

文章编号: 1000-0550(2008)05-0753-09

# 定量模拟层序叠加模式对断陷盆地非均一构造沉降活动的响应<sup>①</sup>

朱红涛<sup>1 2</sup> Keyu Liu<sup>2</sup> 杜远生<sup>3</sup> 何生<sup>1</sup> 陈令<sup>4</sup>

(1 中国地质大学(武汉)资源学院 武汉 430074 2 CSIRO Petroleum Resources P. O. Box 1130 Bentley W. A. 6102 Australia  
3 中国地质大学(武汉)地球科学学院 武汉 430074 4 华北油田公司物探研究所 河北任丘 062552)

**摘要** 利用 SEDPAK 二维层序模拟软件, 通过考虑控制层序沉积过程的不同参数, 探讨层序叠加模式对断陷盆地非均一性构造沉降活动的响应。结果表明, 在非均一构造沉降活动作用下, 盆地两侧同期层序显示出同步和非同步的叠加模式。同步叠加模式即盆地两侧同期层序同为退积或进积特征, 非同步叠加模式即盆地两侧层序叠加模式相反(一侧退积, 另一侧则进积)。同期层序非同步叠加模式的形成机理是盆地一侧可容纳空间的增量( $\Delta A$ )小于沉积物供应( $\Delta S$ )( $\Delta A < \Delta S$ ), 而另一侧盆地一侧可容纳空间的增量大于或等于沉积物供应( $\Delta A \geq \Delta S$ )。此外, 二者可以控制非同步叠加模式的持续时间。同期层序非同步叠加模式的识别, 对陆相层序地层研究提出新的认识, 尤其是对我国东部新生代断陷盆地的层序研究, 具有一定的参考价值。

**关键词** 定量地层模拟 非均一构造沉降 同期层序非同步叠加模式 SEDPAK

**第一作者简介** 朱红涛 1976 年出生 男 博士 层序地层学 E-mail: zhuht\_oscar@yahoo.com.cn

**中图分类号** P539.2 **文献标识码** A

## 0 前言

层序地层学的概念和理论模型均强调海(湖)平面升降的一致性、同步性、旋回性<sup>[1~3]</sup>。可容纳空间大小主要受海(湖)平面、构造沉降控制, 可容纳空间的变化则更为复杂, 同时受盆地古地形(几何形态)、沉积物供应控制<sup>[6~9]</sup>。全球只有一个海洋, 全球各点的海平面变化一致性才使它们的升降变化曲线可以异地对比。陆相湖盆的水体独立于海洋之外, 虽然湖平面变化受到全球气候一致性变化的影响, 如冰期、间冰期、干旱气候、温湿气候等等, 但是陆相湖盆的多物源、近物源的典型特征, 使得水体不连通的湖盆之间都不能完全进行湖平面升降曲线对比, 但是同一个湖盆不同点的湖平面变化曲线是可以对比的。在同一盆地内, 具有相同的湖平面升降运动, 可容纳空间的变化也具有同步性, 致使盆地两侧层序叠加样式也具有同步性, 即湖平面上升, 沉积物退积, 湖平面下降, 沉积物进积。Coe<sup>[10]</sup>指出无论海平面上升或下降, 改变沉积物供应量可以产生准层序组退积或进积的叠加模式; Leckie<sup>[11]</sup>、Goodbred<sup>[12]</sup>研究指出海进期间, 高沉积物供应速率同样可以产生进积的叠加模

式; Jiang<sup>[13]</sup>提出可容纳空间转换系统的概念, 指出在一定的构造沉降条件下, 随时间和空间的变化, 同一盆地两侧的可容纳空间变化呈“秋千”(seesaw)变化。

层序地层学模拟是一种有效的、直观的分析、探讨沉积过程和盆地演化的技术。不像传统的层序地层分析方式, 层序地层模拟可以定量的评价不同的控制沉积地层形成的地质参数, 并能实现层序的时间-空间即时转换, 例如对盆地沉降、基准面的变化、沉积物供给、沉积物压实、沉积和剥蚀过程和沉积体形态参数等的定量描述<sup>[14]</sup>。

断陷盆地是中国陆相含油气盆地重要的类型之一。断陷盆地的构造活动特点是靠近或远离控盆断裂的两侧构造沉降速率差异很大, 具有非均一特征。即靠近控边断层活动带(陡坡带)沉降速率较大, 常常是物源近、沉积物供给充足, 形成快速剥蚀、迅速堆积的特点, 加之控盆断裂的同沉积活动, 常形成巨厚沉积; 远离断层活动带的缓坡带沉降速率逐渐减小。

针对我国东部断陷盆地构造活动的非均一性, 本文主要应用 SEDPAK 二维层序模拟软件, 模拟探讨盆地两侧同期层序沉积物叠加模式对非均一构造沉

①国家自然科学基金项目(批准号: 40702024)资助。

收稿日期: 2007-09-06 收修修改稿日期: 2008-01-14

降的响应。SEDPAK 是一个最早的二维正演地层模拟软件,由美国南卡罗莱纳州大学 Kendall 领导的地层模拟研究组开发完成的。该软件主要考虑了沉积物供应、海平面变化、构造沉降、盆地的几何形态和压实等地质因素,可以从盆地两侧(双向)来模拟碎屑岩、碳酸岩混合沉积物充填沉积盆地的过程<sup>[7-14]</sup>。SEDPAK 模拟软件主要通过设置相关的沉积相参数来定义沉积相,这些沉积相参数包括设置沉积物岩性的百分含量(如泥岩、砂岩、碳酸盐岩)、沉积物离滨线的距离范围、沉积物的高程范围(古水深范围)、沉积物的孔隙度四种变量参数。可以通过设置上述四种变量参数中的一种或多种参数来定义具体的沉积相类型,本文采用定义沉积物的高程范围(古水深范围)的变量参数来区别不同沉积相类型,如 0~0.5

