

资助项目：

国家自然科学基金项目(No.47580320)

中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CUGL100412)

教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(2009022014)

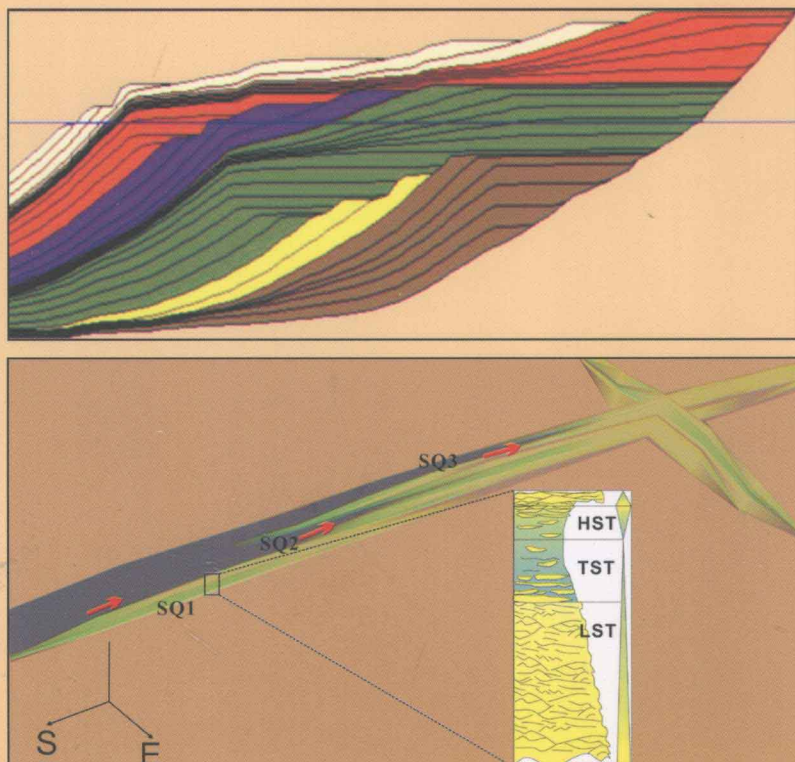
霍英东教育基金会资助项目(132020)

LUNEI KRATON PENDI SUYUANTUIJI

CENGXU GOUXING XINGCHENG JILI DE DINGLIANG MONI

陆内克拉通盆地“溯源退积” 层序构型形成机理的定量模拟

朱红涛 Keyu Liu 刘强虎 刘忠保 著



中国地质大学出版社有限责任公司

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

国家自然科学基金项目(No. 47580320)

中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CUGL100412)

教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(2009022014)

霍英东教育基金会资助项目(132020)

陆内克拉通盆地“溯源退积”层序构型 形成机理的定量模拟

LUNEI KRATON PENDI SUYUANTUIJI CENGXU GOUXING
XINGCHENG JILI DE DINGLIANG MONI

朱红涛 Keyu Liu 刘强虎 刘忠保 著



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

图书在版编目(CIP)数据

陆内克拉通盆地“溯源退积”层序构型形成机理的定量模拟/朱红涛,Keyu Liu,刘强虎,刘忠保著. —武汉:中国地质大学出版社有限责任公司,2012.11

ISBN 978-7-5625-2750-3

I. 陆…

II. ①朱…②Liu…③刘…④刘…

III. 克拉通-内陆盆地-层序地层学

IV. P539.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 255975 号

陆内克拉通盆地“溯源退积”层序构型
形成机理的定量模拟

朱红涛 Keyu Liu 刘强虎 刘忠保 著

责任编辑:王凤林

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社有限责任公司(武汉市洪山区鲁磨路 388 号) 邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传真:(027)67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:230 千字 印张:8.875

版次:2012 年 11 月第 1 版

印次:2012 年 11 月第 1 次印刷

印刷:湖北睿智印务有限公司

印数:1—500 册

ISBN 978-7-5625-2750-3

定价:46.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

不同类型的盆地，其层序地层构型及其控制因素不同，不能简单套用，应该建立其独特的层序构型模式。但是，目前国内外的层序地层学研究主要集中在断陷湖盆、具有地形坡折带的坳陷湖盆、前陆盆地，对于克拉通盆地的层序地层学研究，一般都将其归入坳陷盆地的研究范畴，照搬坳陷盆地层序模式。因此，相对于其他类型的陆相盆地而言，专门对克拉通盆地开展的层序地层学研究工作明显投入不足，是学科发展的空白点，尤其是对其层序构型及其控制因素的研究有待于进一步加强，这项工作也将成为陆相层序地层学理论和实践的前沿课题。

