

湖平面相对升降对断陷湖盆充填过程影响的数值模拟

蔡希源¹, 辛仁臣²

1. 中国石化西部新区勘探指挥部, 新疆乌鲁木齐 830000

2. 中国地质大学海洋地质学研究中心, 北京 100083

摘要: 数值模拟工作的研究对象多为海相被动大陆边缘盆地, 湖平面相对升降对盆地充填过程影响的数值模拟尚处于起步阶段. 根据松辽断陷盆地的充填特征, 采用数值模拟方法, 模拟了在湖平面总体上升背景下, 3个湖平面变化周期的断陷湖盆充填特征. 在模拟过程中, 假定构造沉降和碎屑供应为常数, 湖平面升降为一正弦函数. 模拟结果表明: (1) 每一个湖平面升降周期形成一个相应的层序, 在湖平面升降周期的极小值点形成层序界面; (2) 湖平面升降规模直接控制了所发育的层序规模, 所模拟的3个湖平面升降周期中, 第二周期湖平面升降规模较大, 所形成的层序的分布范围及厚度均较大; (3) 湖平面升降所形成的沉积层序要很好地保存下来, 必须具备以下条件: ①湖平面保持总体上升, 在总体上升的背景上叠加次一级的湖平面升降; ②在湖平面发生周期性变化的同时, 叠加盆地基底的沉降. 在具备上述条件下所得到的模拟结果与实际剖面吻合较好.

关键词: 断陷盆地; 充填特征; 湖平面升降; 数值模拟.

中图分类号: P628; P618.130.2

文章编号: 1000-2383(2004)05-0539-04

收稿日期: 2004-06-12

Numerical Simulation on Filling Process of Faulted Basin in Response to Lake-Level Change

CAI Xi-yuan¹, XIN Ren-chen²

1. Headquarter of Prospect for Oil and Gas of Western New Developed Area, SINOPEC Corp., Urumqi 830000, China

2. Institute of Marine Geology and Geophysics, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Understanding the filling process in response to variation of lake-level is important in faulted basin. In this paper, numerical simulation has been applied to analyze the filling characteristics of the Songliao faulted basin. To assess the effect of different parameters on the filling characteristics, lake-level change, tectonic subsidence and sediment supply are taken into consideration. Based on the filling features of the Songliao faulted basin, we simulated filling characteristics of this faulted basin during 3 lake-level fluctuated periods, in which tectonic subsidence and sediment supply are supposed as constants, and the lake-level change follows a sin-function. The modeling results indicated that: ① Variation of lake-level in the faulted basin is well compared with the global sea-level change. One cycle of lake-level change results in formation of a corresponding sequence, in which a sequence boundary formed at the lowstand period of lake-level; ② Amplitude of lake-level change controlled the distribution of corresponding sequence unit, the larger the lake-level change is, the larger the distribution area and the thicker the sedimentary thickness of the corresponding sequence are; ③ The sequence units due to lake-level change are well reserved at following favorable conditions, such as the subordinate lake-level change under the background of a continuous rise of lake-level or tectonic subsidence. The numerical modeling results in agreement with measured sequences have demonstrated the architecture of sequence units and filling processes in the Songliao faulted basin.

Key words: faulted basin; filling characteristics; lake-level change; numerical simulation.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40272057); 国家重点基础研究发展规划“973”项目(G19990433).

作者简介: 蔡希源(1953-), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为含油气盆地分析. E-mail: caixiyuan@sina.com

盆地充填过程数值模拟是一项复杂的系统工程,需要综合考虑盆地构造活动历史、沉积基准面的变化、物源供应、气候变化等多种因素.许多学者在盆地充填过程动力学数值模拟方面进行了有益的探索.Tetzlaff (1986)、Bitzer and Harbaugh(1987)采用水动力学方法进行了沉积物的搬运、分散和堆积过程模拟研究;Nakayama *et al.* (1989)、Lawrence *et al.* (1990)、Douglas(1991)采用几何学方法模拟研究了盆地充填的宏观过程和沉积层序的几何形态;Jervey(1988)成功地进行了层序地层学模拟,揭示层序形成演化的控制因素.但上述数值模拟工作的研究对象多为海相被动大陆边缘盆地.林畅松等(1995)、胡受权等(1998)重点模拟了构造沉降对断陷湖盆陆相层序的影响,胡宗全和朱筱敏(2002)对具有坡折带地形的坳陷湖盆层序地层进行了模拟.本文着重讨论湖平面相对升降对湖盆充填过程的影响.

1 基准面升降及可容空间变化分析

可容空间变化可依据基准面升降曲线来分析.因基准面相对升降变化曲线是构造沉降速度、全球海平面升降速度和沉积物供应速度三者之间关系的集中体现,这3种因素作用的结果导致可容空间的变化.相对基准面升降曲线反映了可容空间的变化,相对基准面上升,可容空间增大;相对基准面下降,可容空间减小.基准面相对升降变化曲线的极小值对应着层序界面.