m, 0.5~2 m, 2~5 m, 5~10 m, 10~15 m, 15~30 m, 30~50 m, >50 m 均表示沉积物古水深的范围。

## 1 模拟参数

输入的模拟参数包括盆地初始形态、海(湖)平面曲线、构造沉降、沉积物供应等(图 1),模拟时间为 20~0 MYBP。

陆相断陷盆地有地堑式(双断)、半地堑式(单断)和复合式三种基本类型,实际上,在中国东部断陷盆地内多为半地堑式(单断)类型,即由一控边断层活动形成的非对称性单箕状盆地。因此,设计的盆地初始形态为非对称性单箕状,左侧形态平缓(缓坡带)、右侧形态略陡(陡坡带),盆地剖面长度为 800 km,最大落差 300 m(图 1A)。

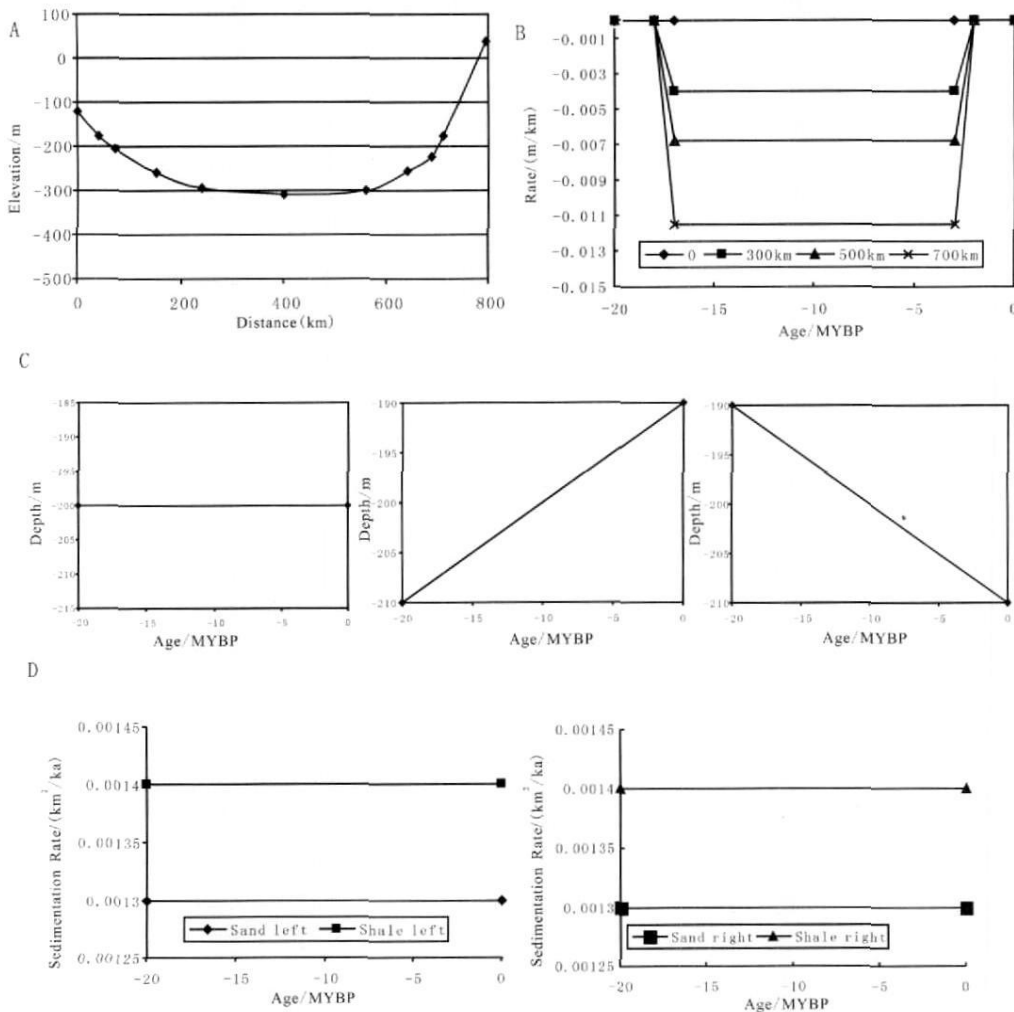


图 1 SEDPAK 层序模拟参数

(A 盆地初始形态; B 构造沉降曲线; C 海(湖)平面曲线; D 沉积物供应曲线)

Fig 1 Input parameters used in SEDPAK simulations

(A Initial basin geometry at 20Ma (MYBP). B Tectonic subsidence curves for four locations

C Sea level curves used in the simulation D Clastic sediment supply rates in square kilometers per ky

为了体现非均一构造沉降特征, 在盆地的不同位置设置不同的构造沉降速率, 自左向右依次增大 (表 1、图 1B)。

表 1 非均一构造沉降速率模拟参数表

Table 1 Tectonic subsidence parameters used for simulating an asymmetrical tectonic subsidence

