

文章编号: 0253- 9985(2004) 05- 0596- 07

层序地层学的计算机模拟研究进展

闫伟鹏, 邓宏文, 王红亮

(中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 沉积盆地充填过程的计算机模拟在国际上 20 世纪 60 年代已开展了较为深入的研究, 层序地层计算机模拟是随着层序地层学的诞生而发展起来的一项新兴的盆地模拟技术, 属于沉积盆地充填过程模拟的范畴。目前应用较多的是正演模拟, 反演模拟正处于探索阶段, 已出现了反演模拟系统。一维和二维模拟发展的较为成熟, 三维模拟将成为主要发展方向。国际上该项技术的发展较快也较成熟, 中国的发展主要是应用该项技术对陆相层序地层进行模拟研究。层序地层模拟主要采用的数学模型包括沉积作用模型、构造沉降模型、负载沉降模型、压实作用模型以及侵蚀作用模型。随着研究的不断深入, 层序地层模拟将在模拟方法、模型设计、综合程度、模拟维数和陆相盆地应用等方面得到长足发展。

关键词: 层序地层; 计算机模拟; 正演模拟; 反演模拟; 数学模型; 展望

中图分类号: TE111. 3

文献标识码: A

Progress in computer modeling of sequence stratigraphy

Yan Weipeng, Deng Hongwen, Wang Hongliang

(China University of Geosciences, Beijing)

Abstract: Computer modeling of the filling process of a sedimentary basin has been relatively thoroughly studied in the 1960s. Computer modeling of sequence stratigraphy is a newly developed basin modeling technique along with the appearance of sequence stratigraphy. It is of the category of filling process modeling of a sedimentary basin. Presently, forward modeling is widely applied, while inverse modeling is still in research and several inverse modeling systems have been developed. 1-D and 2-D modeling are relatively mature, and 3-D modeling represents the trend of development. Internationally, this technique has been advancing more rapidly and is more mature, while it is mainly used to model continental sequence stratigraphy in China. Mathematical models that are applied in sequence stratigraphy modeling include sedimentation model, structural subsidence model, loading subsidence model, compaction model and erosion model. Along with the deepening of research, sequence stratigraphy modeling technique will make a rapid progress in respects of modeling method, design of models, degree of integration, simulation dimensions and its application in continental basins.

Key words: sequence stratigraphy; computer simulation; forward modeling; inverse modeling; mathematic model; prospect

沉积盆地是油气勘探开发的主要目标, 也是沉积学研究的重点。沉积盆地充填过程的计算机模拟在国际上 20 世纪 60 年代已开展了较为深入的研究, 但基本是在相对微观的尺度上模拟沉积物的搬运及沉积过程。从盆地规模上, 考虑构造沉降、沉积基准面变化、沉积物供给等综合作用对沉积地层几何形态及沉积相宏观展布的层序地层计算机模拟以及对沉积充填分析和预测产生了重

要的影响^[1]。层序地层计算机模拟是近年来随着层序地层学的诞生而发展起来的一项新兴的盆地模拟技术, 属于沉积盆地充填过程模拟的范畴。通过模拟可加深对层序发育和构成特征的认识, 帮助解决盆地内沉积体系和沉积相带的形成规律、地层展布的型式、沉积层序的发育规律及其与海平面变化和盆地沉降之间的关系等问题, 对生产和研究均具指导和预测作用^[2~5]。特别是随着

石油、天然气勘探程度的不断提高, 迫切需要对沉积层序进行宏观“控制”和精细描述及评价, 这恰恰促进了层序地层计算机模拟研究的发展。

1 层序地层计算机模拟的分类

盆地充填过程模拟和层序地层模拟可以根据模拟尺度分为大尺度模拟、中等尺度模拟和小尺度模拟; 根据模拟所采用的方法分为过程模拟和参控模拟; 根据模拟所采用模型的维数分为一维、二维和三维模拟; 还可以根据模拟过程中的数据流向分为正演模拟或过程-响应模式和反演模拟或从岩石记录到过程模式。笔者认为前3种分类方法都是针对以前和现在应用较多的正演模拟所进行的分类, 随着反演模拟的实现和发展, 应该首先将层序地层模拟分为正演模拟和反演模拟两大类, 然后按前3种分类方法可作下一级次的分类。那么, 正演模拟和反演模拟有什么区别? 能不能建立并正确求解的反演模型呢?

