

# 二维沉积层序计算机模拟研究<sup>①</sup>

林畅松<sup>1</sup> 解习农<sup>2</sup> 张燕梅<sup>1</sup> 刘景彦<sup>1</sup>

1(中国地质大学 北京 100083) 2(中国地质大学 武汉 430074)

**提 要** 本项研究建立了综合性的二维沉积层序模拟系统 SSMS。该模拟系统由盆地的沉降过程模拟与盆地充填过程模拟两个子系统构成。盆地的沉降模拟结合了反演的沉降回剥和盆地形成的正演模型;盆地充填过程模拟综合考虑了盆地沉降、重力均衡作用、海(湖)平面升降、沉积物供给、侵蚀作用、沉积物分布和压实等因素。结合实例分析表明,该模拟系统可用于定量分析盆地构造、海(湖)平面、沉积物供给等变化对沉积层序的形成过程、几何形态及其沉积体系分布的控制作用,检验地质模型和进行预测。

**关键词** 沉积层序 计算机模拟

**第一作者简介** 林畅松 男 39岁 教授 博士生导师 沉积学 盆地分析与模拟

## 1 引言

近十多年来,沉积盆地的理论模型和模拟技术的发展十分迅速。沉积盆地分析已从定性的静态描述转向动态的定量过程研究。模拟分析是通过应用定量描述和分析盆地参数和过程,建立理论模型并借助计算机技术动态模拟或“仿真”盆地的动力学过程。正确建立模型和模拟系统后,通过变化各种控制性参数,就可动态地再现地质过程及其可能结果。因此,盆地过程模拟有助于精确评估各种未知参数、分析地质作用与结果的内在联系,进而检验地质解释和进行预测。目前,盆地过程模拟研究领域不断拓宽,涉及盆地形成演化的全过程,包括盆地形成、沉降、充填过程、成矿作用等,显示出巨大的和深远的研究和应用前景<sup>[1,2]</sup>。

层序地层模拟是近年来随着层序地层的诞生而发展起来的一项新兴的盆地模拟技术,对层序地层的理论发展和盆地沉积分析和定量预测产生了重要的影响。如对层序地层的理论发展起重要作用的“可容纳空间”(accommodation)的概念,就是 Jervey<sup>[3]</sup>等进行定量模拟研究的结果。通过模拟可加深对层序发育和构成特征的认识,揭示层序形成演化的控制因素,定量分析和预测沉积体系和沉积相的空间组合和分布样式,迅速检验前沿盆地的勘探预测方案<sup>[4]</sup>。本文重点讨论所建立的综合性的二维层

序模拟软件系统的概念模型和原理,并结合模拟实例分析该系统的模拟功能。

## 2 概念模型

### 2.1 系统构成和模拟流程

沉积盆地的充填过程和层序发育受到一系列相互作用的地质因素或地质过程的控制。这些因素可归纳为两组基本的控制因素<sup>[4]</sup>:一是控制可容纳空间的产生或消亡的因素,如构造升降、沉积基准面变化、重力均衡作用、沉积物压实等;另一组则是控制沉积物搬运、堆积过程的因素,如水流和波浪作用、沉积地貌、沉积斜坡和重力搬运作用、沉积物供给量变化等。这些因素相互作用的结果将反映在层序的几何形态、沉积层序界面及沉积相的分布样式上。显然,沉积盆地充填过程和沉积层序形成演化的模拟是一项复杂的系统工程,需要综合考虑盆地构造作用和沉积过程等多参数及其相互作用。我们建立的正演模型的目的是从二维剖面上模拟这些因素相互作用的总的结果。

本项研究建立的层序模拟系统 - SSMS(sequence stratigraphy modeling system)包括了两个主要的构成部分,即盆地的形成、沉降过程模拟和盆地充填过程模拟两个子系统,成为综合性较强的一套模拟系统。盆地的沉降过程模拟结合了回剥法(backstripping)和正演模型;盆地充填模拟综合考

<sup>①</sup> 国家自然科学基金资助项目(49572120 49302030)

收稿日期:1997-05-13 收修改稿日期:1997-08-19

虑了盆地沉降、海平面变化以及沉积物供给等对盆地可容纳空间、沉积基准面及沉积物堆积分布等的控制作用。图 1 表示了 SSM S 模拟系统的计算流程。从开始设定盆地的原始形态后, 每一时间间隔的模拟都从“确定沉积物供给量”到“沉积物压实”, 根据地质模式的需要经过  $n$  次的重复即可得出模拟的层序地层结构和沉积相分布样式。比较模拟结果与实际剖面特征, 可达到检验模式和预测的目的。