时间 /MYBP	沉降速率 / (m/ka)				
	800	0	300	500	700
-20	0	0	0	0	0
-18	0	0	0	0	0
-17	0	-0.004	-0.0068	-0.0115	0
-3	0	-0.004	-0.0068	-0.0115	0
-2	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

模拟采用三套海 (湖) 平面曲线 (图 1C), 一种在 20~0 Ma 的模拟时间内, 海 (湖) 平面保持不变 (静止), 高程为 -200 m (图 1C 左图); 第二种在 20~0 Ma 的模拟时间内, 海 (湖) 平面持续上升, 20 Ma 时的

海平面高程为 -210 m, 0 Ma 时的海平面高程为 -190 m; 第三种在 20~0 Ma 的模拟时间内, 海 (湖) 平面持续下降, 20 Ma 时的海平面高程为 -190 m, 0 Ma 时的海平面高程为 -210 m。

模拟采用双向物源, 左右两侧物源的供应量设定为常量, 砂岩为  $0.0013 \text{ km}^2/\text{ka}$ , 泥岩为  $0.0014 \text{ km}^2/\text{ka}$  (图 1D)。

## 2 模拟结果

基于上述模拟参数, 模拟产生海 (湖) 平面保持不变 (静止)、上升以及下降三种情况下的模拟结果 (图 2、图 3、图 4)。

### 2.1 基于海平面静止的模拟

在海平面静止的情况下, 从盆地开始注入沉积物, 到盆地完全充填 (消亡), 盆地两侧层序叠加模式具有不同的变化特征。在缓坡带 (盆地左侧), 层序整体呈进积叠加模式; 陡坡带 (盆地右侧) 层序则呈进积—加积—退积—进积的变化旋回 (图 2)。

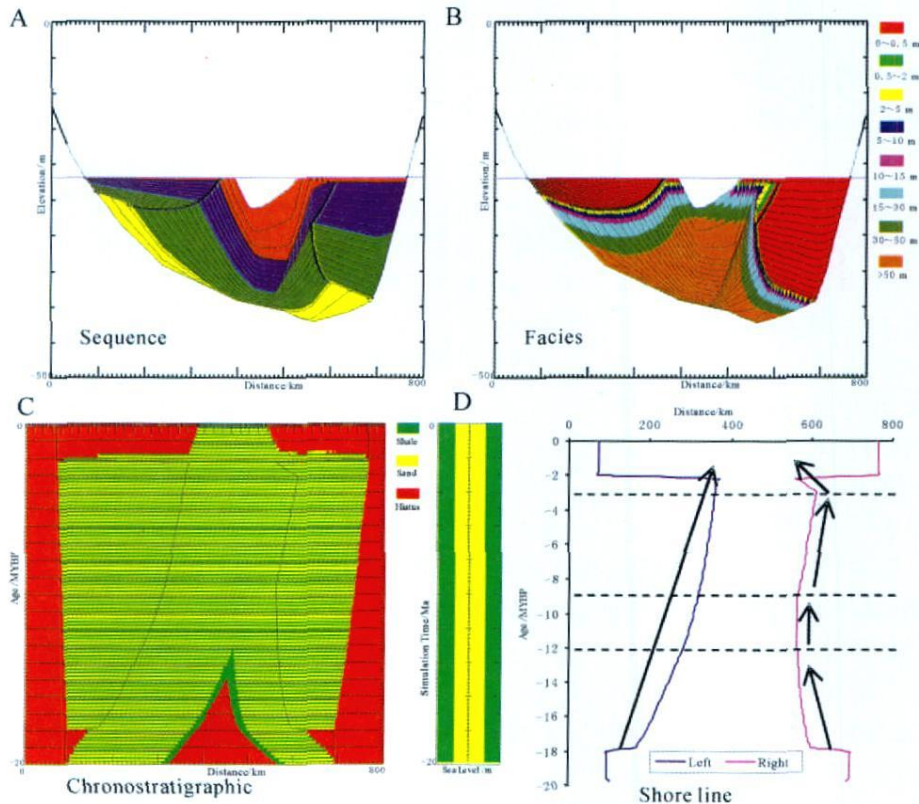


图 2 盆地两侧同期层序同步和非同步叠加模式 (海平面保持不变)

(A 层序剖面, B 沉积相剖面, C 年代地层剖面, D: 盆地滨线位置)

Fig 2 Synchronous and non-synchronous stacking patterns of the isochronous sequence in the both sides of the basin during the static sea level

(A Sequence plot B Facies plot C Chronostratigraphic plot D. Basin shoreline locations)

由于海平面处于静止,可容纳空间的增量主要受构造作用控制。

#### 缓坡带层序叠加模式:

从图 2 中层序剖面、相剖面、年代地层剖面、滨线迁移图可以看出,缓坡带一侧,沉降速率较小,构造沉降增加的可容纳空间小于左侧的沉积物供应量,整个模拟过程,沉积物向盆地中心不断进积。20~18 Ma 阶段,由于沉降速率为零及海平面静止,滨线的位置不变,为一直线段,此阶段由于盆地可容纳空间增量为 0 沉积物快速向盆地推进;18~17 Ma 阶段,构造沉降开始(表 1),滨线位置开始向盆地中心迁移,可容纳空间开始增大,虽然沉积物呈进积特征,但向盆地推进的速度逐渐减小;17~3 Ma 期间,沉降速率达到最大,滨线持续向盆地中心迁移,沉积物继续向盆地推进;3~2 Ma 期间,沉降速率迅速减小至零(表 1),滨线快速向物源区迁移,在充足物源供应下,沉积物继续向盆地推进;3~0 Ma 期间,类似于 20~18 Ma 阶段,可容纳空间增量为 0 滨线的位置不变,为一直线段,盆地进入充填后期,沉积物继续前积充填。

