

文章编号 :1000-0550(2002)02-0217-05

# 具有地形坡折带的拗陷湖盆层序地层模拟

胡宗全<sup>1</sup> 朱筱敏<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国石化勘探开发研究院 北京 100083) (<sup>2</sup>石油大学地球科学系 北京昌平 102200)

**摘要** 层序地层学研究已在陆相湖盆中取得良好的应用效果,在陆相湖盆的地层对比、沉积体系空间分布预测中发挥重要作用。拗陷湖盆在基底受压变形过程中,常在盆缘形成地形坡折带,以坡折为界,基底的沉降速率和原始地形坡度等控制层序发育的重要因素在其两侧均存在显著的差异,这在很大程度上控制了层序的发育模式和沉积体系的空间配置关系。通过对基底沉降速率、湖平面变化速率、沉积物充填速率、沉积物充填准则、岩相确定原则等数学模型的建立,模拟了具有地形坡折带的拗陷湖盆的层序发育和相演化过程。实际资料与模拟结果的对比分析表明,模拟具有很好的效果。

**关键词** 层序地层 拗陷湖盆 地形坡折带 可容空间增长速率 沉积物充填速率 计算机模拟

**第一作者简介** 胡宗全 男 1971年出生 博士后 储层及油藏地质研究

中图分类号 P539.2 文献标识码 A

## 1 前言

层序地层学是近十几年来迅速发展起来的一门地质学分支,它所倡导的等时地层对比原则具有更高的科学性和可操作性,对沉积体系的预测具有更高的精度。20世纪90年代我国的研究者针对中国含油气盆地多为陆相盆地的研究需要,成功地将层序地层学引入到陆相盆地研究领域,取得了丰硕的理论研究成果<sup>[1~5]</sup>,并在各个含油气盆地研究中获得了良好的应

用效果<sup>[6~10]</sup>。

拗陷湖盆成盆过程中,基底受压往往在盆缘发生断裂形成地形坡折带(图1)。坡折带的存在及其对整个盆地基底沉降的分割作用,对层序发育和相分布模式产生重要影响,对具有坡折带拗陷湖盆的层序发育过程进行计算机模拟,可以进一步了解各种因素在控制层序发育及相演化过程中的作用方式,对于丰富拗陷湖盆的层序地层理论和确定层序划分原则等方面均有重要的意义。

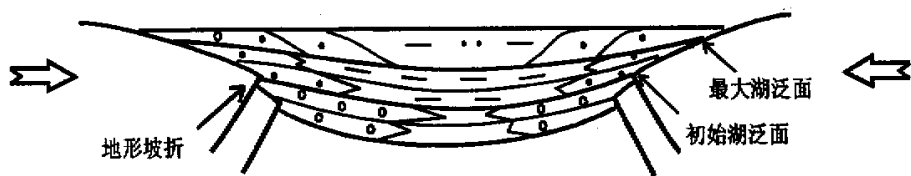


图1 具有地形坡折带的拗陷湖盆典型层序地层样式

Fig. 1 Typical sequence stratigraphic style of depression lake basin with topographic ramp

## 2 层序控制要素数学模型的建立

陆相层序地层理论认为层序的主要控制因素包括构造沉降、湖平面升降、沉积物供给和气候。基准面分

析原理仍是陆相层序发育过程中所遵循的基本原理<sup>[11]</sup>。

具坡折的拗陷湖盆原始地形可以简化为线性模型,其数学表达式为:

$$D(x) = \begin{cases} a_{11} - b_{11}x/x_1 & (x < x_1) \\ a_{12} - b_{12}(x - x_1)/(x_2 - x_1) & (x_1 < x < x_2) \\ a_{13} - b_{13}(x - x_2)/(x_3 - x_2) & (x > x_2) \end{cases}$$

式中  $a_{11}$ 、 $a_{12}$ 、 $a_{13}$  分别为原始地形最高点和坡折带顶、底点与沉积基准面之间的相对高程；

$b_{11}$ 、 $b_{12}$ 、 $b_{13}$  分别为凸起、坡折带和盆内的地形坡度；

$x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x$  分别为坡折带顶、底点、模拟最远点

$$V_2(x,t) = \begin{cases} a_{21}x/x_1 + b_2\sin(c_2 \times t) & (x < x_1) \\ v_{21} + a_{22}(x - x_1)(x_2 - x_1) + b_2\sin(c_2 \times t) & (x_1 < x < x_2) \\ v_{22} + a_{23}(x - x_2)(x_3 - x_2) + b_2\sin(c_2 \times t) & (x > x_2) \end{cases}$$

