)的理解,并有助于确定什么时候岩石对比岩石、岩石对比界面或面面对比,以检验层序对比的可靠性。

由于基准面变化的地层记录是以多级次频率(多级次旋回)出现在区域范围内,可跨越各种沉积环境,因而以地层基准面识别为基础的地层对比不依赖于沉积环境,也不须要了解海平面的位置与运动方向。

图5为海岸平原-浅海沉积环境地层层序的堆积模式、厚度的时空变化以及层序地层对比。

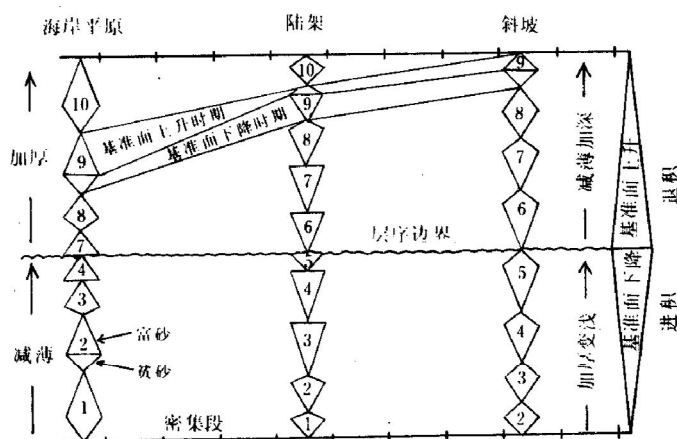


图5 浅海沉积环境成因地层动态对比概略图\*

## 2 高分辨率层序地层学在非海相地层中的应用

由于基准面旋回体现了包括海平面升降变化在内的多因素的控制作用,因而源于海相地层的以基准面旋回为参照格架的高分辨率层序地层分析方法,同样可适用于陆相沉积。

### 2.1 实例1: 美国中西部第三纪尤英塔盆地

位于美国中西部落基山脉的尤英塔盆地,为在早白垩世前陆盆地背景上发展起来的大型山间坳陷盆地。

作者对美国中西部尤英塔盆地南部始新统绿河组河流三角洲-湖泊相进行了高分辨率地层研究,识别出四个长期基准面旋回,并建立了成因层序对比模式(图6)。在地层基准面旋

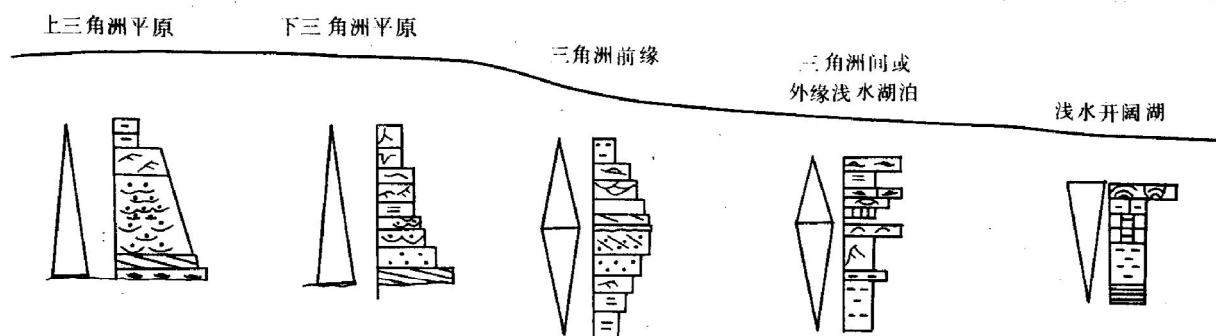


图6 尤英塔盆地南部始新统河流三角洲-湖泊相域体积划分与旋回对称性变化<sup>[1]</sup>

回中,伴随着可容纳空间与沉积物供应比值的变化,相同的沉积环境,如三角洲、边缘湖泊及开阔湖泊,可发育不同的岩石类型、相序与相组合。在同一成因层序内,旋回特征也有明显规律可循。三角洲平原相主要为基准面上升时期形成的分支河道相和河道间沉积组成的不对称旋回;三角洲发育的湖泊边缘相,为基准面上升时期堆积的分支河道相和下降时期的滨

\* Cross T A. High-resolution stratigraphic correlation from the perspective of base-level cycles and sediment accommodation. 西北欧层序地层会议材料, 1994