由于海平面静止,可容纳空间的增量主要受构造作用控制。但是,在构造沉降阶段,构造沉降增加的可容纳空间小于左侧的沉积物供应量,沉积物持续表现为进积特征。

#### 陡坡带层序叠加模式:

对于陡坡带一侧,沉降速率远大于缓坡带。20~9.2 Ma 阶段,层序整体呈进积特征,只是不同阶段进积幅度不同。20~17.8 Ma 期间,由于可容纳空间增量较小,层序快速进积;17.8~9.2 Ma 阶段,可容纳空间增量逐渐变大,层序进积幅度较小。12.1~9.2 Ma 阶段,新增的空容纳空间基本等于沉积物供应量,层序表现为加积的叠加模式。9.2~3 Ma 阶段,可容纳空间增量继续增大,已经大于沉积物供应量,层序为退积叠加模式。3~0 Ma 期间,构造活动逐渐减弱,进入构造平静期,沉积物供应速率大于新增的可容纳空间,层序又开始进积。

对比盆地两侧的层序沉积物的叠加模式可以看出,20~12.1 Ma 阶段,盆地两侧同期层序为同步叠加模式(进积);12.1~9.2 Ma 阶段,盆地两侧同期层序为非同步叠加模式(左侧进积,右侧加积);9.2~3 Ma 阶段,盆地两侧同期层序为非同步叠加模式(左侧进积,右侧退积);3~0 Ma 期间,盆地两侧同期层序为同步叠加模式(进积)。

## 2.2 基于海平面上升的模拟

在海平面上升的情况下,盆地两侧层序同样具有不同的变化特征,变化特征基本类似于海平面保持不变的模拟。在缓坡带(盆地左侧),层序整体呈进积叠加模式,陡坡带层序则呈进积—加积—退积—进积的变化旋回(图 3)。

由于海平面持续上升,可容纳空间的增量受构造作用及基准面变化共同控制。

#### 缓坡带层序叠加模式:

如图 3 所示,缓坡带一侧,构造沉降及海平面上升所增加的可容纳空间小于左侧的沉积物供应量,沉积物持续表现为进积特征,只是在不同的充填阶段,层序进积的幅度不同。20~11.6 Ma 阶段,进积幅度较大,11.6~0 Ma 期间,进积幅度较小。

#### 陡坡带层序叠加模式:

对于陡坡带一侧,沉降速率远大于缓坡带。20~11.6 Ma 阶段,层序整体呈进积特征,20~18.2 Ma 期间,由于可容纳空间增量较小,层序快速进积;18.2~11.6 Ma 阶段,可容纳空间增量逐渐变大,层序进积幅度较小。13.2~11.6 Ma 阶段,新增的空容纳空间基本等于沉积物供应量,层序表现为加积的叠加模式。11.6~3 Ma 阶段,可容纳空间增量继续增大,并且开始大于沉积物供应量,层序表现为退积叠加模式。3~0 Ma 期间,构造活动逐渐减弱,进入构造平静期,沉积物供应速率大于新增的可容纳空间,层序又开始进积。

对比盆地两侧的层序沉积物的叠加模式可以看出,20~13.2 Ma 阶段,盆地两侧同期层序为同步叠加模式(进积);13.2~11.6 Ma 阶段,盆地两侧同期层序为非同步叠加模式(左侧进积,右侧加积);11.6~3 Ma 阶段,盆地两侧同期层序为非同步叠加模式(左侧进积,右侧退积);3~0 Ma 期间,盆地两侧同期层序为同步叠加模式(进积)。

## 2.3 基于海平面下降的模拟

在海平面下降的情况下,盆地两侧层序同样具有不同的变化特征。在缓坡带(盆地左侧),层序整体呈进积叠加模式,陡坡带层序则呈进积—加积—退积—进积的变化旋回(图 4)。