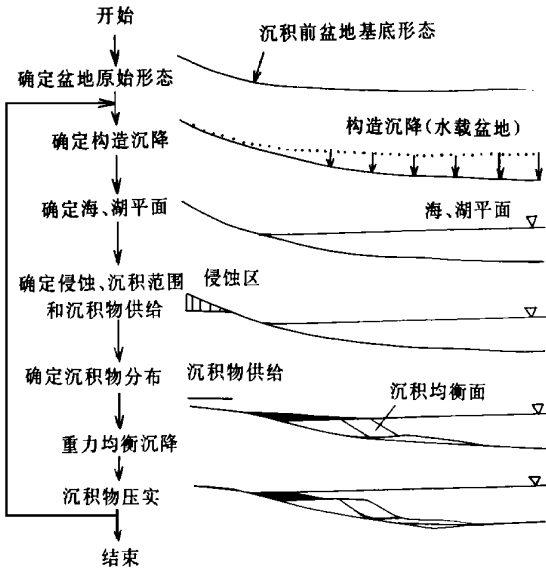


图 1 沉积层序模拟流程

Fig. 1 Process of depositional sequence simulation

### 2.2 盆地的构造沉降

盆地构造沉降的确定是层序地层模拟中的关键问题之一。一般可用正演或反演的方法进行定量描述。在我们建立的 SSM S 软件中可由下列方法输入: (1)应用回剥法求得沉降速率作为层序模拟的沉降输入; (2)应用合适的理论模型计算沉降量, 对于裂谷型盆地可采取均匀瞬时拉伸模型<sup>[5]</sup>或悬臂梁模型<sup>[6]</sup>等确定盆地的沉降速率及其演化<sup>[1]</sup>; (3)由软件使用者根据需要确定沉降速率及其变化。根据某种目的设定沉降过程, 分析某种过程和结果与实测观察结果比较, 是模拟实验研究中常采用的重要方法。

### 2.3 沉积物压实

沉积物的压实过程受到岩性、沉降速率和流体作用等因素影响。岩性往往起到主导的作用。在正常的压实情况下, 一般假定沉积层的孔隙度与深度呈指数函数关系<sup>[7,8]</sup>:

$$H = H_0 e^{-cy} \quad (1)$$

在盆地浅部, 深度与孔隙度的关系改用下式计算拟

合程度可能更好<sup>[9]</sup>:

$$H = \frac{1}{\frac{1}{H_0} + cy} \quad (2)$$

其中,  $H$  是深度为  $y$  时的孔隙度,  $H_0$  为表面孔隙度,  $c$  为压实系数。  $H_0$  和  $C$  主要与岩性有关, 可通过实验室分析和已知资料统计分析求得。设沉积层顶、底的深度为  $Y_2$  和  $Y_1$ , 沉降到某一深度时, 沉积层的顶、底的深度为  $S_2$  和  $S_1$ , 经压实后的沉积厚度由下式给出<sup>[8]</sup>:

$$S_2 - S_1 = Y_2 - Y_1 - \frac{H_0}{C} (e^{-cY_1} - e^{-cY_2}) + \frac{H_0}{C_0} (e^{-cS_1} - e^{-cS_2}) \quad (3)$$

### 2.4 沉积物负载均衡沉降

在盆地充填模拟过程中必须考虑沉积物的重力均衡沉降。设盆地构造沉降为  $Y$  (水充填), 盆地中的水被沉积物代替后沉降为  $S$ , 只考虑局部均衡或 Airy 均衡<sup>[10]</sup>, 则有:

$$S = Y \times \frac{d_m - d_w}{d_m - d_s} \quad (4)$$

式中  $Y$  为构造沉降量,  $d_m$ ,  $d_s$ ,  $d_w$  分别为地幔、沉积物和水密度。若考虑挠曲均衡, 由负载  $L(x)$  引起的挠曲沉降  $W(x)$  可表示为 (不考虑水平应力)<sup>[8]</sup>:

$$D \frac{d^4 W}{dx^4} + (d_m - d_w) g W(x) = L(x) \quad (5)$$

其中,  $D = \frac{E T_e^3}{12(1-\nu^2)}$ , 为挠曲刚度, 主要取决于有效弹性厚度 ( $T_e$ ) 的大小。当盆地很宽或有效弹性厚度很小时, 挠曲均衡趋近于局部均衡。