湖相或河口坝相构成的对称旋回。三角洲向浅水湖泊相方向,则表现为基准面上升期间形成的碳酸盐滩坝相和基准面下降期形成的泥坪相组成的对称旋回,向盆地方向主要由基准面下降时期浅水湖泊相非对称旋回组成。在盆地的不同演化阶段,长期基准面旋回的地层结构、沉积模式、短期旋回的对称性、沉积相域的体系划分均有显著差异。进一步研究还证明,分支河道砂岩的孔隙度与渗透率的变化,也与其所属成因地层单元在长期基准面旋回中的位置有关。尤英塔盆地始新统河湖相研究说明,可以根据成因地层的体积划分、堆积模式、旋回对称性及相分异原理,对湖相地层与油气储层进行高分辨率层序划分、对比与预测。

## 2.2 实例2: 哥伦比亚第三系 Lianos 盆地

哥伦比亚 Lianos 盆地 Cusiana 油田是近 10 年发现的大油田。最初认为始新世 Mirador 组储层主要为下切于冲积平原中的河道砂岩和下切于海湾砂泥岩中的微咸水河道砂岩。由于以陆相沉积为主,对比十分困难,砂岩展布规律难寻,但运用基准面旋回反演和对比技术,在 Mirador 组内识别出两个不对称的长期基准面旋回(图 7),每个长期旋回中又可识别出 3~4

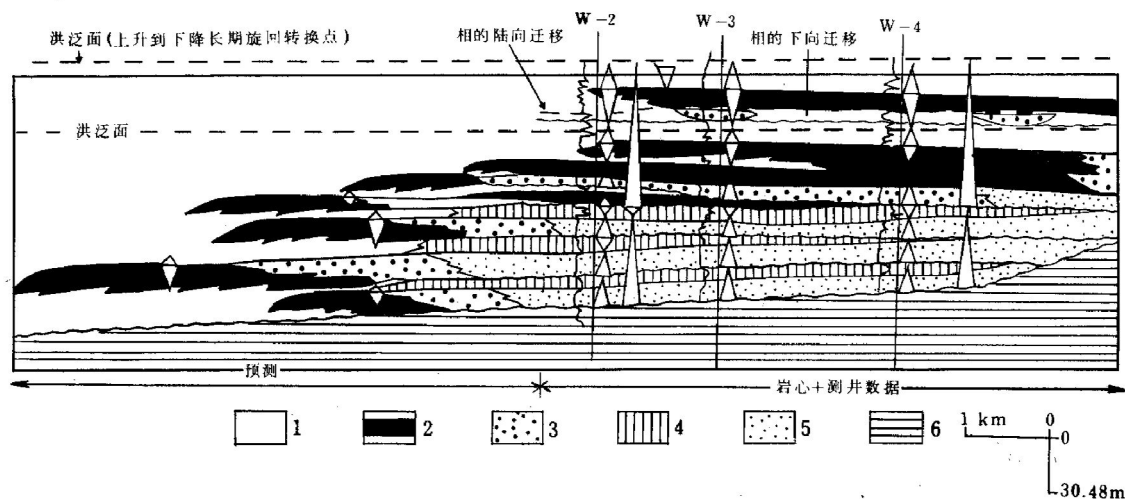


图 7 哥伦比亚 Cusiana 油田 Mirador 组高分辨率层序地层对比格架\*

1—湾/河口湾砂岩; 2—湾头三角洲; 3—河道(微咸水影响); 4—湖-洪泛平原-决口扇复合体; 5—冲积河道带;  
6—前始新世岩屑砂岩和泥岩

个中期旋回。下部长期旋回由上超到古新世不整合之上的 3 个向陆方向进积的中期旋回组成,每个中期旋回的上升半旋回均由槽状交错层河道砂岩→小型槽状交错层理粉细砂岩→波状层理决口扇粉细砂岩→生物扰动发育的纹层状湖相泥岩组成,反映可容纳空间逐渐增大;中期下降半旋回则为洪积平原杂色致密泥岩。由此两个中期旋回可能成为独立的流体流动单元。上部长期旋回由上超在 Mirador 组中部页岩内间断面之上的,一系列向陆方向进积的由微咸水河道(上升半旋回)和湾头三角洲砂岩(下降半旋回)组成的中期旋回构成,顶部则以区域分布的海相泥岩(洪泛面)告终。

上述解释和对比表明,海岸平原相带以砂泥岩充填作用为主的地层堆积样式并非“迷宫式”,而是有规律可寻的。由此以有限的测井和少量岩芯资料建立的高分辨率对比格架及储层分布特征的解释,不仅可以直接指导油区勘探与开发,而且可以对非钻井区储层成因类型及展布特征进行预测(图 7 左)。

\* Cross T A. High-resolution stratigraphic correlation from the perspective of base-level cycles and sediment accommodation. 西北欧层序地层会议材料, 1994