由于海平面持续下降,可容纳空间的增量受构造作用及基准面变化共同控制。

#### 缓坡带层序叠加模式:

如图 4 所示,缓坡带一侧,构造沉降及海平面下

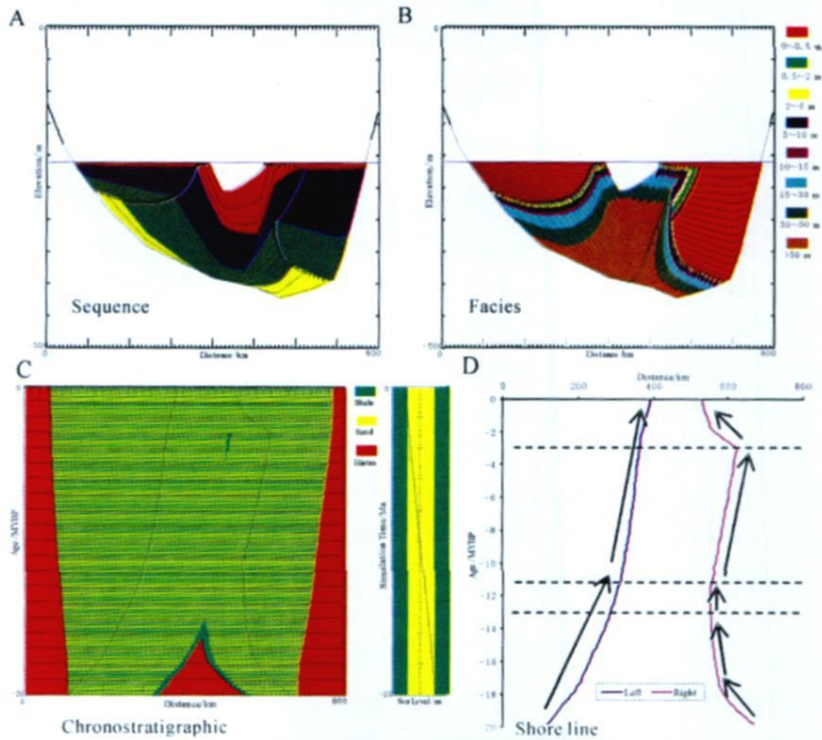


图 3 盆地两侧同期层序同步和非同步叠加模式(海平面上升)

(A: 层序剖面, B: 沉积相剖面, C: 年代地层剖面, D: 盆地滨线位置)

Fig. 3 Synchronous and non-synchronous stacking patterns of the isochronous sequence in a basin during the rising sea level

(A. Sequence plot. B. Facies plot. C. Chronostratigraphic plot. D. Basin shoreline locations.)

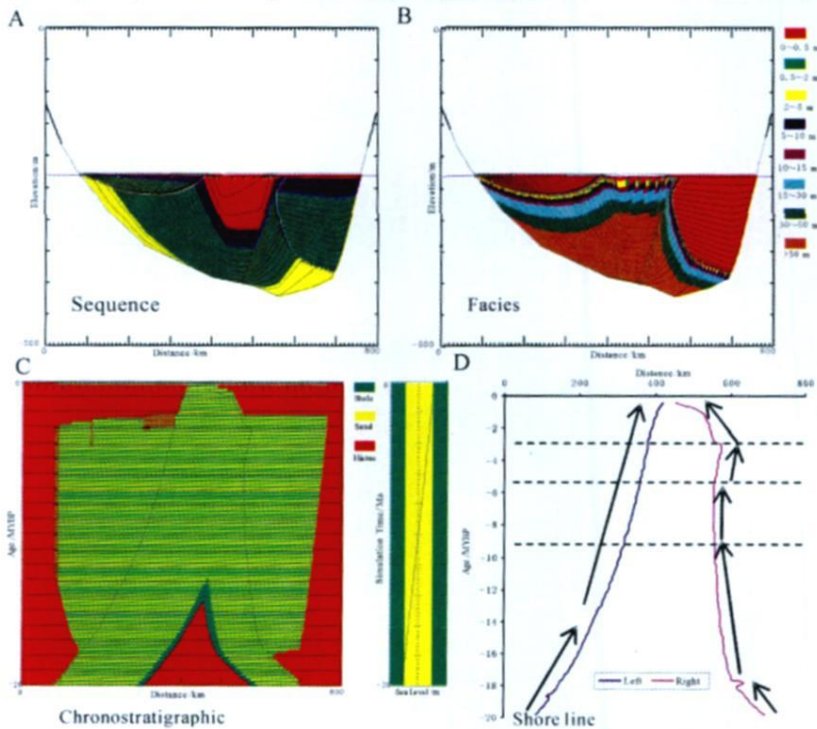


图 4 盆地两侧同期层序同步和非同步叠加模式(海平面下降)

(A: 层序剖面, B: 沉积相剖面, C: 年代地层剖面, D: 盆地滨线位置)

Fig. 4 Synchronous and non-synchronous stacking patterns of the isochronous sequence in a basin during the falling sea level

(A. Sequence plot. B. Facies plot. C. Chronostratigraphic plot. D. Basin shoreline locations.)

降所增加的可容纳空间小于左侧的沉积物供应量, 沉积物持续表现为进积特征, 只是在不同的充填阶段, 层序进积的幅度不同。20~14 Ma 阶段, 进积幅度较大, 14~0 Ma 期间, 进积幅度较小。

陡坡带层序叠加模式:

对于陡坡带一侧, 沉降速率远大于缓坡带。20~5.6 Ma 阶段, 层序整体呈进积特征, 20~17.6 Ma 期间, 由于可容纳空间增量较小, 层序快速进积; 17.6~5.6 Ma 阶段, 可容纳空间增量逐渐变大, 层序进积幅度较小。9.2~5.6 Ma 阶段, 新增的空容纳空间基本等于沉积物供应量, 层序表现为加积的叠加模式。5.6~3 Ma 阶段, 可容纳空间增量继续增大, 并且开始大于沉积物供应量, 层序表现为退积叠加模式。3~0 Ma 期间, 构造活动逐渐减弱, 进入构造平静期, 沉积物供应速率大于新增的可容纳空间, 层序又开始进积。

对比盆地两侧的层序沉积物的叠加模式可以看出, 20~9.2 Ma 阶段, 盆地两侧同期层序为同步叠加模式 (进积); 9.2~5.6 Ma 阶段, 盆地两侧同期层序为非同步叠加模式 (左侧进积, 右侧加积); 5.6~3 Ma 阶段, 盆地两侧同期层序为非同步叠加模式 (左侧进积, 右侧退积); 3~0 Ma 期间, 盆地两侧同期层序为同步叠加模式 (进积)。

### 3 模拟结果探讨

对于海平面静止、上升及下降的三种情况, 盆地两侧同期层序叠加模式分为同步叠加模式、非同步叠加模式。同步叠加模式即盆地两侧同期层序同为进积、退积或加积特征, 文中的模拟多为进积型同步叠