定量的地层正演模型是建立在假定过程参数和地层响应之间相互依存基础之上的, 试图用选择的过程参数的地层响应值模拟真实的地层属性, 常用的过程参数包括海平面升降、构造沉降、沉积物供给、侵蚀、搬运和沉积、压实和沉积地形等。正演模型的过程是通过和一个已描述好的地层进行视觉比较来确定的, 因而具有很大的不确定性。与之相比, 反演模型则试着匹配有限的定量参数值, 然后预测可能的或近乎正确的地层剖面。反演模型的主要作用是通过确定其输出结果与观测匹配的正演模型过程参数的大小和频率来帮助分析和解释经验观测结果的模型。由于地质现象是多种过程共同作用的结果, 因此对地层反演的可行性一直是有争议的^[6], 但 Cross 和 Lessen-ger^[7] 分析认为地层记录中的信息量足以使地层反演成为可能, 并且开发了二维硅质碎屑岩和三维碳酸盐岩反演模拟系统(CSM 2D 和 CSM Carbon-sim)^[8~9]。正演模型可进行预测, 而反演模型可求解与观察和预测相匹配的正演模型。

2 研究历史与现状

层序地层计算机模拟着重于模拟沉积充填及圈闭形成历史, 可视为盆地模拟的延伸。国外早在 20 世纪 60 年代就已开始了沉积盆地充填的定

量模拟研究。我国开始这方面研究的时间较晚^[10]。回顾它的发展历程, 大致可分为 3 个阶段。

2.1 模型的探索阶段

Sloss^[11] 提出了第一个现代地层模型, 实际上这是一个非定量的概念模型, 但该模型可以方便的用数学公式来表达, 因此可用于定量模拟。此后, Schwarzacher^[12] 尝试将 Sloss 的概念模型量化, 提出了一维沉积模型。第一个现代类型的盆地充填动态模型是由 Briggs 和 Pollack^[13] 提出的蒸发岩沉积模型。该模型给出了适当的古地理约束条件和方程的数值解。Harbaugh 和 Bonham-Carter^[14] 从 Sloss 的文章和 Briggs-Pollack 的蒸发岩沉积模型中得到了启发, 1970 年出版了经典著作《地质学的计算机模拟》。在这本书中, 作者给出了建立定量地层模型的途径、算法并提供了多个模型, 比如在一维和二维空间内的扩散、位势流、三角洲的演化以及蒸发岩和碳酸盐岩的沉积等^[15]。在这将近 10 年的时间里, 上述学者的研究工作都是以探索单一的定量化模型为目的的, 而不是针对某一地质过程开展定量模拟, 因此也可以说是处于方法准备阶段。

2.2 模型的提出和试验阶段

1978 年前后, 发表了许多关于沉降模型的文章, 开始了沉积学系统分析的新时代。McKenzie^[16] 提出了第一个拉伸环境下的热力沉降定量模型。第一个进行挠曲盆地沉降定量模拟的是 Haxby 等^[17]。Beaumont^[18] 提出了一个粘弹性岩石圈盆地沉降物理模型。几年以后, Jordan^[19] 和 Beaumont^[20] 提出了前陆盆地弹性和粘弹性一级模型。这些沉降模型为以后地层模型的建立奠定了基础。Pitman^[21] 根据构造沉降提出了第一个正式的关于滨线和海平面关系的分析。基于早期的定性研究, Leeder^[22] 提出了第一个定量冲积结构模型, 该模型为在充填动力学与中等规模的河流沉积结构之间建立定量关系提供了基础。此阶段的主要特征是沉积过程定量模拟研究。学者们将地质理论与数学和现代电子技术结合形成软件, Koerschner 和 Read^[23] 发展了一维计算机模拟软件来模拟台地碳酸盐的生长, Tetzlaff^[24]、Bitzer^[25] 等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。中国学者把 Sloss 的沉积盆地模式应用于我国东部黄骅坳陷南部的一个沉积盆地,

对沉积学的数学模拟作了初步尝试*。

从最初的沉降模型出现以后,许多学者相继提出了用于检验地层几何形态变化的不同沉降机制,这些地球动力学模型与更现实的沉积表面参数的结合促进了地层模拟的发展。但如何将上述不同的模型更好的结合,以更全面的反映沉积充填过程?在什么格架内进行模拟?这些问题成为地质学家们思考的重点。被誉为带有革命性进展的层序地层学的诞生,为盆地充填分析提供了建立等时地层格架和进行沉积体系域分析的方法理论,同时也极大地促进了盆地充填模型和动力学过程的深入研究。