式中  $a_{21}$ 、 $a_{22}$ 、 $a_{23}$  分别为凸起、坡折带和盆内基底沉降速率的横向增加速度；

$b_2$ 、 $c_2$  分别为随时间变化的基底沉降速率正弦曲线的振幅和频率；

$v_{21}$ 、 $v_{22}$  分别为坡折带顶、底点的基底沉降初始速率；

$t$  为相对于 1 个层序周期的层序发育时刻。

湖平面的升降在横向上是一致的，其与时间之间为正弦函数关系，表达式为：

$$V_3(t) = a_3\sin(b_3 \times t)$$

式中  $a_3$ 、 $b_3$  分别为湖平面升降速率正弦曲线的振幅和频率；

可容空间增长速率就是基底沉降速率与湖平面变化速率之和。

陆相盆地中沉积物供应十分充足，为了简化模型，认为沉积物充填速率在各个层序阶段是一定的，而由盆缘向盆地内部沉积物充填速率有小幅度的增大，其数学表达式为：

$$V_4(x) = a_4 + b_4x$$

式中  $a_4$  为模拟盆缘的基底沉降速率；

$b_4$  为基底沉降速率的横向增大速度。

沉积物对可容空间的充填原则是：通过设定一高程点为沉积基准面，高出沉积基准面的部分将被截平，此时沉积物顶面保持在沉积基准面处，这实际上是模拟了沉积过程和剥蚀作用过程。

岩相的确定方法以沉积物距沉积基准面的垂向距离来确定，该值越大，沉积物越接近湖相细粒沉积，反之则越接近陆相及过渡相的粗粒沉积，通过设定截止值来区分粗粒相和细粒相。

### 3 模拟过程及其分析

在原始地形设定中，坡折带的坡度应较凸起和盆地内有明显加大，基底沉降速率在凸起、坡折带和盆地内部是依次增大的，但增大速率在坡折带应该最大，基底沉降是可容空间最为重要的控制要素，对地层边界的控制级别要高于湖平面升降，所以基底沉降速率曲

和任一点距模拟盆缘的横向距离。

基底的沉降具有幕式旋回特征<sup>[12]</sup>。基底的沉降速率随时间的变化关系可设为一正弦曲线，同时由盆地边缘向盆地内部线性增加，在坡折底部，基底沉降速率具有突变，其数学表达式为：

线的振幅应大于湖平面升降速率曲线的振幅，沉积物充填速率应设定在可容空间增长速率值域内。

最终确定了各控制要素随层序周期的速率曲线（图 2），各层序发育时刻横向上可容空间变化速率与沉积物充填速率之间的对比关系见图 3，进而模拟了 1 个层序周期的层序发育过程（图 4）。

$t = 0 \sim 1/8$  层序周期，可容空间增长速率总体小于沉积物充填速率（图 3），此时湖区距坡折带较远，沉积物以充填盆底低洼地带为主，岩相以粗粒相为主（图 4）。

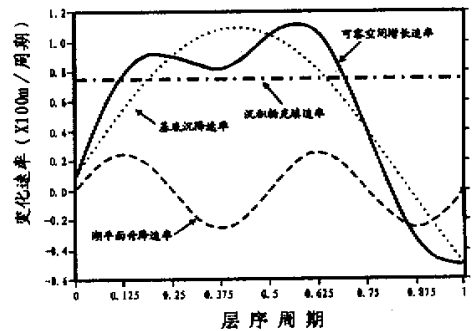


图 2 各层序控因随层序周期的变化特征

Fig. 2 Changing characteristics of several sequence controlling factors with sequence cycle

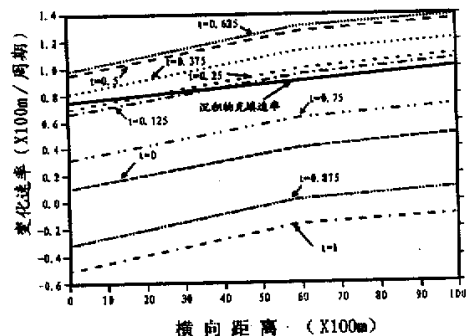


图 3 可容空间增长速率与沉积物充填速率的横向对比

Fig. 3 Lateral comparison between accommodating space increasing rate with sediments filling rate