加模式; 非同步叠加模式即盆地两侧层序叠加模式相反 (一侧退积, 另一侧则进积或加积)。

盆地两侧同期层序非同步的叠加模式与可容纳空间的增量 ( $\Delta A$ ) 及沉积物供应 ( $\Delta S$ ) 有密切的关系, 必须满足盆地一侧  $\Delta A < \Delta S$  另一侧  $\Delta A \geq \Delta S$  (表 2), 才能形成非同步叠加模式。无论在海平面上升期、静止期及下降期, 对于进积 (左侧) — 加积 (右侧) 型非同步叠加模式, 在盆地左侧的  $\Delta A < \Delta S$  右侧的  $\Delta A = \Delta S$  对于进积 (左侧) — 进积 (右侧) 型非同步叠加模式, 在盆地左侧的  $\Delta A < \Delta S$  右侧的  $\Delta A > \Delta S$

非同步叠加模式持续的时间和新增的可容纳空间大小有关 (保持  $\Delta S$  不变), 从海平面上升、静止到下降期, 非同步叠加模式持续时间依次减小 (表 2)。海平面上升期, 构造作用、基准面变化形成的  $\Delta A$  均为正增长,  $\Delta A$  最大, 非同步叠加模式持续时间为 10.2 Ma 海平面静止期, 构造作用形成的  $\Delta A$  为正增长, 基准面变化形成的  $\Delta A$  为 0 非同步叠加模式持续时间为 9.1 Ma 海平面下降期, 构造作用形成的  $\Delta A$  为正增长, 基准面变化形成的  $\Delta A$  为负增长,  $\Delta A$  最小, 非同步叠加模式持续时间为 6.2 Ma

同时, 从表 2 中还可以看出, 从海平面上升、静止到下降期, 进积 (左侧) — 加积 (右侧) 型非同步叠加模式持续时间依次增大, 分别为 1.6 Ma 2.9 Ma 3.6 Ma 进积 (左侧) — 退积 (右侧) 型非同步叠加模式持续时间依次减小, 分别为 8.6 Ma 6.2 Ma 2.6 Ma 这些与新增空容纳空间的变化率有关系, 海平面上升期, 新增空容纳空间的变化率最大, 进积 (左侧) — 退积 (右侧) 型非同步叠加模式持续时间最长, 而进积 (左侧) — 加积 (右侧) 型非同步叠加模式持续时间最

表 2 非同步叠加模式特征

Table 2 The summary of the characteristics of non-synchronous stacking patterns

海平面变化	层序叠加模式	可容纳空间增量及与沉积物供应的关系	出现时间 /Ma	持续周期 /Ma
上升期	左侧: 进积	$\Delta A_T > 0 \Delta A_B > 0 \Delta A_T + \Delta A_B > \Delta S$	-13.2 ~ -11.6	1.6
	右侧: 加积	$\Delta A_T > 0 \Delta A_B > 0 \Delta A_T + \Delta A_B = \Delta S$		
	左侧: 进积	$\Delta A_T > 0 \Delta A_B > 0 \Delta A_T + \Delta A_B > \Delta S$	-11.6 ~ -3	8.6
	右侧: 退积	$\Delta A_T > 0 \Delta A_B > 0 \Delta A_T + \Delta A_B < \Delta S$		
静止期	左侧: 进积	$\Delta A_T > 0 \Delta A_B = 0 \Delta A_T + \Delta A_B > \Delta S$	-12.1 ~ -9.2	2.9
	右侧: 加积	$\Delta A_T > 0 \Delta A_B = 0 \Delta A_T + \Delta A_B = \Delta S$		
	左侧: 进积	$\Delta A_T > 0 \Delta A_B = 0 \Delta A_T + \Delta A_B > \Delta S$	-9.2 ~ -3	6.2
	右侧: 退积	$\Delta A_T > 0 \Delta A_B = 0 \Delta A_T + \Delta A_B < \Delta S$		
下降期	左侧: 进积	$\Delta A_T > 0 \Delta A_B < 0 \Delta A_T + \Delta A_B > \Delta S$	-9.2 ~ -5.6	3.6
	右侧: 加积	$\Delta A_T > 0 \Delta A_B < 0 \Delta A_T + \Delta A_B = \Delta S$		
	左侧: 进积	$\Delta A_T > 0 \Delta A_B < 0 \Delta A_T + \Delta A_B > \Delta S$	-5.6 ~ -3	2.6
	右侧: 退积	$\Delta A_T > 0 \Delta A_B < 0 \Delta A_T + \Delta A_B < \Delta S$		

注:  $\Delta A_T$  = 构造作用形成的可容纳空间增量,  $\Delta A_B$  = 基准面变化形成的可容纳空间增量,  $\Delta S$  = 沉积物供应量

短;海平面下降期,新增空容纳空间的变化率最小,与沉积物供应量的变化率最为接近,从而造成进积(左侧)一退积(右侧)型非同步叠加模式持续时间最短,而进积(左侧)一加积(右侧)型非同步叠加模式持续时间最长。

在 20~0 Ma 的模拟过程中,盆地两侧同期层序非同步叠加模式均出现在模拟时间的中后期,上升期出现在 13.2~3 Ma 静止期出现在 12.1~3 Ma 下降期出现在 9.2~3 Ma 对于层序而言,非同步叠加模式多出现在层序的水进体系域及高位体系域初期,同步叠加模式多出现在层序的低位体系域及高位体系域后期。