2.3 实现和应用阶段

自1987年正式创建层序地层学以来,最先从事层序地层学计算机模拟工作的是Jervey^[26],他的《硅质碎屑岩层序及其地震表示的定量地质模拟》,对建立层序模式起了重要作用,Tetzlaff和Harbaugh^[27]的《模拟碎屑沉积作用》以及Cross^[28]的《定量动力地层学》的出版进一步促进了层序地层学计算机模拟的发展。此后,Kendall^[29]所在的地层学模拟研究组应用Jervey的方法开发的SEDPAK软件可以说是这方面的代表。SEDPAK考虑了碎屑岩、碳酸岩、沉积物供应、海平面变化、构造沉降、负载沉降和压实等因素。Steckel^[30]的SEQUENCE软件将动力学沉降模型(包括均衡和挠曲的影响)与沉积表面几何模型相结合进行层序地层模拟研究。Tetzlaff和Harbaugh领导开发的SEDSIM软件是一个三维的、过程的模拟软件^[2],主要用于河流沉积和海岸沉积过程的模拟,包括流体的流动、碎屑沉积物的搬运、沉积和侵蚀,以及波浪作用的影响、沉积物的压实和均衡沉降等。Syvitski^[31]等所在的科罗拉多大学的极地和阿尔卑斯研究所(INSTAAR—Institute of Arctic and Alpine Research)开发的SEDFLUX软件为一个综合的二维海相盆地充填模型^[15],该软件用于模拟大陆边缘沉积物的搬运和输送。INSTAAR研究所计划基于SEDFLUX软件再开发一个综合三维模型,目前暂时命名为EARTHWORKS,它将冲积系统(侵蚀的和沉积的)与水文学相结合,这样就能模拟气候的影响。Warrlich和Waltham^[32]开发的CARBONATE 3D是一个三维正演模拟软件,它可以模拟纯碳酸盐

岩地层和碳酸盐岩-硅质碎屑岩混合地层的发育,该软件可以用于多个不同的碳酸盐岩台地环境(边缘斜坡、孤立或附属地台、碳酸盐岩斜坡以及碳酸盐岩-硅质碎屑岩混合系统),并可以模拟各方向的沉积物搬运。

中国学者开始从事层序地层计算机模拟研究的时间较晚,没有经过对模型的探索阶段,基本上是应用国外已成熟的模型。由于起点较高,已成功开发了一些模拟系统。林畅松等^[33~35]先后开发了综合性的二维沉积层序模拟系统SSM和SSMS。在SSMS系统中,盆地的沉降过程模拟与盆地充填过程模拟由两个系统构成,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。樊太亮等^[36]自主开发的层序地层模拟系统——SSBM,考虑了沉积作用、构造沉降、压实作用和侵蚀作用,应用该系统对新疆塔里木盆地北部三叠系和石炭系层序进行了模拟。此外,胡宗全^[37]、阮同军^{*, [38]}、李剑峰^[39]、于炳松^[40]针对中国陆相盆地的特点,在陆相层序地层计算机模拟方面作了很多工作。胡受权等^[41~44]在Waltham等人所提出的层序地层模拟方程式的基础上,综合考虑陆源碎屑物供给、内源碳酸盐岩沉积、沉积物侵蚀与再沉积、重力流沉积以及构造升降和水平位移等诸多地质因素,建立了一个能够模拟各类型盆地的、统一的综合数学物理方程式,并自行研制了定量层序地层模拟系统。

上述各种沉积充填和层序地层模拟系统都属于正演模型,Cross, Lessenger等^[7~9]应用反演模型的设计方法,开发了描述大陆到海相陆架环境硅质碎屑岩二维地层反演模拟系统CSM 2D和三维碳酸盐岩地层模拟系统CSM Carbsim。CSM 2D系统建立在地层基准面原理和A/S(可容纳空间/沉积物供给)比值、流体力学和势能及所产生的沉积相之间的关系基础上,因为该系统不是基于扩散作用的,因此可以正确模拟极低角度(小于或等于0.001°)的海岸平原地形。CSM Carbsim系统综合分析物理能量和生物能量对碳酸盐岩生长环境的影响,建立了一个非线性方程模拟碳酸盐岩地层