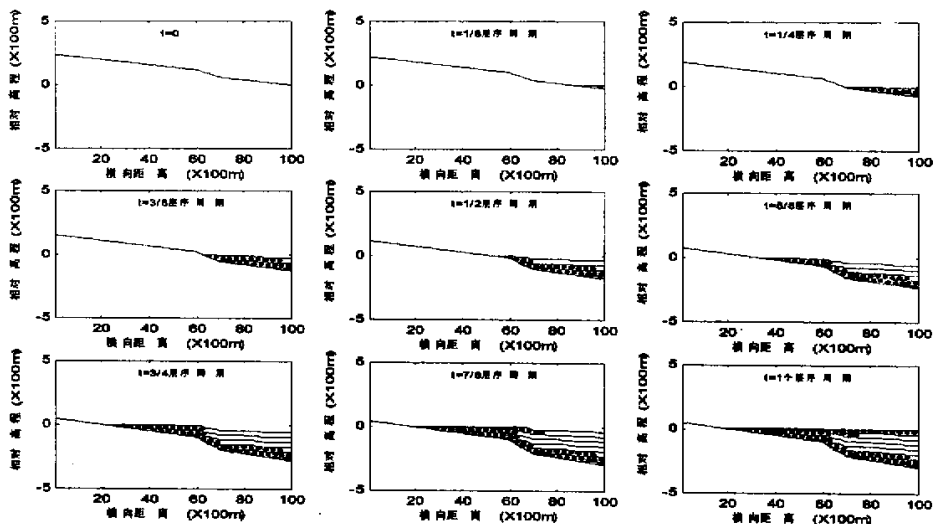


图 4 具有坡折带的拗陷湖盆层序地层发育和相演化过程计算机模拟

Fig. 4 Computer simulation of sequence developing procedure and facies evolution in depression lake basin with topographic ramp

$t = 1/4 \sim 3/8$  层序周期,除凸起部位的基底沉降速率仍小于沉积物充填速率外,坡折以下基底沉降速率已略大于沉积物充填速率(图 2,图 3),新增可容空间主要产生于坡折带以下地区,但此时可容空间增长速率与基底沉降速率之间相差不大,粗粒相仍占有相当的比例(图 4),此前的沉积为低位体系域,其填充补齐作用使坡折处的地形明显变缓。

$t = 1/2$  层序周期,可容空间的增长速率快速增大(图 2,图 3),由凸起到盆内均大于沉积物充填速率,湖水首次越过坡折,湖水水深逐渐增大,沉积物粗粒相所占比例开始降低,为初始湖侵期沉积(图 4)。

$t = 5/8$  层序周期,可容空间增长速率已经开始下降(图 2,图 3),但仍远高于沉积物充填速率,所以湖侵仍在继续,湖水水深持续增大,粗粒相主要分布在凸起之上,在坡折以下则完全被湖泊相细粒沉积所占据,为典型的湖侵体系域。

$t = 3/4$  层序周期,可容空间增长速率已经低于沉积物充填速率,但由于尚有大量可容空间未被充填,因此湖水还要在一定时期内保持深水,此时湖区达到最大,沉积以最大湖泛期细粒沉积为主,但在坡折带以上,水深较浅甚至为陆上环境,粗粒相也较发育。

$t = 7/8 \sim 1$  个层序周期,可容空间增长速率急剧降低,甚至出现可容空间的负增长(图 2,图 3),沉积物向盆进积充填剩余可容空间,湖水退却,沉积物以粗粒相为主。此期沉积为高位体系域。

### 4 模拟效果检验

侏罗纪准噶尔盆地为一典型具有坡折带的拗陷湖盆(图 5)。整个侏罗系可以看成是一个 II 级层序,其顶底均为区域不整合面。早八道湾初期的冲积扇沉积发育于底部侵蚀地形之上,相当于 II 级层序的低位沉积;早八道湾中晚期至晚八道湾期,基底沉降速率逐渐增大,湖水进侵,沉积物上超至坡折以上地区,相当于 II 级层序的湖侵期沉积;三工河期基底沉降速率达到最大,湖区达到最大,沉积物上超到坡折的高度也达到最大,湖水最深,沉积物中细粒组所占比例达到最大,为 II 级层序的湖泛期沉积;西山窑期,基底沉降速率放慢甚至停止沉降,末期甚至开始抬升,湖水迅速退却,粗粒沉积物向盆进积,由盆缘向盆内先后开始遭受剥蚀,相当于 II 级层序的高位沉积。可以看出整个 II 级层序具有明显粗—细—粗的岩相变化特征,反映了一次大的构造沉降幕。可见,整个侏罗系 II 级层序与计算机模拟的结果有着很高的吻合程度。

侏罗系 II 级层序的构造沉降过程中还存在次级的停顿和抬升,在侏罗系内部存在多个局部不整合面,进一步将侏罗系划分为四个 III 级层序,由下向上分别称为层序 A、B、C 和 D,大致对应于岩石地层单元中的下八道湾组、上八道湾组、三工河组和西山窑组。层序 A 的底界面是一区域不整合面,坡折带与盆地地形的高程差异较大,所以在低洼部位具有低位体系域的粗粒