因此,在中国东部新生代断陷盆地,在非均一构造沉降活动作用下,盆地两侧可容纳空间的增量( $\Delta A$ )及沉积物供应( $\Delta S$ )的关系决定了能否出现非同步叠加模式,当盆地一侧  $\Delta A < \Delta S$  另一侧  $\Delta A \geq \Delta S$  时,才能出现这种非同步模式。盆地两侧新增可容纳空间( $\Delta A$ )的增长速率与沉积物供应增量  $\Delta S$  的增长速率,决定了非同步叠加模式的持续周期。

### 4 研究意义

上述模拟研究表明,在非均一构造沉降活动作用下,在盆地两侧同期层序可以形成同步和非同步的叠加模式。Jiang<sup>[13]</sup>对松辽盆地青山口组进行层序研究时,在盆地两侧同期层序中,识别、划分出 3 组非同步叠加的准层序(一侧进积,另一侧退积),说明这种非同步叠加模式确实存在。

断陷盆地是中国陆相含油气盆地重要的类型之一,而且多为非对称性单箕状盆地,据王嗣敏等<sup>[15]</sup>对

松辽盆地断陷期形成的 30 余个断陷盆地的统计,非对称性单箕状(单断)是断陷盆地的主要类型。因此,在中国东部断陷盆地,非均一构造沉降活动普遍存在,由其形成的非同步叠加模式对盆地充填过程及层序等时对比的研究具有一定的参考意义。

作为例子,选取下辽河拗陷滩海地区的一条地震测线,目的层位为东营组,来探讨非同步叠加模式的研究意义(图 5)。辽河盆地滩海地区早第三纪的构造演化分为初始断陷期、扩张深陷期(断陷期)、断陷活动衰减期(断陷向拗陷过渡期)三个阶段。东营组处于断陷期与拗陷期的过渡阶段,底部的东三段继承沙河街组的断陷特征(断层活动有所减弱),到东二段及东一段构造活动进一步减弱甚至停止活动。

从图 5 可以看出,东三段远离盆地控边断层的缓坡带(左侧)沉积物依次呈现进积特征,靠近盆地控边断层的陡坡带(右侧)沉积物具有依次退积特征,在盆地两侧表现为非同步的叠加模式。东营组三段沉积时期,从控边断层活动带(陡坡带)到远离断层活动带的缓坡带,沉降速率逐渐减小,盆地沉降中心位于控边断层活动带,并随着控边断层的活动,沉降中心不断的向盆地陡坡带侧向迁移。此外,东三段靠近控边断层活动带(陡坡带)一侧,近物源,沉积物供给充足,加之控盆断层的同沉积活动,沉积地层厚度大于远离断层活动带的缓坡带一侧。随着盆地的充填,东二、东一段时期,边界断层活动减弱甚至静止,盆地沉积中心明显向缓坡带一侧迁移,盆地两侧沉积物厚度差别减小。

此外,在研究我国东部新生代断陷盆地的层序时,要注意这种非同步叠加模式,确保层序对比在等

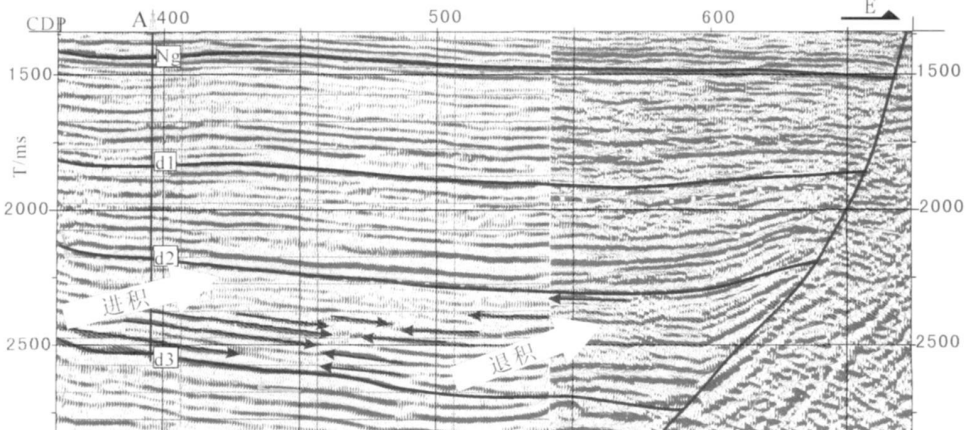


图 5 非同步叠加模式的实例分析

Fig 5 Example for non-synchronous stacking patterns

时地层格架中进行,以免造成层序的穿时对比。

致谢 SEDPAK 二维地层模拟软件是由美国南卡罗莱纳州大学地层模拟研究组开发完成的,衷心感谢从该研究组获得的技术支持。本文的模拟工作是在澳大利亚 CSIRO Petroleum 从事层序地层模拟的博士后研究期间完成。