* 周书欣,马立桥.沉积体系数值模拟技术[A].储层评价研究进展[C].中国石油天然气总公司科技发展部,1990

* * 阮同军.沉积层序3D计算机模拟[D].北京:中国地质大学,1994

的发育,其模拟结果可以显示斜坡到台地的演化、海平面与沉积体几何形态的关系和三维岩相的分布,并且可以模拟岩石的物性(孔隙度和渗透率)。

3 数学模型和实例

3.1 正演模拟

目前,适用于碳酸盐岩和硅质碎屑岩正演模拟的数学模型很多,不同的学者在设计模拟系统时,针对系统功能选择合适的数学模型。

碳酸盐岩正演数学模型较为简单,一般认为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^[35]。

(硅质)碎屑岩正演数学模型较为复杂,所采用的主要模型有:沉积作用模型、构造沉降模型、负载沉降模型、压实作用模型以及侵蚀作用模型等。沉积作用是指被搬运进入海洋或湖盆的物质在堆积下来时的分布方式。影响沉积物的堆积方式的因素多种多样。可以对河流水流运动和沉积物流量进行数学描述,由此可计算出沉积物的质量、体积密度和沉积物颗粒的终点坐标。盆地构造沉降的确定是层序地层模拟中的关键问题之一。构造沉降是起因于盆地周缘以外或基底以下,属于盆地以外的“外因”。可用正演或反演的方法进行定量描述^[35]。此外在盆地充填模拟过程中还必须考虑负载沉降。

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。在层序地层计算机模拟中建立剥蚀作用模型是不可缺少的,但侵蚀作用的成因极其复杂,目前还没有一个十分合适的数学模型来描述,通常将多种方法进行比较,选择最合理的使用。常用的是 Pitman 等人的剥蚀作用数学模型。

3.2 反演模拟

Cross 等^[7~9]的地层反演数学模型采用的是 Lerche^[45]设计的反演算法,这种算法比交互式算法计算费时少。由于篇幅所限,只简单介绍一下 Lerche 的反演算法模型。该模型由3个部分组成(图1,图中“?”表示判断模拟预测的结果是否与实际观察最佳拟合):第一部分为地层正演模型,是用一组用户确定的过程参数值(如海平面升降、构

造运动、沉积物补偿、载荷补偿、地形梯度、压实作用等)和描述正演模型参数行为(过程-响应相互作用)的逻辑组对地层进行模拟。第二部分是用于与正演模型输出结果相比较的观察资料,在地层学中,实际观察可以是岩石类型、结构、厚度、几何形态或岩石物性。对反演模型的观察内容的限定是其必须可以与正演模型输出的数据具有直接的和量的可比性。上述两个部分被第三部分,即数学反演算法连接起来。反演算法能够比较正演模型输出的值和实际观测值。在进行比较之后,反演算法亦能够调整正演模型参数值,使模拟预测更接近于实际观察。该算法反复比较观测值,并不断调整正演模型参数值,直到模拟值与观测值之间的差异达到最小并获得最佳拟合为止。

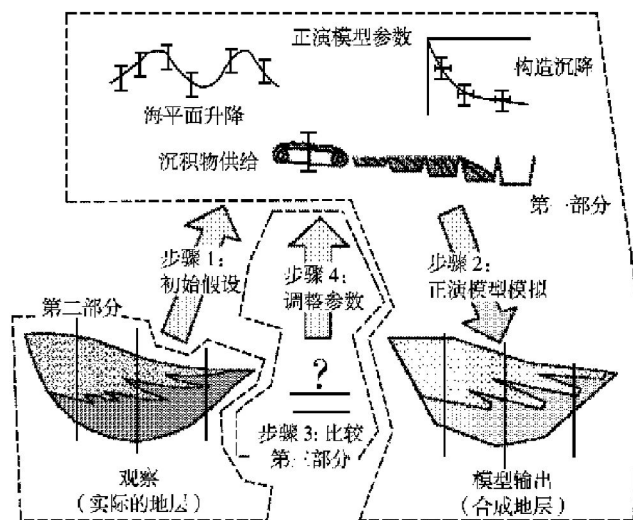


图1 地层反演模型流程图

Fig. 1 Flow chart of stratigraphic inverse modeling

Cross 等^[7~9]应用上述模型对科罗拉多洲西南和墨西哥洲西北面的 San Juan 盆地 Mesa Verde 群的楔状碎屑岩地层进行了反演。该盆地钻井密度大,大部分地区井距控制在 440 m 以内,沿盆地边缘出露了完好的 Mesa Verde 群,有一部分取心资料,可用于校正测井曲线。