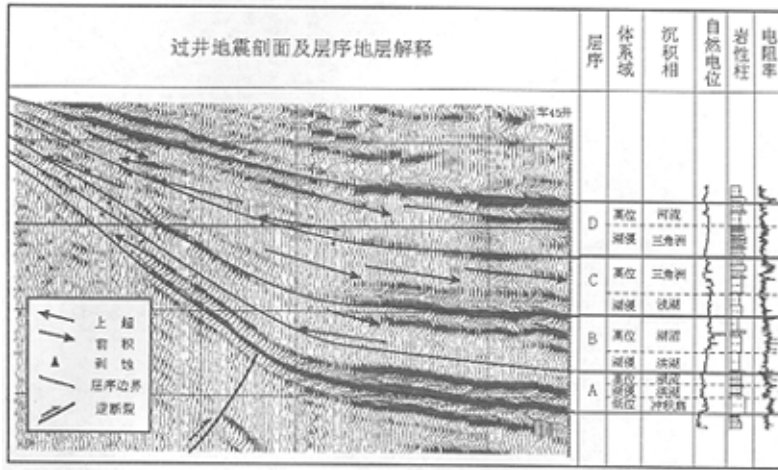


图5 具有地形坡折带的拗陷湖盆层序地层实例  
(准噶尔盆地侏罗系 C023 测线)

Fig.5 Sequence stratigraphic example of depression lake basin with topographic ramp  
(Jurassic of Junggar Basin profile C023)

相沉积。层序 A 的基底沉降速率相对较小,导致湖侵不彻底,后期基底沉降速率放慢乃至沉降停顿,形成煤沼泽,但这种状况持续时间较短,煤层薄而横向对比性差。

层序 B 发育时期,基底沉降速率较层序 A 大,湖侵范围较大,湖相细粒沉积物所占比例有较大幅度上升,后期基底沉降速率降低相对缓慢,在沉积物充填可容空间的同时,水深保持浅水环境的时期较长,所以在高位体系域形成横向对比性较好的、较厚的煤层。

层序 C 发育之初,湖底地形已很平坦,同时基底沉降速率增大很快,因此湖侵极为迅速,沉积以较深水湖相细粒沉积为主,后期基底沉降速率保持相对较长时间的低速率,大量沉积物进积入湖,高位体系域极为发育。

层序 D 时基底沉降速率已远不及层序 C 时,湖侵不彻底,以三角洲沉积为主,后期基底停止沉降,湖水退却,河流相粗粒沉积占据主要地位,末期基底抬升,使高位体系域遭受剥蚀。

Ⅲ级层序的实际特征与模拟结果也有较好的吻合程度,由于Ⅲ级层序基底沉降旋回的完整性较差,沉降速率曲线的对称性较差,层序发育往往不完整。

## 5 结论

基于以上研究,可以得到以下几点认识:

(1) 以可容空间增长速率与沉积物充填速率对比关系作为关键数学模型的层序模拟,合乎层序地层理论模型和具坡折带拗陷湖盆的实际层序特征;

(2) Ⅱ级层序经历的构造沉降旋回完整性好,层

序具完整粗—细—粗岩相变化特征,低位、湖侵、高位体系域发育完整;Ⅲ级层序完整性较差,在下部的Ⅲ级层序中不发育高位体系域,中上部的层序不发育低位体系域,但高位体系域异常发育,顶部的层序往往会遭受剥蚀;

(3) 层序模拟表明粗粒相的迁移过程是先退积后进积,层序具有底部向坡折带和凸起上超、顶部由凸起向坡折带依次遭受剥蚀的特征,因此,在凸起上保存下来的粗相带,其很有可能是湖侵期的沉积,尽管它与坡折带之下低位体系域的粗粒相带岩相相似,但并不属于同期沉积。