### 2.5 沉积层序的几何形态

盆地充填模拟的技术路线和方法很多, 其选择取决于模拟的目的、尺度和对象。着重研究沉积物的搬运和分散, 堆积过程的模拟常采用水动力学方法来描述<sup>[11-13]</sup>; 以分析宏观过程和沉积层序几何形态关系为目的的模拟, 常采用几何学的方法来描述<sup>[14-17]</sup>。本项研究建立的 SSM S 模拟软件是以模拟沉积体系的几何形态和分布为主要目的。

#### 2.5.1 碎屑沉积层序的几何形态和沉积均衡面

碎屑沉积层序和沉积体的形态和分布是沉积物搬运、堆积、再改造直至被埋藏之前各种沉积营力和构造作用的综合结果。我们并不很关心这些作用的具体过程, 而着重研究这些作用的综合结果, 即它们在一定时期内相互作用所产生的沉积层序及沉积体的外部形态和内部构成特征。在达到均衡的条件下,

沉积体几何关系和总的岩相格局一般可用所谓的“沉积均衡面”(equilibrium profile)来描述<sup>[3,15-17]</sup>。

沉积均衡面的概念由来已久,早在 1875 年 Powell 就提出河流下切存在一个平衡界面,称为沉积基准面(base level)<sup>[18]</sup>。但这一概念系统地应用到沉积体几何形态分析则是层序地层学诞生后才开始的。沉积均衡面事实上是盆地动能条件与沉积地貌达到均衡的状态。均衡面的上升或降低直接与沉积基准面的变化有关。从陆相环境至海洋环境沉积均衡面具有一定的变化趋势,与沉积盆地的不同部位的能量有关。在二维剖面上,一般以沉积表面的斜坡来表示。沉积均衡面的确定,可依据前人对现代环境观察的结果,并结合地震剖面显示的沉积形态加以分析确定(要去压实和消除构造的影响)。Cant 等应用这一概念对沉积层序、层序界面及沉积相的分布作过详细的几何学分析<sup>[15]</sup>。

在模型建立中,不同的沉积域或沉积相域(depositional or facies tract)可用不同的沉积斜坡或曲线来表示。沉积作用的发生总是从强到弱,相应的沉积均衡面(斜坡)由陡逐渐变缓。比如,从冲积扇到河流平原,从滨岸带或三角洲前缘到远岸带,从大陆斜坡到深海平原,都具有沉积动能从强到弱。沉积均衡面从陡逐渐变缓的变化趋势。一般来说,碎屑沉积体系远端的沉积速度的变小可看作呈指数函数递减的。为了简化,每个沉积域的沉积斜坡可由下式给出(图 2a):

$$f(x) = Ax + B \quad \text{当 } a < x \leq b \text{ (近端)} \quad (6)$$

$$f(x) = Toe^{-\alpha x} \quad \text{当 } b < x \leq c \text{ (远端)} \quad (7)$$

其中  $A, B, To$  为常数,  $a, c$  限定一个沉积域。在二维的剖面上,沉积层序的横面积侧可表示为:

$$SI = DS = \int_c^a ff(x) dx \quad (8)$$

其中,从盆外向盆内供给沉积物量为  $SI$ ,盆内相应堆积的沉积物为  $DS$ ,  $ff(x)$  是描述沉积层序横断面的函数,它是由沉积层序的顶、底界面(沉积均衡面)来定义的。

### 2.5.2 碳酸盐岩的沉积层序

在陆源碎屑缺少的碳酸盐沉积区,碳酸盐的沉积速度与光合作用和生物的生长速率有密切关系。在小于 6~8 m 的浅水透光带生物大量繁殖,碳酸盐岩的沉积速率很高,随着深度的加大碳酸盐岩生长速率迅速减小。碳酸盐岩沉积速率可表示为水深的函数。从宏观的尺度上,可应用这一关系模拟碳酸