图2是从多次反演模型模拟计算中得到的一个典型结果。在反演过程中用不同井、不同井数、不同地层位置的井、不同数量的地层单元进行模拟计算。结果表明,Mesa Verde 群下半部分的滨面砂岩,从左到右向上、向海方向呈阶梯状形态,模拟结果同样呈进积作用样式。该模型准确预测了滨面相的界限或称楔状碎屑岩的转换位置。Mesa

Verde 群的上半部的滨面相, 形成 8~15 km 宽的阶地向陆方向(左)渐进。该模型几乎准确地匹配了这些阶地个数、位置和大小。模型还模拟出了 55 km 长的滨面相域, 从上覆地层剖面的转换位置(靠近 400 km 刻度处)一直向陆进入阶地的最低位

置(靠近 340 km 刻度)。模型预测结果与测井横剖面之间的一个重要差别是位于剖面右边的海相陆架地层厚度, 模拟的陆架剖面比观测值要薄一点, 这是由于模型中的一个算法没有相当准确的模拟地层-过程响应系统。

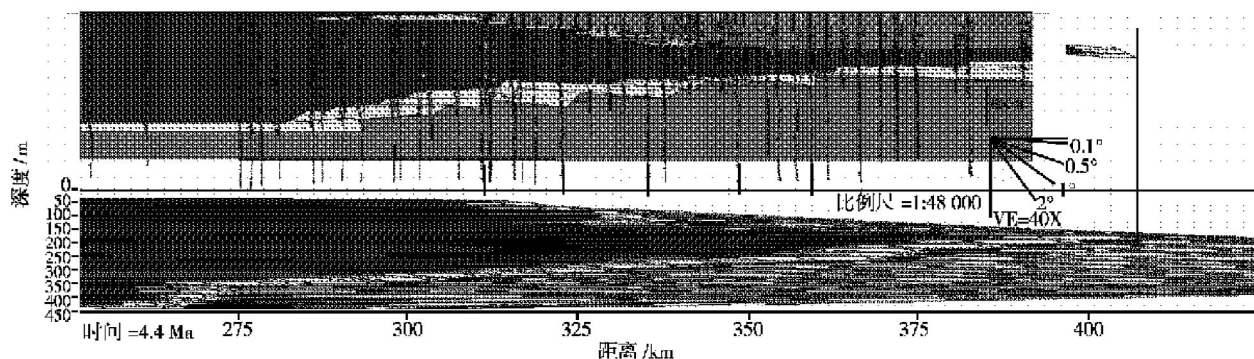


图 2 San Juan 盆地 Mesa Verde 群实际观察地层(上部剖面)与最佳估计地层反演模型预测结果(下部剖面)的比较

Fig. 2 Comparison of predications of the best estimate stratigraphic inverse model (the lower section) with stratigraphic observations (the upper section) of the Mesa Verde Group in San Juan basin

该反演实例证明了地层反演模拟可以得出更接近于实际地层的模拟结果, 并且可以用少量的观测数据同时解决多个过程参数值。随着层序地层定量研究的深入, 反演模拟必将成为层序地层模拟的主要发展方向。

4 未来展望

层序地层计算机模拟技术的产生和发展, 实现了层序地层学由定性研究向定量研究的质的飞跃, 这对层序地层理论发展和盆地沉积分析及定量预测产生了重要作用^[46~52]。随着勘探技术的发展, 人们对沉积盆地和层序形成机理的认识必将大大加深。因此, 未来层序地层发育过程的地质模型和数学模型必将趋于完善, 层序地层计算机模拟技术亦将不断发展。

(1) 从正演模拟向反演模拟发展。尽管对于地层反演是否可能存在争论^[6~9,47], 地层反演无疑为层序地层的定量预测提供了更为准确的检验方法, 特别是在油气勘探过程中, 正演模拟无法确定哪一个结果与实际情况更加匹配, 而反演模拟在达到匹配的这一过程中效率更高。