陆内克拉通盆地具有封闭、有限且逐渐减小的可容纳空间、极平缓的斜坡带等典型的地质特征，必将造就独特的层序充填特征。笔者通过类比国内外两个典型的陆内克拉通盆地（我国鄂尔多斯盆地和澳大利亚 Surat Basin）的层序充填特征，提出该类盆地长期持续退积、短期进积的“溯源退积”层序构型。陆内克拉通盆地长期持续退积、短期进积的“溯源退积”层序构型模式是指陆内克拉通盆地所形成的三级层序的层序构型均为 LST 为主，TST 和 HST 相对不发育，对应的基准面旋回为上升半旋回为主的不完全对称旋回，具有长期持续退积（水进）、短期进积（水退）旋回特征；不同级别层序地层格架控制下的砂体，自下而上（从老到新），具有向物源区依次退积叠置的特征。该模式对陆内克拉通盆地层序的识别、划分及其对比具有一定的借鉴意义。

近几年沉积物理模拟和计算机模拟（numerical and physical modeling）是国际地质学的研究热点，是当前开展定量层序地层学研究的主要技术手段。本书借助层序地层学研究的定量模拟实验手段（计算机模拟、沉积物理模拟），对陆内克拉通盆地的“溯源退积”层序构型的控制因素进行定量模拟研究，如盆地边缘构造（活动减弱）、沉积物供给（逐渐减小）、湖平面变化（快升慢降）、古

地形（愈加趋于平缓）、“盆地充填”、源区气候变化和基准面上升造成的回水堆积等地质因素，揭示“溯源退积”层序构型的形成机制、刻画其形成过程。

本书提出的陆内克拉通盆地长期持续退积、短期进积的“溯源退积”层序构型和基于定量模拟技术进行定量化层序地层学的研究，研究成果对进一步丰富陆相湖盆层序地层研究手段和理论体系应具有一定的参考价值，也可以为陆内克拉通盆地层序地层研究和油气勘探提供新思路，具有理论研究和实践应用的双重意义。

衷心感谢中国石油天然气集团公司油气储层重点实验室——长江大学湖盆沉积模拟实验室的技术支持；SEDPACK 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；衷心感谢中国石油勘探开发研究院提供的 SEDSIM 三维地层模拟软件技术支持。由于笔者水平有限，如有疏漏和不妥之处，恳请广大读者对书中的不当之处批评指正。

朱红涛

2011 年 4 月

目 录

第 1 章 层序地层学模拟与沉积物理模拟的理论与方法·····	(1)
1.1 层序地层学模拟技术进展·····	(1)
1.2 沉积物理模拟技术进展·····	(10)
第 2 章 陆内克拉通盆地地质特征·····	(17)
2.1 地质特征·····	(18)
2.2 陆内克拉通盆地“溯源退积”层序构型·····	(20)
2.3 陆内克拉通盆地“溯源退积”层序构型涵义及其控制因素·····	(29)
第 3 章 陆内克拉通盆地地质模型构建及其模拟·····	(32)
3.1 地质原型模拟参数·····	(32)
3.2 地质原型模拟结果·····	(38)
3.3 模拟结果和地质原型对比·····	(47)
第 4 章 “盆地充填”对“溯源退积”层序构型影响的定量模拟·····	(49)
4.1 不考虑“盆地充填”的模拟参数·····	(49)
4.2 不考虑“盆地充填”条件下的模拟结果·····	(52)
4.3 “盆地充填”对“溯源退积”层序构型的影响·····	(60)
4.4 湖平面变化方式对“盆地充填”层序的影响探讨·····	(61)
4.5 小结·····	(65)
第 5 章 “沉积物供应”对“溯源退积”层序构型影响的定量模拟·····	(66)
5.1 层序地层计算机模拟参数·····	(67)
5.2 层序地层计算机模拟结果·····	(68)
5.3 “沉积物供应”对“溯源退积”层序构型的影响·····	(76)
5.4 小结·····	(79)
第 6 章 “湖平面变化”对“溯源退积”层序构型影响的定量模拟·····	(80)
6.1 层序地层计算机模拟参数·····	(80)
6.2 层序地层计算机模拟结果·····	(81)
6.3 “湖平面变化”对“溯源退积”层序构型的影响·····	(90)
6.4 小结·····	(94)
第 7 章 “盆缘构造”对“溯源退积”层序构型影响的定量模拟·····	(95)
7.1 层序地层计算机模拟参数·····	(95)
7.2 层序地层计算机模拟结果·····	(96)
7.3 “盆缘构造”对“溯源退积”层序构型的影响·····	(104)
7.4 小结·····	(109)