盐岩沉积层序的几何形态与构造沉降和海平面升降的关系<sup>[16]</sup>。如图 2b 所示,设碳酸盐的沉积速率为  $ff(y)$ ,沉积时间为  $t$ ,沉积厚度  $h$  由下式给出:

$$H = \int_0^t ff(y) dt \quad (9)$$

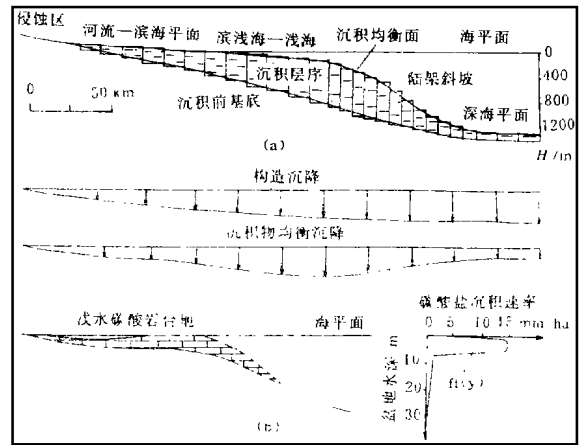


图 2 理想条件下离散大陆边缘盆地裂后期沉积层序模拟模型

Fig. 2 Conceptual sequence simulation model of continental margin basin

## 2.6 沉积基准面的变化

在海相盆地中,海平面的变化被认为与沉积基准面的变化大体相一致。在湖盆中,湖平面代表了湖盆的局部的沉积基准面。沉积基准面的变化受控于多种因素,并常常显示出不同级别的变化,可用不同振幅的正弦函数叠加来反映:

$$Y = \sum_{i=1}^n A_i \sin\left(\frac{a_i X}{C}\right) \quad (10)$$

## 3 模拟分析

在早期的概念中,层序发育和层序界面是全球海平面变化造成的<sup>[19]</sup>。这一观点引起了广泛的争议。目前人们已认识到,地质历史中海平面的变化是相对的,它是构造升降、全球海平面变化、沉积物供给、气候变化等综合作用的结果。然而,这些因素是如何相互作用对层序发育过程产生控制是需要进一步探讨的问题。定性的概念模型常常很难分析其相互作用与层序发育的成因联系。模拟可把这些因素区分开,定量分析每一种因素的控制作用<sup>[20]</sup>。因此,模拟是可能解决上述问题的重要手段。

在离散大陆边缘或裂谷盆地的裂后阶段常常发

育相对稳定的滨海相沉积。在这些地带,海平面的波动可能是控制 3 级—4 级层序发育的主要因素。研究表明,在设定沉积物供给速率和构造沉降速率不变或变化很小的条件下,通过变化海平面高度,应用 SSMS 可模拟出两种经典性的层序界面和层序类型,即所谓的 I 型和 II 型层序。I 型层序边界可以通过设定一次快速的海平面下降来实现。海平面的下降需要低于坡折点。沉积作用只在坡折点向海一侧发生。II 型层序界面是在海平面保持不变或下降,但高于坡折点时形成的<sup>[21]</sup>。以下通过离散大陆边缘盆

地裂后期层序发育过程的模拟分析为例,说明 SSMS 模拟系统的使用和功能。

模拟剖面 1(图 3)是一个理想的离散大陆边缘裂后期沉积层序的模拟结果。在离散大陆边缘或裂谷盆地的裂后阶段盆地沉降与热衰减有关,沉降速率随时间呈指数衰减。模拟剖面 1 中的沉降速率从开始的 65 m/Ma 经 25 Ma 后衰减至 20~25 m/Ma。海平面的变化是呈对称 Sin 周期变化的,升降幅度为 ±200 m。沉积斜坡(均衡面)陆地为 0.07,滨海平原为 0.005,滨浅海为 0.04,最大深度为 250