(2) 模型将更加完善。从 20 世纪 60 年代以来, 已涌现出各种地质过程模型, 但这些模型还不能满足对复杂的沉积层序形成过程模拟的要求,

比如还没有合适的沉积作用模型和剥蚀作用模型用于层序地层模拟, 对于大尺度的风成层序的模拟也未取得突破。随着模拟对象的深入, 也要进一步考虑古水力系统的恢复以及热史等因素, 这需要完善已有的模型并发展新的模型。

(3) 从简单向综合发展。在模拟过程中, 对问题的简化是必要的, 但随着计算机功能的日益强大, 我们的模型可以像真实系统一样复杂, 一个包括尽可能多的过程参数和更详细描述的地层模型能够使模拟结果与实际地层更匹配。大范围的计算模型要求将更多模型整合以模拟复杂的沉积层序形成过程, 如碳酸盐岩模型与碎屑岩模型的结合以及盆地流体模型与地层动力响应模型的组合。油气勘探的不断深入也要求不仅模拟地层几何形态、相域的时空分布、岩性和/或粒度、地形和水深等地层性质, 还要模拟岩石物性(孔隙度和渗透率)、非均质性等内容。因此, 结合多种模型的综合模拟必将成为层序地层模拟的发展方向。

(4) 提高模拟维数, 向三维发展。与一维和二维模拟相比, 三维模拟可以模拟更复杂的层序形成过程, 如沿不同的走向有变化的古地形和存在几个方向的沉积物搬运的情况, 而强大的图形显示功能也使三维模拟结果更直观, 使研究人员能很快地从结果中得到有用信息。正如 Harbaugh 指

出“三维图形显示技术将对传统地质学产生巨大冲击”, 三维模拟必将逐渐取代一维和二维模拟而成为研究的主要内容^[46]。

(5) 从海相模拟向陆相模拟发展。国际上的研究大都是针对海相盆地而言的, 一些参数及条件的选择没有考虑到陆相盆地的具体情况, 中国学者在对中国陆相盆地进行层序地层模拟时已作了一些探讨^[33~35], 但多是在国外已发展的模型基础上改进后直接应用于模拟。因此在陆相层序地层模拟中对层序的形成过程、层序界面的地质含义和识别特征及控制机理做出新的探讨, 建立陆相层序地层模拟的全新模式也将是今后的发展方向。