第 8 章 “古地貌变化”对“溯源退积”层序构型影响的定量模拟·····	(110)
8.1 层序地层计算机模拟参数·····	(110)
8.2 层序地层计算机模拟结果·····	(111)
8.3 “古地貌变化”对“溯源退积”层序构型的影响·····	(119)
8.4 小结·····	(122)
第 9 章 陆内克拉通盆地“溯源退积”层序构型形成机理探讨·····	(123)
主要参考文献·····	(126)

第1章 层序地层学模拟与沉积物理模拟的理论与方法

层序地层学已经被证实是一种有效的理论方法,广泛应用于海相、陆相盆地的层序分析、沉积充填过程及其沉积相时空分布、等时地层格架内的生—储—盖组合的油藏描述。由于相关学科及交叉学科(油气地质学、沉积学、海洋地质学、古气候学、古生物学、地球物理、同位素测年、地球化学、计算机模拟)的快速发展,促使层序地层学研究由定性向半定量—定量发展。近几年层序地层计算机模拟和沉积物理模拟(numerical and physical modeling)成为国际地质学的研究热点,是当前进行定量层序地层学研究的主要技术手段,近两年 AAPG annual meeting 上都有其专题报告,代表了当今层序地层学、沉积学研究的方向,值得持续开展深入研究工作。因此,大规模的地质研究、物理实验和数学模拟综合定量研究层序地层构型及其影响因素是当今层序地层学研究的方向。

1.1 层序地层学模拟技术进展

层序地层学模拟(有人称之为定量层序地层学)是构成层序地层学理论的重要部分,是层序分析的一项常规研究手段和技术方法,是对盆地沉降、湖平面的变化、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(顾家裕和张兴阳,2006;朱红涛等,2007)。计算机技术的不断发展,是模拟层序地层学研究的基础;随着油气田勘探开发的深入研究,对油气藏的认识要求也越来越高,需要深入揭示层序叠加模式和发育过程,刻画岩相纵向组合特征和横向上展布特征,研究沉积体系和沉积相带的形成规律,分析有利生油相带以及横向上储集相带的演变规律,明确在含油气盆地中生、储、盖在空间上的成藏配置关系等问题,这些为模拟层序地层学指明了研究空间和发展方向(解习农和李思田,1993;邓宏文,1995;林畅松等,2000;邓宏文等,2002)。

层序地层学模拟可以分为3个阶段:第一阶段(1960—1970s)为概念模型阶段,针对地质系统所提出的概念模型具有非定量、静态、概念性等特征,初步实现将地质过程转化为计算机代码,代表著作是 Harbaugh 和 Bonham—Carter(1970)的《Computer Simulation in Geology》;第二阶段(1970s 后期—1980s 后期)处于发展阶段,该阶段在明确参数定义、现实模式探讨、过程—响应关系的定量公式等方面进行了深入研究,使得研究计算机模拟技术成为地质研究的一个主流;第三阶段(1980s 后期至今)处于计算机模拟阶段,借助运算功能强大的计算机系统,模拟采用定量、预测或推导的方式建立地质系统的数字响应特征,代表著作是 Jervery(1988)的《Quantitative Geological Modeling of Siliciclastic Rock Sequences and Their Seismic Expression》、Tetzlaff(1989)的《Simulating Elastic Sedimentation》及 Cross(1990)的《Quantitative

tative Dynamic Stratigraphy》。该阶段出现了反演模型,并得到快速发展。此外,该阶段在新的数学算法研究、大规模数组的使用等方面有了极大的发展(Rankey and Watney,1997;阎伟鹏等,2004)。

1.1.1 层序模拟方法分类

地质模拟是通过逻辑或数学描述方法来预测地质系统和地质过程的综合研究。层序地层学模拟根据模拟尺度、模拟空间、模拟方向、模拟手段分为不同的种类,具体的分类如图 1-1 所示。