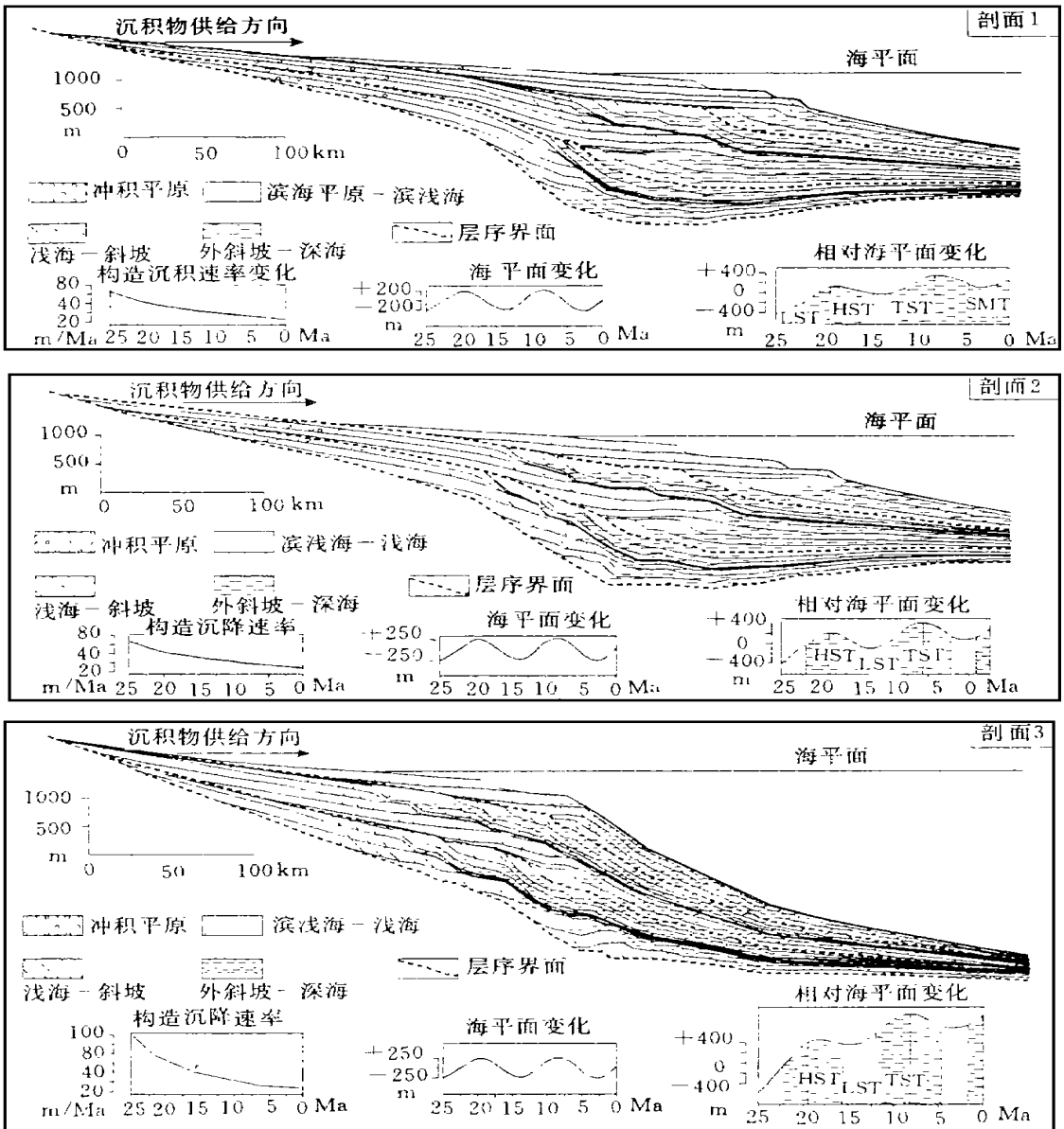


图 3 离散大陆边缘盆地裂后期沉积层序的模拟剖面

LST: 低位体系域 TST: 水进体系域 HST: 高位体系域 SMT: 陆架边缘体系域

Fig. 3 Simulated sequence architecture of continental margin basin

m,大陆斜坡为 0.08,最大深度为 1 200 m。同时假定海平面升降时有足够的时间使沉积或侵蚀作用达到均衡状态。模拟给出了构造沉降和海平面变化叠加的相对海平面及其与沉积体系的关系。不难看出,三次海平面低位期侵蚀面形成了三个层序界面。高水位体系域的顶部被明显侵蚀(侵蚀达到均衡状态),低位域和水进体系域保存好。早期发育的层序处于热衰减沉降早期,沉降速率较大,形成总体快速水进的体系域。中部的层序内三个体系域发育完整。由于沉降速率逐渐减少,沉积中心向盆地方向迁移。