参 考 文 献

- 林畅松, 张燕梅, 刘景彦, 等. 高精度层序地层学和储层预测[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 111~117
- 李翔. 沉积盆地充填过程的计算机模拟研究[J]. 现代地质, 1994, 8(4): 393~402
- 邓宏文, 王洪亮, Cross T A, 等. 高分辨率层序地层学——原理及应用[M]. 北京: 地质出版社, 2002
- 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[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 89~97
- 邓宏文, 王洪亮, 李熙喆. 层序地层基准面的识别、对比技术及应用[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(3): 177~183
- Burton R, Kendall C G St C, Lerche I. Out of our depth: on the impossibility of fathoming eustasy from the stratigraphic record[J]. Earth Science Reviews, 1987, 24: 237~277
- Lessenger M A, Cross T A. An inverse stratigraphic simulation model is stratigraphic inversion possible? [J]. Exploration and Exploitation, 1996, 14: 627~637
- Cross T A, Lessenger M A. Sediment volume partitioning: rationale for stratigraphic model evaluation and high resolution stratigraphic correlation[A]. In: Gradstein F M, Sandvik K O, Milton N J. Sequence stratigraphy concepts and application[C]. NEF Special Publication, 1998, 8: 171~195
- Cross T A, Lessenger M A. Construction and application of a stratigraphic inverse model[A]. In: Harbaugh J W, Watney W L, Rankey E C, et al. Numerical experiments in stratigraphy: recent advances in stratigraphic and sedimentologic computer simulations[C]. SEPM Special Publication, 1999, 62: 69~83
- 郑小武, 邓宏文, 徐怀大, 等. 测井高分辨率层序地层划分技术与应用尝试[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(4): 357~360
- Sloss L L. Stratigraphic models in exploration[J]. Sedim Petrol, 1962, 32: 415~422
- Schwarzacher W. Sedimentation in a subsiding basin [J]. Nature, 1966, 543: 1349~1350
- Briggs L I, Pollack H N. Digital model of evaporate sedimentation [J]. Science, 1967, 155: 453~456
- Harbaugh J W, Bonham-Carter G. Computer simulation in geology [M]. New York: John Wiley & Sons, 1970
- Paola C. Quantitative models of sedimentary basin filling [J]. Sedimentology, 2000, 47: 121~178
- Mckenzie D P. Some remarks on the development of sedimentary [J]. Earth Planet Sci Lett, 1978, 40: 25~32
- Haxby W F, Turcotte D L, Bird J M. Thermal and mechanical evolution of the Michigan Basin [J]. Tectonophysics, 1976, 36: 57~75
- Beaumont C. The evolution of sedimentary basins on a viscoelastic lithosphere: theory and examples [J]. Geophys J R Astronom Soc, 1978, 55: 471~497
- Jordan T E. Thrust loads and foreland basin evolution [J]. AAPG Bull, 1981, 65: 2506~2520
- Beaumont C. Foreland basins [J]. Geophys J R Astronom Soc, 1981, 65: 291~329
- Pitman W C. Relationship between eustasy and stratigraphic sequences on passive margins [J]. Geol Soc Am Bull, 1978, 89: 1389~1403
- Leeder, M R. A quantitative stratigraphic model for alluvium, with special reference to channel deposit density and interconnectedness [A]. In: Miall A D. Fluvial sedimentology [C]. Can Soc Petrol Geol Mem, 1978, 5: 587~596
- Koerschner W F, Read J F. Field and modeling studies of Cambrian carbonate cycles, Virginia Appalachians [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1989, 59(5): 654~687
- Tetzlaff, D M. Clastic simulation model of clastic sedimentation [J]. AAPG Bull, 1986, 79: 655.
- Bitzer K, Harbaugh, J W. DEPOSIM: a Macintosh computer model for two-dimensional simulation of transport, deposition, erosion, and compaction of clastic sediments [J]. Computer and Geosciences, 1987, 13(6): 611~637
- Jervey M T. Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression [A]. In: Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G St C, et al. Sea level changes: an integrated approach [C]. SEPM Spec Publ, 1988, 42: 47~69
- Tetzlaff D M, Harbaugh J W. Simulating clastic sedimentation [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989
- Cross T A. Quantitative dynamic stratigraphy [M]. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1990
- Kendall C G St C, Strobel J, Cannon R, et al. The simulation of the sedimentary fill of basins [J]. Geophys Res, 1991, 96: 6911~6929
- Steckler M S, Strobel J, Mountain G S, et al. Reconstruction of Tertiary progradation and clinoform development on the New Jersey passive margin by 2-D backstripping [J]. Mar Geol, 1999, 154: 399~420
- Syvitski J P M, Pratson L, Morehead M D. EARTHWORKS: a large spatial scale numerical model to study the flux of sediment to ocean basins and reworking of deposits over various time scales [J]. EOS Suppl, 1997, 78: 258
- Warrlich G M D, Waltham D A, Bosence D W J. Quantifying the sequence stratigraphy and drowning mechanisms of atolls using a new 3-D forward stratigraphic modeling program (CARBONATE 3D) [J]. Basin Research, 2002, 14: 379~400