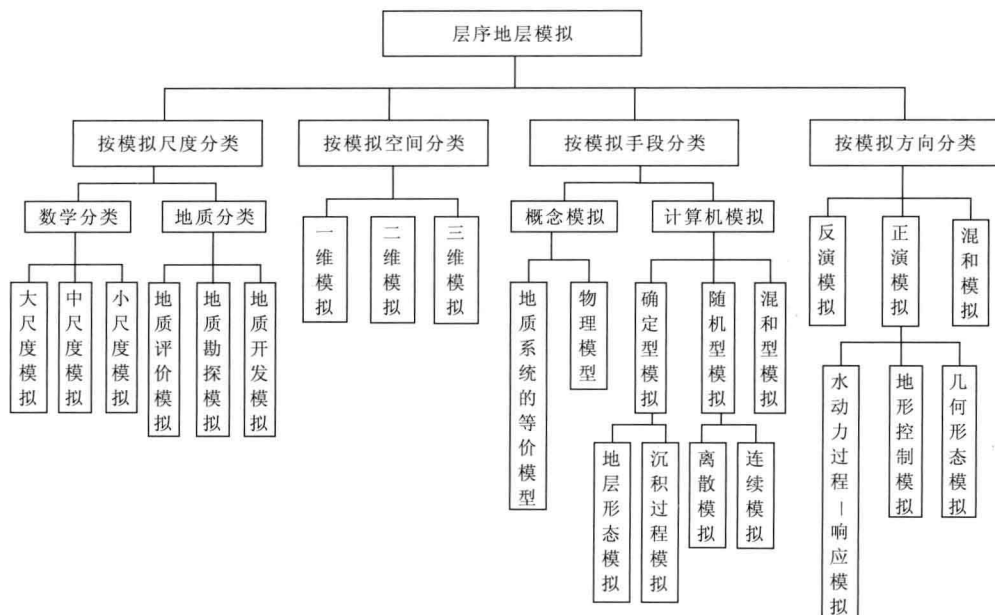


图 1-1 层序地层学模拟的分类图

概念模拟是一种用定性描述或概念示意的方法来进行地质解释,对地质过程及它们的相互影响多采用定性的推断(Eugene and Lynn,1997),具有非定量、静态、概念性等特征。相反,计算机模拟则是借助运算功能强大的计算机系统,采用定量、预测或推导的方式建立地质系统的数字响应特征,它可以细分为确定型模拟和随机型模拟。通过模拟地质过程的动态相互作用,确定型模拟构建一个已知的、定义的响应,输入相同的参数总会产生相同的结果(Jervey, 1988; Tetzlaff and Harbaugh, 1989; Lawrence *et al.*, 1990)。而随机型模拟则是通过模拟地质过程的动态相互作用,构建一个未知的响应,每次产生的地层响应并不会完全一致。

正演模拟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,通过调试不同过程参数的相互作用来产生地层响应模拟真实的地层属性。正演模型输出结果包括地层的几何形态、岩相、粒度分布、伪测井曲线和伪地震剖面、岩石属性及生物相等(Shuster and Aiger, 1994; Wendebourg, 1994)。目前,采用比较多的层序地层模拟方法是正演模拟。

反演模拟是用数字化程序从地质数据中提取影响沉积过程的相关参数,然后预测更为真实的地层剖面,这些相关参数包括堆积速率、水深和沉降速率、自源或外源压力机制的影响、气

候特征、构造特征、物源及搬运方式的识别、推断的海平面升降/气候变化的方式等(Van Hinte, 1987; Kominz *et al.*, 1991; De Boer and Smith, 1994)。反演模拟也使用反复的正演模拟的结果与观测的剖面进行对比, 从而评估其真实性和不确定性。由于地质现象是多因素、多种过程综合作用的产物, 因此, 国外学者对地层反演模拟的可行性提出质疑(Burton *et al.*, 1987)。

1.1.2 目前国外常用的层序模拟软件及算法

基于层序地层学模拟研究的目标, 结合计算机强大的计算功能, 国外层序模拟软件不断涌现和完善。目前比较流行的层序模拟软件有 SEDPAK (Strobel *et al.*, 1989)、SEDSIM (Tezloff and Harbaugh, 1989)、DIONISOS (Granjeon, 1997; Doligez *et al.*, 1999; Granjeon and Joseph, 1999)、FAZZIM (Nordlund, 1996)、PHIL (Bowman, 1992)、STRATAGEM (Shuster and Aiger, 1994)、SEDFLUX (Paola, 2000)、CARBONATE 3D (Wardich *et al.*, 2002)、SEQUENCE (Steckler *et al.*, 1999)、KANMOD (French and Watney, 1990)、STRATASIM、STRATA、STRATAFORM。其中 SEDPAK 是二维模拟软件的代表, SEDSIM、DIONISOS 是三维层序模拟软件的代表。

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 Strobel 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、碳酸盐岩混和沉积物充填沉积盆地的过程(Liu *et al.*, 1998)。

SEDSIM 是一个较为成熟的三维层序模拟软件, 最早在 1980 年由 Stanford 大学的 Tezloff and Harbaugh 所在的研究组开发(Tezloff and Harbaugh, 1989)。1994 年以后, 该模拟软件在澳大利亚得到了广泛的改进和应用。特别是 2000 年以后, Griffiths (Griffiths and Paraschivoiu, 1998; Liu *et al.*, 2001; Griffiths *et al.*, 2001; Griffiths and Dyt, 2001)领导的 SEDSIM 层序模拟研究组在澳洲联邦科学与工业组织(CSIRO—Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)得到了新一轮的研发, 开发了浊积岩、碳酸岩、风成沉积和有机质模拟模块。它包含一系列可以联合使用或独立运行的程序模块, 核心模块由构造沉降、海平面(基准面)变化、波浪搬运、压实、坡度变化以及碳酸盐岩等模块组成。这些模块可以从不同的研究尺度(几十米至几千米)模拟沉积物剥蚀、搬运、沉积过程。