根据同位素分析资料、古生物及古地磁资料分析,松辽盆地火石岭组地层的底界(SB1)年龄为 156 Ma,沙河子组的底界(SB2)年龄为 144 Ma,营城组的底界(SB4)年龄为 136 Ma,营城组顶界(SB5)年龄为 124 Ma.层序界面(SB3)和各层序最大洪泛面的绝对年龄根据沉积厚度进行估计,所以各层序界面的绝对年龄可能有些误差,各层序绝对年龄具有相对性.

以徐家围子断陷 18.5 和 81.0 测线的上起点为基础,经过差异沉降校正、脱压实校正、水深校正和剥蚀厚度校正等编制的松辽断陷盆地相对湖平面升降曲线见图 1.

由基准面相对变化曲线可以看出盆地在不同时期沉降速度的变化,基准面相对变化曲线的直流分量可以看作可容空间的相对变化.沙河子期基准面相对升降变化曲线幅度最大,反映其可容空间大.

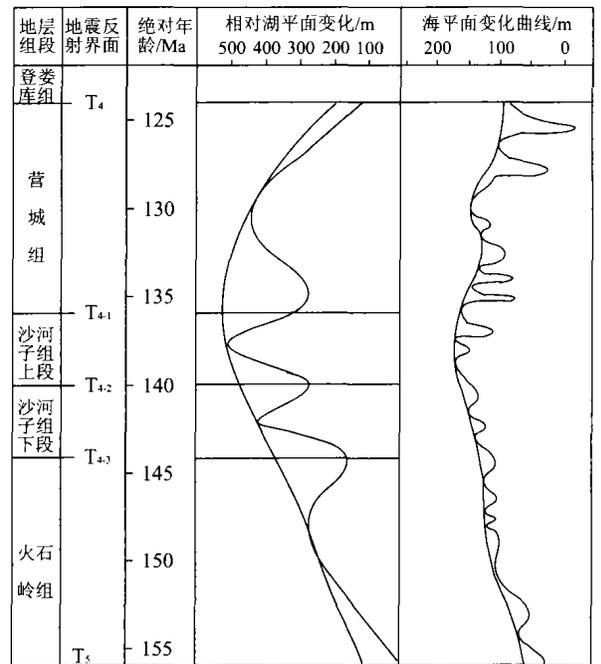


图 1 松辽断陷湖盆湖平面变化曲线与全球海平面变化曲线对比

Fig. 1 Correlation of change curves of lake-level of Songliao fault basin and global sea-level

由构造沉降史模拟可知沙河子组构造沉降大,由此推断可容空间主要受构造沉降控制.

利用该曲线与全球海平面变化曲线进行比较,可以看出大的周期具有相似之处,从 156 Ma 开始,到 137 Ma 左右,松辽断陷的基准面和全球海平面总体上均表现为上升;而 137~124 Ma,总体表现为下降.这很可能反映了全球构造运动的强烈影响,小的周期则存在明显差异.

2 断陷盆地层序形成的数值模拟原理

2.1 数学模型

层序地层模拟所采用的统一的数学模型综合考虑了基准面相对变化、构造沉降、陆源碎屑供应、内源碳酸盐沉积、重力流沉积及沉积物侵蚀再沉积等诸多地质因素(Lawrence *et al.*, 1990; 胡受权等, 1998),其数学表达式如下:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = (P - W) + \frac{\partial F}{\partial x} + (S_0 c Z - E) + \frac{\partial G}{\partial x} + [v - u(\frac{\partial h}{\partial x})]$$

式中: h 为某一时刻沉积界面距离初始界面的高度(m); t 为发生沉积作用所经历的时间(Ma); P 为内

源碳酸盐沉积速率(m/Ma); W 为内源碳酸盐沉积物的侵蚀速率(m/Ma); F 为陆源碎屑注入通量(m^2/Ma); x 为研究点与初始位置的水平距离(m); S_0 为与悬浮沉积物负载成正比的沉积常数(Ma^{-1}); c 为悬浮沉积物厚度与水深之比; Z 为水体深度(m); E 为碎屑沉积物水下侵蚀速率(m/Ma); G 为重力流沉积物的注入通量(m^2/Ma); v 为基准面的横向迁移速率(m/Ma); u 为基准面垂向升降速率(m/Ma).

2.2 数学模型中各计算项的地质意义

($P-W$). 参数 P 、 W 分别代表的内源碳酸盐沉积速率和侵蚀速率均为水体深度的函数. 该项表征了内源碳酸盐沉积物的沉积与侵蚀对沉积界面高度 h 的贡献.