### 参考文献 (References)

- Vail P R, Mitchum R M, Thompson S. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level [ C ] // Payton C E ed. Seismic Stratigraphy Applications to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir, 1977, 26: 83-98.
- Posamentier H W, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition: II. sequences and system tracts [ C ] // Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G S G et al eds. Sea-Level Changes: an Integrated Approach. SEPM Special Publication, 1988, 42: 125-154.
- Van Wagner J C, Posamentier H W, Mitchum R M, et al. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions [ C ] // Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G S G et al eds. Sea-Level Changes: An Integrated Approach. SEPM Special Publication, 1988, 42: 39-45.
- Van Wagner J C, Mitchum R M, Campion K M, et al. Siliciclastic Sequence Stratigraphy in Well Logs, Cores and Outcrops: concepts for high resolution correlation of time and facies [ J ]. AAPG Methods in Exploration Series, 1990, 7: 55.
- Posamentier H W, Morris W R. Aspects of strata architecture of forced regressive deposits [ C ] // Hunt D, Gawthorpe R L eds. Sedimentary responses to forced regressions. Geological Society (London) Special Publication, 2000, 172: 19-46.
- Galloway W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis: I. architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units [ J ]. AAPG Bulletin, 1989, 73: 125-142.
- Liu K Y, Trent C K, Lincoln L P, et al. Computer simulation of the influence of basin physiography on condensed section deposition and maximum flooding [ J ]. Sedimentary Geology, 1998, 122: 181-191.
- Posamentier H W, Allen G P. Variability of the sequence stratigraphic model: effects of local basin factors [ J ]. Sedimentary Geology, 1993, 86: 91-109.
- Thorne J A, Swift D J P. Sedimentation on continental margins: II. application of the regime concept [ C ] // Swift D J P, Oertel G F, Tillman R W, et al eds. Shelf Sand and Sandstone Bodies. Int Assoc Sedimentol Spec Publ, 1991, 14: 33-58.
- Coe A, Church K D. Sequence stratigraphy [ C ] // Coe A ed. The Sedimentary Record of Sea-Level Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 57-98.
- Leckie D A. Canterbury Plain, New Zealand: implications for sequence stratigraphic models [ J ]. AAPG Bulletin, 1994, 78: 1240-1256.
- Goodbred S L, Kuehl S A. The significance of large sediment supply: active tectonism and eustasy on margin sequence development: late Quaternary stratigraphy and evolution of the Ganges-Brahmaputra delta [ J ]. Sedimentary Geology, 2000, 133: 227-248.
- Jiang Z X, Lu H B, Yu W Q, et al. Transformation of accommodation space of the Cretaceous Qingshankou Formation, the Songliao Basin, NE China [ J ]. Basin Research, 2005, 17: 569-582.
- Liu K Y, Naish T, Carter B. High-resolution sequence stratigraphic simulation of a Plio-Pleistocene outcrop sequence in New Zealand [ C ]. 油气层序地层学新进展—全国第四届油气层序地层学大会学术论文集. 北京: 石油工业出版社, 2006: 37-52. [ Liu K Y, Naish T, Carter B. High-resolution Sequence Stratigraphic Simulation of a Plio-Pleistocene Outcrop Sequence in New Zealand [ C ] // Oil-gas sequence stratigraphy new progress: The Fourth Session of the Oil and Gas Sequence Stratigraphy Academic Collection. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 37-52.]
- 王嗣敏, 刘招君, 董清水, 等. 陆相盆地层序地层形成机制分析——以松辽盆地为例 [ J ]. 长春科技大学学报, 2000, 30(2): 139-144. [ Wang Simin, Liu Zhaojun, Dong Qinghui, et al. The mechanism of formation analysis of continental sequence stratigraphy [ J ]. Journal of Jilin University, 2000, 30(2): 139-144.]



# Discussion on the Response of Sequence Stacking Patterns to Asymmetrical Tectonic Subsidence Depending on the Sequence Quantitative Simulation

ZHU Hong-tao<sup>1 2</sup> Keyu LIU<sup>2</sup> DU Yuan-sheng<sup>3</sup> HE Sheng<sup>1</sup> CHEN Ling<sup>4</sup>

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

(2. CSIRO Petroleum Resources, P.O. Box 1130, Bentley, W. A. 6102, Australia)

(3. Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

(4. Institute of Geophysics, Huabei Oil-fields company, Renqiu, Hebei 062552)

**Abstract** On the Basis of stratigraphic modelling using the SEDPAK computer program, the response of sequence stacking patterns to asymmetrical tectonic subsidence within a rift basin was simulated by considering the various parameters controlling the deposition of a sequence. The simulation results indicate that isochronous sequence stratigraphy within a rift basin may exhibit both synchronous and non-synchronous stacking patterns at different part of the basin. Synchronous stacking patterns refer to that at any part of the basin the same transgression, retrogression and aggradation occurs concurrently. Non-synchronous stacking patterns refer to that within the same basin some part may exhibit the exact opposite stacking patterns as other parts concomitantly.

The development of non-synchronous stacking patterns were found to be caused by the combination of both accommodation space increment ( $\Delta A$ ) more than sediment supply increment ( $\Delta S$ ) ( $\Delta A < \Delta S$ ) in one side of basin and accommodation space increment ( $\Delta A$ ) less than or equal to sediment supply increment ( $\Delta S$ ) ( $\Delta A \geq \Delta S$ ) in other sides of basin. Meanwhile, duration of non-synchronous stacking patterns was controlled by the interplay of accommodation space increment ( $\Delta A$ ) and sediment supply increment ( $\Delta S$ ). Recognition of non-synchronous stacking patterns of isochronous sequence stratigraphy provides a new insight into continental sequence stratigraphy and might be widely applicable for the Cenozoic basins in the eastern China.

**Key words** sequence stratigraphic quantitative simulation; asymmetrical tectonic subsidence; non-synchronous stacking pattern of isochronous sequence; SEDPAK