DIONISOS 是一个三维数值地层正演模拟软件, 可以按照勘探或地质评价的尺度, 定量描述从陆上河流到深海沉积环境的碎屑岩或碳酸岩盆地三维层序地层格架。1992 年, 基于沉积物搬运的扩散方程, 法国石油研究院(IFP—The Institute Français du Pétrole)开发了该软件, 它的优点在于在层序地层分析的过程中, 可以采用实验的方法去考虑更多控制层序发育的因素, 这可以研究在地层概念模拟中体现不出来的或者是被设成假设的一些因素对层序的控制作用(Granjeon, 1997; Doligez *et al.*, 1999; Granjeon and Joseph, 1999)。

此外, 美国科罗拉多大学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(Paola, 2000), 该软件用于模拟大陆边缘沉积物的搬运和输送。CARBONATE 3D (Wardich *et al.*, 2002)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, 可以用于边缘斜坡、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等多

个不同的碳酸盐岩台地环境。

层序地层学模拟研究在中国起步较晚,而且主要是使用或者借鉴国外成熟的模拟模型,国内有些学者也开发一些层序模拟软件(林畅松和李思田,1995;李剑峰,1996;阮同军,1996;于炳松,1996;樊太亮等,1997;胡受权等,1998;林畅松等,1998;周江羽等,1998;胡受权等,1999;林畅松和张燕梅,1999;胡受权,2000,2001),但是没有得到广泛推广和使用。

纵观上述模拟软件,其主要算法有以下几种。

扩散算法(diffusion algorithm):Fick 第一定律用于描述稳态过程,而非稳态过程则用 Fick 第二定律来描述。Fick 第二定律(扩散方程)可以描述一些参数(如沉积物分布)和影响这些参数的空间梯度(如斜坡或流体速度)随时间变化(非稳态)的过程(Harbaugh and Bonham-Carter,1970)。对于计算机模拟,变化率是和时间、空间有关的变量,梯度仅是与空间有关的变量。在模拟沉积过程的研究中,Fick 第二定律已经广泛地得到应用(Kaufmann *et al.*, 1991;Rivenaes,1992)。

流体流动算法(fluid flow algorithm):基于网格-标记法(Marker-in-cell, MIC)技术,流体流动 Navier-Stokes 方程可以描述沉积物-水体的二维空间变化(Tezlaff and Harbaugh, 1989)。基于这种算法,通过定义地形网格、流体和沉积物参数,Tezlaff and Harbaugh 领导开发出三维模拟软件——SEDSIM,用于模拟碎屑沉积物的剥蚀、搬运及沉积过程(Tezlaff and Harbaugh,1989;Martinez and Harbaugh,1993;Wendebourg,1994)。STRATASIM 也是采用这种算法来控制 and 调整海平面升降、构造和气候参数。

几何控制沉积算法(geometry-controlled deposition algorithm):这类算法使用沉积物搬运过程的几何逼近算法来控制沉积物的沉积、搬运及剥蚀过程。这类算法的模拟通常使用经验或实测数据来逼近沉积过程(Strobel *et al.*,1989;Eugene and Lynn,1997)。

经验数值逼近算法(a priori numerical approximation algorithm):基于这种算法的模拟,通常用一个预设函数来描述沉积物响应与地质过程或条件(如水深)、梯度或几何形态的关系。这类算法的模型通常使用经验或实测数据来逼近沉积过程(French and Watney,1990;Strobel *et al.*,1989)。

沉积物搬运的构造校正算法(tectonic modifications of sediment transport algorithms):在模拟过程中,也需要考虑导致沉积物变形的构造算法。许多正演的地层/沉积模型采用构造变形算法。此外,也出现了一些新的构造模拟方法,如应用于造山带/前陆盆地的综合动力学平台模拟和用于裂谷被动大陆边缘的精细构造模拟(Strobel *et al.*,1989;Tezlaff and Harbaugh,1989;Bowman,1992;Shuster and Aiger,1994;Nordlund,1996;Granjeon,1997;Doligez *et al.*,1999;Granjeon and Joseph,1999;Steckler *et al.*,1999)。

此外,采用较多的算法还有随机数生成算法(stochastic numerical generating algorithms)、基因算法(genetic algorithms)以及混合算法[hybrid(multicomponent) algorithms](Strobel *et al.*,1989)。