($\partial F/\partial x$). 该项代表陆源碎屑沉积通量 F 在水平方向上的变化, 碎屑沉积物通量大, 沉积速率快, 单位时间内的沉积厚度大. 该项用以描述碎屑物供应对沉积界面高度的贡献.

(S_0cZ-E). 该项表征了细粒悬浮物质沉积与侵蚀作用对沉积界面高度 h 的贡献.

($\partial G/\partial x$). 该项表示重力流沉积物供应通量在水平方向 x 轴上的变化, 用来表征重力流沉积对沉积界面高度 h 的贡献.

[$v-u(\partial h/\partial x)$]. 该项反映了基准面相对变化对沉积界面高度 h 的贡献. 构造运动、压实作用、湖平面升降均可引起基准面相对变化, 因此该项综合反映了构造运动、压实作用、湖平面升降对沉积界面高度 h 的贡献.

2.3 实际数值模拟数学模型及模拟流程

由于松辽断陷盆地为夹有火山岩的陆源碎屑沉积盆地, 缺少碳酸盐沉积, 故对上述通用数学模型中的第一项($P-W$)不予考虑. 在上述模型中, 没有考虑火山岩堆积对沉积界面的贡献, 考虑到松辽盆地的实际地质情况, 本文在实际数值模拟数学模型中加入火山岩堆积对沉积界面贡献一项. 实际数值模拟所采用的数学模型如下:

$$\partial h/\partial t = \partial F/\partial x + (S_0cZ - E) + \partial G/\partial x + [v - u(\partial h/\partial x)] + \partial V/\partial x.$$

式中: V 为火山物质的注入通量(m^2/Ma), 其他参数见前述. 该计算模型的计算机实现过程见图 2.

3 模拟参数的选取

3.1 初始参数选取

初始参数包括初始界面即盆地的最初几何形

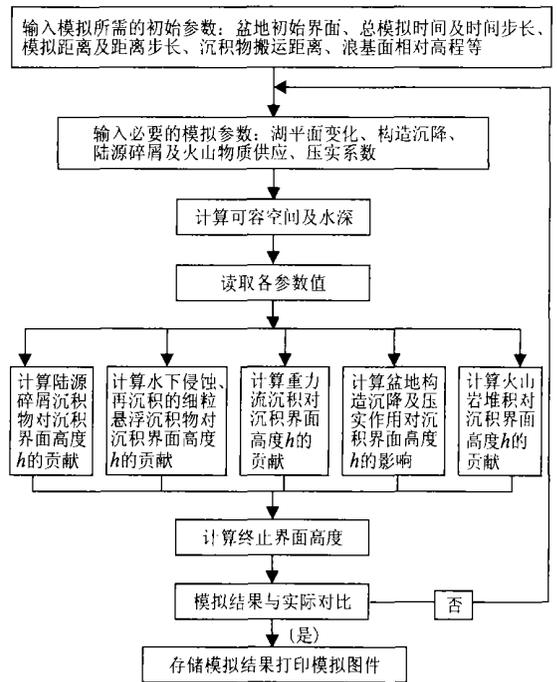


图 2 松辽断陷盆地充填过程计算机数值模拟流程
Fig. 2 Flow chart of numerical simulation on filling process of Songliao faulted basin

态、总模拟时间及时间步长、模拟距离及距离步长、沉积物搬运距离及浪基面深度等. 盆地的最初几何形态根据典型实际地震剖面的详细解释成果给定. 总模拟时间根据各层序的年代学研究结果给出(图 1). 时间步长选择 1 ka; 模拟距离据所模拟对象的实际规模来确定; 距离步长选择 100 m; 沉积物搬运距离根据物源确定; 浪基面深度选定 10 m.

3.2 模拟变量参数

模拟变量参数指湖平面变化、盆地构造沉降、陆源碎屑及火山物质供应和压实作用. (1)湖盆中湖平面变化可看作类似海盆中的海平面变化, 直接控制着沉积基准面的变化. 海平面变化常用正弦函数来描述, 根据在基准面变化曲线来拟合正弦函数, 用所拟合的正弦函数来描述湖平面变化. (2)在断陷沉降过程中, 盆地构造沉降总体表现为由慢—快—慢的沉降速率变化规律. 火石岭组总沉降速率平均值为 70.23 m/Ma, 构造沉降速率平均值为 25.9 m/Ma; 沙河子组总沉降速率平均值为 106.97 m/Ma, 构造沉降速率平均值为 36.83 m/Ma; 营城组总沉降速率平均值为 94.31 m/Ma, 构造沉降速率平均值为 28.53 m/Ma. 构造沉降用分段线性函数来描述. (3)陆源碎屑供应, 本文用线性函数来描述. 这一函数根