为了分析构造沉降速率大小和海平面升降幅度对层序结构和层序(界面)类型的影响,可以分别改变构造沉降速率和海平面的升降幅度作模拟实验。当把海平面的升降幅度从 $\pm 200$  m增至 $\pm 250$  m时,其模拟结果见于模拟剖面 2(图 3)。与模拟剖面 1相比不难看出,海平面的升降幅度的增大,使沉积体系在海平面下降时明显向海方向推进,有利于低位域的发育和 I 型层序的形成;而在海平面上升时,又使沉积体系明显向陆地方向退覆,沉积体系发生长距离的迁移,形成具有明显海进海退的沉积层序结构,与剖面 1 有显著的不同。

剖面 3(图 3)是加大沉降速率一个模拟结果,沉降速率从开始的  $120 \text{ m/Ma}$  减到  $20\sim 25 \text{ m/Ma}$ ,其它条件与剖面 1 的模拟条件相一致。快速的沉降导致了相对海平面的大幅度的上升,斜坡外形成深水盆地。发育的层序以 II 型层序为主,发育边缘体系域,低位体系域发育差或不发育。沉积层序的几何形态与剖面 1 和 2 有显著的差异。

不难看出,盆地沉降、海平面变化等因素对层序的几何形态、层序界面及沉积体系域发育和分布具有重要的控制作用,变化不同的参数产生的沉积层序的内部构造和外部形态显示出明显的差异。一个研究实例是南海第三纪莺歌海-琼南盆地的沉积层序结构的模拟<sup>[21]</sup>。盆地中中新世以来发育的层序组(T3界面以上)是在盆地总体拗陷下沉的背景下发育的,划分出 7~9 个三级层序。它们又构成向海方向进积的层序组,但在向岸方向不是顶超的,而是上超或垂向叠置的。在斜坡外的水深不断加大,即陆坡逐渐加高。模拟表明,这种特定的层序结构是在相对海平面总体上升、大量沉积物供给并伴随着海平面周期性波动的背景下形成的。与下列形成条件有关:(1)相对海平面总体是上升的,显然与盆地总体拗陷下沉有关;(2)沉积物供给量大于总的可容纳空间;

(3)海平面周期性波动。模拟结果显示了层序内部的沉积相分布样式。这对分析这些进积层序的岩相构成和储集体分布有重要指导意义。

## 4 结语

近年来发展起来的层序地层模拟技术已成为层序地层分析的重要手段。本项研究建立了综合性的二维层序地层模拟系统 SSMS。该模拟系统综合考虑了盆地的构造沉降、重力均衡作用、海(湖)平面升降、沉积物供给、侵蚀作用、沉积物分布和压实等因素。盆地沉降的确定可用正演的盆地形成理论模型计算,或应用反演的回剥方法进行定量;沉积层序的分布主要通过沉积均衡面来定义;沉积基准面的变化考虑了多级别(变化幅度)的曲线叠加。

模拟实验表明,SSMS 模拟系统可用于定量分析盆地构造、海(湖)平面、沉积物供给等对沉积层序形成和分布、沉积层序的几何形态和内部构成的综合的控制作用,动态探讨沉积层序界面的形成过程和成因,从而可迅速检验地质模型和进行预测。应用 SSMS 系统模拟离散边缘盆地裂后阶段的层序发育,揭示了盆地沉降和海平面的变化幅度对层序界面、层序几何形态、层序内沉积体系域的发育程度等的控制作用。对莺-琼盆地中新世以来的沉积层序的形成过程和控制因素进行了模拟,指出其特定的层序结构是在相对海平面总体上升、大量沉积物供给并伴随着海平面周期性波动的背景下形成的。

## 参 考 文 献

- 1 林畅松,张燕梅.拉伸盆地模拟理论基础与新进展.地学前缘,1995,2(3):79~88
- 2 李思田,林畅松.论沉积盆地分析新进展.当代地质学科前沿,武汉:中国地质大学出版社,1993.422~426
- 3 Jervey M T. Quantitative geological modelling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression. In Wilgus C K, et al. ed. Sea-level Changes: an integrated approach. Soc. Econ. Palaeontol. Mineral. Spec. Publ. 1992.42:47~69
- 4 Lawrence D T, Doyle M, Aigner T. Stratigraphic simulation of sedimentary basins: Concepts and calibration. AAPG, 1990, 74(3):273~295
- 5 McKenzie D. Some remarks on the development of sedimentary basins. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 40:25~32
- 6 Kusznir N J, Ziegler P A. The mechanics of continental extension and sedimentary basin formation: A simple-shear/pure-shear flexural cantilever model. Tectonophysics, 1992, 215:117~131
- 7 Athy L F. Density, Porosity and compaction of sedimentary