1.1.3 层序地层学模拟现状及进展

随着石油、天然气勘探程度的不断提高,需要对沉积层序进行宏观控制和微观描述及精细评价,结合计算机技术的快速发展,层序地层学模拟经历了低级到高级(一维到三维)、正演到反演、简单到综合、海相盆地到陆相盆地等一系列的变化。尽管层序地层学模拟日趋成熟,但

是随着研究内容的要求不断深入,还是取得了不断发展、完善。

1.1.3.1 对层序地层学概念模型的适用性提出质疑

层序地层学概念模型(Vail *et al.*, 1977; Posamentier *et al.*, 1988; Van Wagoner *et al.*, 1990; Posamentier and Morris, 2000)得到了广泛的应用,这类模型是将可容纳空间作为主要因素来控制地层展布型式。建立于大陆边缘环境的层序地层概念(沉积)模型在油气勘探中得到了广泛的应用,这些模型均以全球海平面升降、构造沉降、沉积物供给速度为主要控制因素。在模拟的过程中,对问题的简化是必要的。这类模型是建立在层序仅受海平面变化、构造沉降、沉积物供应3个因素控制的假设之上的,这种假设使得它们不能全面地考虑控制地层型式的所有可能因素,也不能考虑层序形成过程的不确定性。随着层序地层学理论的推广应用,特别是扩展应用于陆相盆地,国内外的学者认识到这种概念模型不能有效地体现层序发育过程的复杂性、不确定性和层序控制因素的多变性(梅冥相和杨欣德, 2000; 顾家裕和张兴阳, 2006; Burgess *et al.*, 2006)。例如,对于一个从底部泥岩到顶部为砂岩的岩性剖面,利用层序地层学概念模型,会解释成由于海(湖)平面下降造成可容纳空间减小,从而形成准层序进积的叠加模式。但是,应该看到这种情况的多解性,其他的参数变化,也可形成这种反旋回特征的剖面,如沉积物注入参数的变化(沉积物总量变化、沉积物中粗粒含量的变化或二者的共同作用)、沉积物搬运参数的变化(搬运过程、搬运能量及搬运效率的变化)、盆地形态的变化、局部构造的影响,等等。

1.1.3.2 开展层序控制因素的多变量研究

层序充填过程和层序发育受一系列相互作用的地质因素或地质过程控制。一种是控制可容纳空间产生或消亡的因素,如构造沉降、海平面变化、沉积物压实、负载沉降等;另一种是控制沉积物供给(搬运、沉积)的因素,如河流、波(湖)浪、沉积斜坡、重力流等。这些因素相互作用的结果反映在沉积层序的几何形态、层序界面及沉积相的分布上。

既然层序地层概念模型不能反映地质过程和地质参数的复杂性和多成因特征,为了真实反映、刻画层序形成过程及控制因素,必须开展层序控制因素的多变量研究。地质模型和数学模型的不断完善,为这些研究创造了条件。国外学者对此已经展开了许多工作,对层序的控制因素认识越来越深刻,如Coe和Church(2003)指出仅仅改变沉积物供应量就能够产生准层序进积或退积的叠加方式,Leeder等(1998)和Carroll等(2006)深入地研究随时间变化的沉积物供应参数如何影响层序格架。同时,前人对控制层序发育的其他因素也作了进一步的探讨,如Posamentier和Allen(1993)、Liu等(1998)和Burgess等(2006)指出了盆地形态(古地形)也是影响层序格架的重要因素;Peter等(2006)指出陆棚宽度和沉积物搬运效率能够控制深海地层及砂体的时空展布;邓宏文等(2004)在研究冲积-河流相地层时,指出差异压实作用对层序构成的时空演化具有控制作用。

因此,结合计算机技术,层序地层学模拟已经进入层序控制因素的多变量研究的时代。

1.1.3.3 重视层序控制因素的不确定性研究

层序形成过程是复杂的,影响该过程的控制因素也存在着很大的不确定性。不确定性有两方面的含义,一方面是指控制因素的多变性,对于不同类型、不同地质背景的盆地,其沉积层

序的控制因素肯定不会完全一致;另一方面是指控制因素自身的多变性,层序控制因素本身是随时间、外界条件的改变而变化的,而在层序模拟中,为了简化模拟过程,往往采用某一常量来代替。比如在模拟中,某一时间内,沉积物供应速率会被赋予一个固定值来表示,而这段时间内,真实的沉积物供应速率应该是一个时刻波动的参数值。

国外学者已经认识到层序控制参数的这种不确定性,如有些学者指出全球海平面曲线是存在诸多缺点和不足(Miall,1997;Burton,1987),甚至指出它是不可计算的参数,但是在模拟和解释的过程中被认为是一个已知参数(Schroeder and Greenlee,1993;Pinous *et al.*,2001;Armentrout,2004;Atchley *et al.*,2004)。此外,国外学者针对这种不确定性开展了相应的研究,Cross 和 Lessenger(1999)利用反演模拟方法确定最佳匹配的参数值,以此来减小这些参数的不确定范围;Burgess 等(2006)针对层序模拟中存在多控制因素、选取适当的参数困难的情况,利用多个模拟场景技术,进行参数的不确定性研究。