- 33 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——以二连盆地乌里雅斯太断陷为例[J]. 地学前缘, 1995, 2(3): 124~ 132
- 34 林畅松, 解习农, 张燕梅, 等. 二维沉积层序计算机模拟研究[J]. 沉积学报, 1998, 16(2): 68~ 73
- 35 林畅松, 张燕梅. 盆地的形成和充填过程模拟——以拉伸盆地为例[J]. 地学前缘, 1999, 6(增刊): 139~ 146
- 36 樊太亮, 徐怀大, 刘金辉, 等. 新疆塔里木盆地北部应用层序地层学[M]. 北京: 地质出版社, 1997
- 37 胡宗全, 李明娟. 准噶尔盆地西北缘侏罗系层序模拟与沉积相演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 351~ 361
- 38 阮同军. 硅质碎屑岩沉积层序三维计算机模拟系统[J]. 计算机应用研究, 1996, 13(6): 47~ 49
- 39 李剑峰. 动态定量盆地模型——层序地层学的计算机模拟[J]. 北京地质, 1996, 8(3): 32~ 40
- 40 于炳松. 碳酸盐岩层序形成的计算机模拟[J]. 沉积学报, 1996, 14(增刊): 18~ 24
- 41 胡受权, 王英民, 王勇. 断陷湖盆陆相层序过程—响应机制的单因素计算机模拟[J]. 贵州工业大学学报, 1998, 27(1): 62~ 70
- 42 胡受权, 陈国能, 王英民, 等. Fischer 图解及其沉积响应的计算机模拟——以泌阳断陷下第三系核三上段为例[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 70~ 75
- 43 胡受权. 湖平面变化及物源供给对陆相层序影响机理的计算机模拟[J]. 断块油气田, 2000, 7(6): 1~ 11
- 44 胡受权. 泌阳断陷双河—赵凹地区核三上段陆相层序形成过程的计算机模拟[J]. 河南地质, 2001, 19(2): 101~ 109
- 45 Lerche I. An inverse method for determining parameters of folded structures[J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1996, 54: 625~ 636
- 46 中国石油天然气集团公司油气储层重点实验室. 陆相层序地层学应用指南[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002
- 47 Burgess P M, Allen P A. A forward modelling analysis of the controls on sequence geometries[A]. In: Hesselbo S P, Parkinson D N. Sequence stratigraphy in British geology[C]. Spec Publ Soc London, 1996, 103: 9~ 24
- 48 徐怀大. 层序地层学理论用于我国断陷盆地分析中的问题[J]. 石油与天然气地质, 1991, 12(1): 52~ 57
- 49 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
- 50 蒲仁海. 断陷盆地层序地层学的几点进展[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 410~ 414
- 51 石万忠, 李举子, 李梦溪, 等. 时—频分析在高分辨率层序地层学中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(3): 234~ 237
- 52 吴智勇, 姜衍文. 全球旋回地层学述评[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(1): 15~ 21

(上接第 547 页)

中, 白东—歧中、歧东—羊二庄、板桥—北大港、南大港—羊三木、孔店—灯明寺等亚成藏体系成熟度均大于 0.4, 属高成熟亚成藏体系; 塘沽—新港和沧东裙边亚成藏体系成熟度分别为 0.297 和 0.264, 属中等成熟成藏体系; 润南、徐扬桥—黑龙村、盐山裙边、茶淀—新河村、大神堂亚成藏体系成熟度较低, 属低成熟成藏体系; 东光裙边亚成藏体系成熟度为 0.055, 属未成熟成藏体系。

4 结语

由于成藏体系在概念和内涵上与含油气系统存在较大不同, 它是从盆地结构和油气聚集的角度对地下客观油气系统进行的一种新揭示, 因而在划分原则和研究方法上自然与含油气系统存在较大差别。成藏体系三大结构元素及其成熟度的层次性特征为其定量评价提供了可操作框架, 本文的实例研究表明, 元素定量评价揭示了成藏体系及其内部单元成藏元素(烃源体、输导体和圈闭体)的质量优劣; 成藏体系成熟度指标反映了成藏体系三元素之间的相互匹配和耦合程度, 是成藏体系成藏条件的综合定量表征; 成藏体系定量评

价为含油气盆地在成藏体系格架内进行资源评价奠定了基础, 同时有利于对比同一盆地内或不同盆地间的成藏条件差异, 最终为勘探决策和目标优选提供定量化依据。因此, 成藏体系定量评价具有重要的勘探实用价值。

参 考 文 献

- 1 金之钧, 张一伟, 王捷, 等. 油气成藏机理与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003
- 2 大港油田科技丛书编委会. 第三系石油地质基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999
- 3 王子煜, 漆家福, 陆克政. 黄骅坳陷东部构造带新生代构造沉降史分析[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 127~ 129
- 4 郑浚茂, 吴仁龙. 黄骅坳陷砂岩储层的成岩作用与孔隙分带性[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(4): 268~ 275
- 5 Saaty T L. The analytic hierarchy process, planning, priority setting, resource allocation[M]. New York: McGraw-Hill, 1980
- 6 金之钧, 施比伊曼 B H, 武守诚. 油气资源定量评价系统, 盆地与油藏研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998
- 7 金之钧, 张金川. 油气资源评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999
- 8 于志海, 杨池银, 廖前进, 等. 黄骅坳陷天然气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997