- rocks. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., 1930, 14: 1~24
- 8 Allen P. A., Allen J. R. Basin Analysis: principles and applications. London: British Petroleum Company plc, 1992. 43~143
- 9 Falvey D. A., Middleton M. F. Passive continental margins: evidence for a prebreakup deep crustal metamorphic subsidence mechanism. In Colloquium on Geology of Continental Margins (C3, Paris, 7-17 July 1980). Oceanologica Acta, 4 (Supplement), 1981, 103~114
- 10 Turcotte D. L., Ahern J. L. On the thermal and subsidence history of sedimentary basins. Journal of Geophysical Research, 1977, 82: 3762~3766
- 11 Tetzlaff D. M. Clastic simulation model of clastic sedimentary processes. AAPG Bulletin, 1986, 70: 655
- 12 Bridge J. S., Leeder M. R. A simulation model of alluvial stratigraphy. Sedimentology, 1979, 26: 617~644
- 13 Bitzer K., Harbaugh J. W. DEPOSIM: a Macintosh computer model for two-dimensional simulation of transport, deposition, erosion, and compaction of clastic sediments. Computers and Geosciences, 1987, 13(6): 611~637
- 14 Aigner A., Brandenburg A., Viet A. V., et al. Stratigraphic modelling of epicontinental basins: two applications. Sedimentary Geology, 1990, 69: 167~190
- 15 Douglas J. Cant. Geometric modelling of facies migration: theoretical development of facies successions and local unconformities. Basin Research, 1991, 3: 51~62
- 16 Nakayama K., Christopher G. St. C., Kendall. A simulation of basin margin sedimentation to infer geometry and lithofacies: a carbonate example. In Taira A., Masuda F., ed. Sedimentary Facies in the Active Plate Margin. Terra Scientific Publishing Company, 1989. 17~31
- 17 David J. R., Michael S. S., Bernard J. C. Modeling the Stratigraphy of Continental Margins, Margin Continental Margin Stratigraphy, 1990 and 1991 report Lamont-Doherty Geological Observatory, An Institute of Columbia University dedicated to research in earth sciences, 1991. 77~87
- 18 Edward J. Tarbuck, Frederick K. Lutgens. The earth: an introduction to physical geology, Merrill Publishing Company, United States of America. 1987. 196~231
- 19 Vail P. R., Mitchum, Thompson. Global cycles of relative changes of sea level. AAPG, 1977, 26
- 20 林畅松, 李思田, 任建业. 断陷湖盆层序地层研究和计算机模拟. 地学前缘, 1995, 2(3): 124~177
- 21 Lin Changsong, Zhang Yanmei, Li Sitian, et al. Sequence stratigraphy modeling of sedimentary basins: application to Erlian and Yinggehai basins in East China. Earth Sciences, Journal of China University of Geosciences, 1996, 7(1): 132~137

## Tow-Dimensional Depositional Sequence Simulation

Lin Changsong<sup>1</sup> Xie Xinong<sup>2</sup> Zhang Yanmei<sup>1</sup> Lin Jingyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(China University of Geosciences, Beijing 100083) <sup>2</sup>(China University of Geosciences, Wuhan 430074)

### Abstract

A quantitative tow-dimensional depositional sequence model has been formulated to simulate the filling process of sedimentary basins. The system consists of two subsystems: basin subsidence modelling and basin filling simulation, taking into account sea level change, tectonic subsidence, compaction of sediments, flexural isostatic compensation, erosion and sedimentation. Input basin subsidence rate can be derived by backstripping technique, or be calculated by quantitative forward basin models. Geometric models, combined with diffusion models, have been used in the system to determine depositional surfaces and facies geometry. The system can be used to analysis the controlling processes of sedimentary basins and to predict sequence architecture and facies distribution within basins. The model has been alogrumthed to simulate the sedimentary filling of continental margin basins and shown that the tectonic subsidence rate variation and the amplitude of sea level change have a strong influence on the geometry and depositional style of basin fills.

**Key Words** depositional sequence computer simulation