1.1.3.4 加强对陆相盆地的层序模拟研究

国际上的研究及模拟软件都是针对海相盆地(特别是陆棚边缘),对于陆相盆地的具体情况则考虑得较少。陆相盆地的模拟更为复杂,因为不同类型的陆相盆地(如克拉通盆地、断陷盆地、前陆盆地),层序的控制因素也不完全相同(余素玉和邬金华,1993;李翔,1994;贾进华,1995;王华等,1998;阎小雄和周立发,2001;胡宗全和朱筱敏,2002;王家豪等,2005;严德天等,2006)。在借鉴发展成熟的模型,国内学者对中国陆相盆地的层序地层模拟已进行了一些探讨(林畅松和李思田,1995;李剑峰,1996;阮同军,1996;于炳松,1996;樊太亮等、吴智勇等,1997;胡受权等,1998;林畅松等,1998;周江羽等,1998;胡受权等,1999;林畅松和张燕梅,1999;胡受权,2000、2001;胡宗全等,2003)。澳大利亚 CSIRO 的学者 Keyu Liu(Liu *et al.*,2007)等人针对陆内克拉通盆地具有封闭、有限的可容纳空间,极平缓的斜坡带这种特征,开展了盆地充填对层序发育及砂体分布的影响研究。

1.1.4 层序地层控制因素“多变量”系统

随着石油、天然气勘探程度的不断提高,当前计算机技术的发展已使我们能很方便地模拟各种地质过程。但是地质过程的复杂性和多成因,使得某一地质现象控制因素的确定极为困难。不同类型的盆地,其控制因素不同,要真实刻画、反映地下层序和露头层序的发育过程,必须认识到层序控制因素的多样性和不确定性。

根据层序控制因素的这种特性,笔者提出了层序控制因素的“多变量系统”观点(朱红涛等,2007、2008)。在层序控制因素的“多变量系统”系统内,控制层序的地质变量可以分为综合变量和独立变量(图 1-2)。独立变量不受其他因素的控制,仅受自身的影响,如地壳年龄;综合变量是受其他变量综合影响的参数,如水体深度。在层序模拟中,水体深度是一个重要的参数,它是受构造沉降、海平面变化及沉积物 3 个参数综合作用的。而上述的这 3 个参数受更多的参数控制,如构造沉降受沉积物的加载/卸载、压实、热沉降等一系列的参数影响;其中热沉降又受地壳年龄、地壳厚度等一系列的参数控制。

从图 1-2 中也可以看出,如果假设综合变量为独立变量,就可以简化层序模拟,假设越多,模拟越简单,模拟速度越快,但模拟结果越粗略,不足以真实地反映实际地层情况,这也是最初提出的概念模拟受到越来越多质疑的原因。如果要使模拟结果无限地逼近实际地层情况

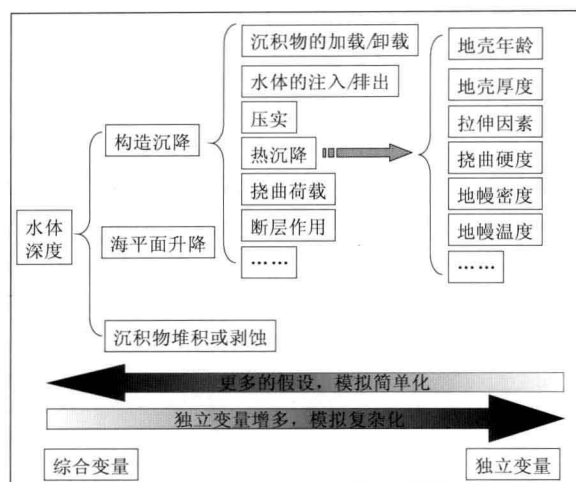


图 1-2 层序地层学模拟过程中的综合变量和独立变量示意图

(模拟的最终目标),就要尽量采用最多的独立变量(甚至有些独立变量是未知的),这样会使得模拟更为复杂,模拟速度降低。

1.1.4.1 层序地层控制因素多变量系统的特征描述

层序地层控制因素多变量系统具有层序控制因素的多样性、不确定性及层序发育过程的复杂性等特征。

(1)多样性。层序地层控制因素多变量系统“多样性”特征是指系统内具有控制层序发育的多种因素,包括目前已知或未知的影响因素。

从充填到完成的地史过程中受多种地质因素的控制,并导致不同几何形态和沉积物叠置样式的充填沉积物的发育(空间层序特征),其中构造沉降、沉积物供给、气候和海(湖)平面的相对变化(Vail *et al.*, 1977; Posamentier *et al.*, 1988; Van Wagoner *et al.*, 1990; Posamentier and Morris, 2000)是形成大陆边缘沉积充填地质体层序有规律空间分布的重要因素(其中沉积物供给包括沉积水动力条件、物源区的剥失量、沉积古地貌的变化、沉积物源区的岩性等),上述四大变量实际上互相联系、相互作用。