据典型剖面各层序的时间跨度和原始沉积地层厚度变化来确定。(4)火山物质供应,首先根据各层序火山岩的发育程度来给定火山喷发强度,再用递降函数来描述距离火山口不同位置的火山物质供应。(5)压实作用,沉积物堆积后的压实作用一般用指数函数来描述。需要指出的是,压实系数是随岩相带的变化而变化,因此需要依据不同的岩相带给定相应的压实系数,砂、砾岩压实系数选取 0.000 076,泥岩、粉砂岩压实系数选取 0.000 34。

4 模拟结果分析

现代湖泊沉积研究表明,湖平面变化周期受气候和区域构造沉降的直接影响,尤其是湖平面变化的气候周期很快。湖平面的变化直接影响着湖泊沉积特征,因此,湖泊沉积提供了良好的古气候记录。我们根据松辽断陷的实际情况,模拟 3 个湖平面变化周期的断陷湖盆充填特征。在模拟过程中假定构造沉降和碎屑供应为常数,湖平面升降为一正弦函数。模拟结果表明:(1)每一个湖平面升降周期形成一个相应的层序,在湖平面升降周期的极小值点形成层序界面;(2)湖平面升降规模直接控制了所发育的层序规模。本文所模拟的 3 个湖平面升降周期中,第二周期湖平面升降规模较大,所形成的层序的分布范围及厚度均较大;(3)湖平面升降所形成的沉积层序要很好地保存下来,必须具备以下条件:①湖平面保持总体上升,在总体上升的背景上叠加次一级的湖平面升降;②在湖平面发生周期性变化的同时,叠加盆地基底的沉降。在具备上述条件下所得到的模拟结果与实际剖面吻合较好(图 3)。

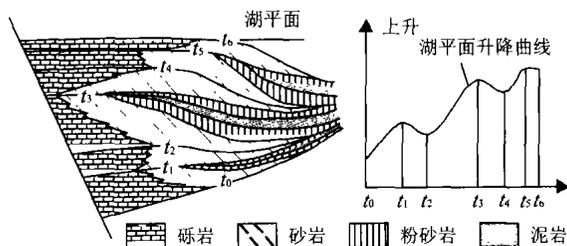


图 3 湖平面相对变化对断陷充填特征控制的数值模拟

Fig. 3 Results of numerical simulation on filling process of Songliao faulted basin in response to lake-level changes

- Bitzer, K., Harbaugh, J. W., 1987. Deposit: A macintosh computer model for two-dimensional simulation of transport, deposition, erosion, and compaction of clastic sediments. *Computer and Geoscience*, 13(6): 611–637.
- Douglas, J., 1991. Geometric modelling of facies migration: Theoretical development of facies successions and local unconformities. *Basin Research*, 3: 51–62.
- Hu, S. Q., Yan, Q. B., Wang, Y. M., et al., 1998. Computer simulation on influencing mechanism of structural factors on terrigenous sequence in fault-depressed lacustrine basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 12(2): 109–114 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Z. Q., Zhu, X. M., 2002. Sequence stratigraphic simulation of depression lake basin with tomographic ramp. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(2): 217–221 (in Chinese with English abstract).
- Jervey, M. T., 1988. Quantitative geological modelling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression. In: Wilgus, C. K., Hatings, B. S., Kendall, C. G., St. C., et al., eds., *Sea-level changes: An integrated approach. Soc. Econ. Palaeontol. Mineral Spec. Publ.*, 42: 47–69.
- Lawrence, D. T., Mark, D., Thomas, A., 1990. Stratigraphic simulation of sedimentary basin: Concepts and calibration. *AAPG*, 74(3): 273–295.
- Lin, C. S., Li, S. T., Ren, J. Y., 1995. Sequence architecture and depositional systems of Erlian lacustrine fault basin, North China. *Earth Science Frontiers*, 2(3): 124–132 (in Chinese with English abstract).
- Nakayama, K., Christopher, G., Kendall, C., 1989. A simulation of basin margin sedimentation to infer geometry and lithofacies: A carbonate example. *Sedimentary facies in the active plate margin*. Scientific Publishing Company, Terra, 17–31.
- Tetzlaff, D. M., 1986. Clastic simulation model of clastic sedimentary processes. *AAPG Bulletin*, 70(7): 655.

附中文参考文献

- 胡受权, 颜其彬, 王英民, 等, 1998. 构造因素对断陷湖盆陆相层序影响机理的计算机模拟. *中国海上油气(地质)*, 12(2): 109–114.
- 胡宗全, 朱筱敏, 2002. 具有地形坡折带的拗陷湖盆层序地层模拟. *沉积学报*, 20(2): 217–221.
- 林杨松, 李思田, 任建业, 1995. 断陷湖盆层序地层研究和计算机模拟——以二连盆地乌里雅斯太断陷为例. *地学前缘*, 2(3): 124–132.

References