### 2.3 实例3：渤海湾盆地济阳坳陷上第三系

济阳坳陷沾化凹陷滩海地区上第三系馆陶组为主要油气产层之一。馆陶组形成于裂谷盆地坳陷期，为冲积河流相为主的沉积，地层对比十分困难。地震剖面多表现为近于平行的强弱振幅交互的反射特征，很难用常规的地震层序分析方法(依据几何形态与反射终止类型)进行层序划分与解释。作者首先依据岩芯与测井资料在馆陶组上段识别出4个中期基准面旋回(厚度60~180 m)，并对旋回内砂体堆积样式、成因类型等进行了解释。之后，根据合成地震记录进行井-震对比，发现每个中期旋回均与地震剖面上特征的地震相对应(图8)，但由于可容纳空间的变化，在不同中期旋回及同一旋回的不同位置，地震反射的地质意义却不尽相同。

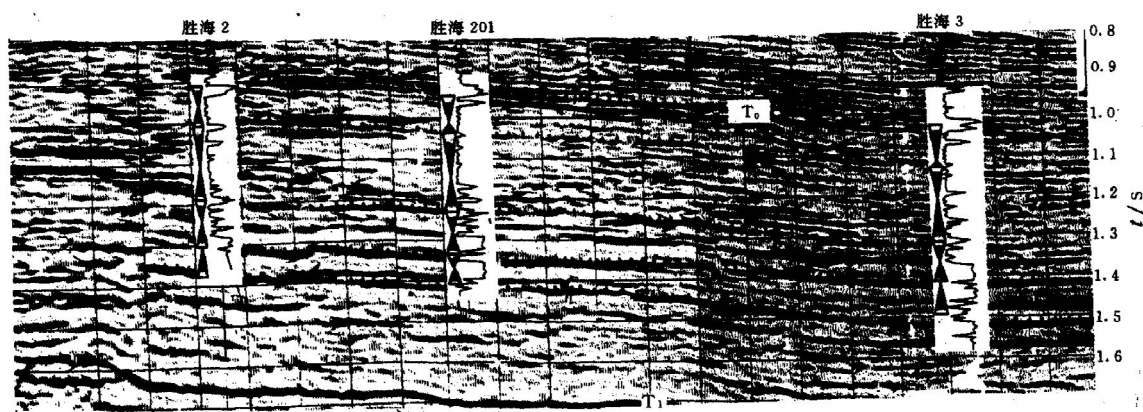


图8 沾化凹陷滩海地区馆陶组上段基准面旋回井-震对比

自下而上，第1个中期旋回底界面为基准面下降到地表之下的河道冲刷作用形成的区域不整合面，旋回内部表现为弱反射地震相，为较低可容纳空间下形成的垂向上相互切割、横向上叠加连片的辫状河道砂体；第2个中期旋回地震反射特征与第1个旋回大致相似，但由于可容纳空间较下部增大，保存基准面下降旋回，基准面上升到下降的转换位置为强震幅、断续-较连续地震反射，代表最大可容纳空间时的泛滥盆地泥岩；第3、4中期旋回与第1、2旋回的地震反射特征迥然不同，上升半旋回以弱反射为背景，局部与断续较强反射交互，代表冲积平原与分布其间的孤立河道砂体，下降半旋回表现为弱反射地震相，局部具略呈叠瓦状、低角度、中弱振幅地震反射特征，为冲积平原泥岩和决口扇、决口河道沉积组合。4个中期旋回均可在较大范围内追踪，由此可在赋予了地质内涵的地震剖面上对砂体分布作出预测。

### 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):89~97

# IDENTIFICATION AND CORRELATION TECHNIQUES OF SEQUENCE STRATIGRAPHIC BASE-LEVELS AND THEIR APPLICATION

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

Li Xizhe  
(*Research Institute of Petroleum Exploration &  
Development, CNPC, Beijing*)

## Abstract

The key of high resolution isochronostratigraphic correlation is to identify multi-order stratigraphic cycles that represent multi-order base-level cycles in stratigraphic record. There bound to exist certain marks recording the time that corresponding order base-level cycle experienced in each stratigraphic cycle. The sedimentary and stratigraphic characteristics of stratigraphic cycles are; 1. vertical variation in single-phase physical properties; 2. variation in facies sequences and facies assemblage; 3. changes in cyclic stacking pattern; 4. stratigraphic geometry and contact relation. These characteristics reflect the variation of the ratio between containing space and sediment alimentation. Outcrop profile and well profile have higher resolution, and could be used to identify short term base-level cycles; well log could be used to identify mid-term base-level cycles; seismic profile could only by used to identify mid to long term base-level cycles due to the limitation of its resolution. The turn-round point of base-level cycle would be selected as optimum position of high resolution isochronostratigraphic correlation. Time-space diagram is very effective on time-space inversion of stratigraphic profile and on checking the reliability of stratigraphic correlation. It has been proved by practice that the techniques could also be used in nonmarine strata.