## 参考文献 (References)

- 徐怀大. 陆相层序地层学研究中的某些问题[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(2): 83~89 [Xu Huaida. Some problems in study of continental sequence stratigraphy[J]. Oil and Gas Geology, 1997, 18(2): 83~89]
- 顾家裕. 陆相盆地层序地层学格架概念及模式[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(4): 6~10 [Gu Jiayu. Framework concepts and models of sequence stratigraphy in nonmarine petroliferous basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(4): 6~10]
- 朱筱敏. 层序地层学原理及应用[M]. 北京:石油工业出版社, 1998 [Zhu Xiaomin. Theory and application of sequence stratigraphy[M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 1998]
- 解习农, 李思田等. 陆相盆地层序地层学研究特点[J]. 地质科技情报, 1993, 12(1): 22~26 [Xie Xinong, Li Sitian. Characteristics of sequence stratigraphic analysis in terrestrial basin[J]. Geological Science and Technology Information, 1993, 12(1): 22~26]
- 薛良清. 层序地层学在湖相盆地中的应用探讨[J]. 石油勘探与开发, 1990, 17(6): 29~34 [Xue Liangqing. Application of sequence stratigraphy to the lacustrine basin[J]. Petroleum Exploration and Development 1990, 17(6): 29~34]
- 朱筱敏, 王贵文, 孙洪斌等. 辽河滩海地区下第三系层序地层学研

- 究 M]. 北京:石油工业出版社,1999 [ Zhu Xiaomin ,Wang Guiwen , Sun Hongbin ,et al. Sequence stratigraphic research of lower Tertiary in Tanhai area of Liaohe depression[ J ]. Beijing :Petroleum Industry Publishing House ,1999 ]
- 7 纪友亮,张世奇,李红南. 东营凹陷下第三系陆相盆地层序地层学研究[J]. 地质论评,1994(增刊)[ Ji Youliang ,Zhang Shiqi ,Li Hongnan. Lower Tertiary terrestrial stratigraphy in Dongying depression[ J ]. Geological Review ,1994( additional )]
- 8 纪友亮,张立强,张继果. 沾化凹陷孤岛东部斜坡下第三系层序地层学[J]. 石油大学学报(自然科学版),1998,22(6):34~38 [ Ji Youliang ,Zhang Liqiang ,Zhang Jiguo. Evolution of sequence stratigraphy in lower Tertiary on the Eastern slope of Gudao Island in Zhanhua depression[ J ]. Journal of the Petroleum University ,China ( edition of natural science ) ,1998 ,22( 6 ) 34~38 ]
- 9 胡受权. 层序地层学在泌阳凹陷湖盆中的应用:以双河-赵凹地区下第三系核三上段为例[J]. 石油地球物理勘探,1998,33(4):541~552 [ Hu Shouquan. Application of sequence stratigraphy in Biyang fault basin[ J ]. Oil Geophysical Prospecting ,1998 ,33( 4 ) 541~542 ]
- 10 武法东,陈建渝等. 东营凹陷第三纪层序地层格架及沉积体系类型[J]. 现代地质,1998,12(4):559~566 [ Wu Fadong ,Chen Jianyu etc. Tertiary sequence stratigraphic Framework and sedimentary system types in Dongying depression[ J ]. Geoscience ,1998 ,12( 4 ) 559~566 ]
- 11 王洪亮,邓宏文. 地层基准面原理在湖相储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质,1997,18(2):96~102 [ Wang Hongliang ,Deng Hongwen. Application of base-level principle in prediction of lacustrine reservoir[ J ]. Oil and Gas Geology ,1997 ,18( 2 ) 96~102 ]
- 12 解习农,程守田,陆永潮. 陆相盆地幕式构造旋回与层序构成[J]. 地球科学-中国地质大学学报,1996,21(1):27~33 [ Xie Xinong , Cheng Shoutian ,Lu Yongchao. Episodic tectonic cycles and internal architectures of sequence in continental basin[ J ]. Earth Science ,1996 ,21( 1 ) 27~33 ]

## Sequence Stratigraphic Simulation of Depression Lake Basin with Topographic Ramp

HU Zong-quan<sup>1</sup> ZHU Xiao-min<sup>2</sup>

1( Exploration and production Research Institute of SINOPEC Beijing 100083 )

2( Department of Geoscience ,Petroleum University ,Changping ,Beijing 102200 )

**Abstract** Sequence stratigraphic research in lake basin has got good application , which takes a significant role in stratigraphic correlation and sedimentary system distributing prediction in lake basin. Topographic ramp often come into being in the edge of depression lake basin in the process of basin basement deformation under extrusion stress , the key factors controlling sequence development such as subsiding rate of basement and initial topographic slope have apparent difference on the two sides of ramp , which in turn has controlled the sequence development model and the space allocating relation of sedimentary system to great extent. By constructing mathematics model of basement subsiding rate , changing rate of lake water surface , sediments filling rate , sediments filling rule , and facies defining rule , computer simulation were put forward to recur the sequence developing and facies changing procedures in lake basin with topographic ramp. Comparison between actual data with simulating shows that the simulation result is available.

**Key words** sequence stratigraphy , depression lake basin , topographic ramp , increasing rate of accommodating space , sediments filling rate , computer simulation