(2)不确定性。层序形成过程是复杂的,影响该过程的控制因素也存在着很大的不确定性。层序地层控制因素多变量系统“不确定性”特征是指处于不同类型、不同地质背景的盆地,其层序发育具有不同的控制因素,不可简单的类比、搬用。

不确定性有两方面的含义:一方面是指控制因素的多样性,对于不同类型、不同地质背景的盆地,其沉积层序的控制因素肯定不会完全一致,例如,与海相盆地不同,陆地盆地层序因不受全球海平面变化的直接控制,主要与沉积物供给速率、沉积物搬运的水动力条件、古气候、古地貌条件等有关,如国内学者研究表明,前陆盆地层序发育的主要控制因素为盆缘造山带区域构造运动、盆内沉积作用、相对海平面变化和物源(源区古地貌、气候、隆升程度、搬运通道与方式等)(贾进华, 1995; 刘貽军, 1998; 阎小雄和周立发, 2001);对于断陷盆地的层序,构造控制因素与气候因素占主导地位,其次是沉积物供应速率和湖平面的变化(胡受权等, 2001; 田景春,

2001;杨剑萍等,2003;郭彦如,2004;郑敬贵等,2006);克拉通盆地层序发育的主要控制因素是沉积物供应、气候、物源(何登发和吕修祥,1996;Morris and Donald,2000;周雁等,2004)。另一方面是指控制因素自身的多变性,层序控制因素本身是随时间、外界条件的改变而变化的,国外学者对此开展了相应的研究,Cross 和 Lessenger(1999)利用反演模拟方法确定最佳匹配的参数值,以此来减小这些参数的不确定范围;Peter 等(2006)针对层序模拟中存在多控制因素、选取适当的参数困难的情况,利用多个模拟场景技术,进行参数的不确定性研究;Carroll 等(2006)研究随时间变化的沉积物供应参数如何影响层序格架。

(3)复杂性。正是由于层序地层控制因素多变量系统中控制因素的“不确定性”、“多样性”特征,导致了层序发育过程的复杂性,例如,沉积物注入参数的变化(沉积物总量变化、沉积物中粗粒含量的变化或两者的共同作用)、沉积物搬运参数的变化(搬运过程、搬运能量及搬运效率的变化)、盆地形态的变化、局部构造的不同,等等,均可以影响层序发育。

而对于这种复杂性,实际研究工作中多为简化处理。例如,在油气勘探中得到了广泛应用的大陆边缘环境的层序地层概念(沉积)模型(Vail *et al.*, 1977; Posamentier *et al.*, 1988; Van Wagoner *et al.*, 1990; Posamentier and Morris, 2000),就是建立在层序仅受海平面变化、构造沉降、沉积物供应 3 个因素控制的假设之上的,这种假设(简化)使得它们不能全面地考虑控制地层型式的所有可能因素,也不能考虑层序形成过程的不确定性。

1.1.4.2 层序地层控制因素多变量系统的研究技术

所有的研究都必须有相应的技术和设备支撑,对层序控制因素开展的研究,主要是依靠计算机模拟技术、沉积充填物理模拟技术以及多场景技术。物理模拟是数值模拟的基础,可以验证数值模拟的正确性,数值模拟反过来可以有效地指导物理模拟,使物理模拟具有一定的前瞻性。可以说,物理模拟与数值模拟是相辅相成的,对实际问题的解决起到了相互促进的作用。

(1)计算机模拟技术。层序地层学计算机模拟是构成层序地层学理论的重要部分,是层序分析的一项常规研究手段和技术方法,是对盆地沉降、湖平面的变化、沉积物供给、沉积物压实、沉积和剥蚀过程及沉积体形态参数等的定量描述(顾家裕和张兴阳,2006)。结合计算机技术的快速发展,层序地层学模拟经历了低级到高级(一维到三维)、正演到反演、简单到综合、海相盆地到陆相盆地等一系列的变化(阎伟鹏等,2004)。

国外层序地层模拟软件的不断涌现,使得对层序的控制因素进行精细分析成为可能,国外学者开展了大量的研究工作(Posamentier and Allen, 1993; Liu *et al.*, 1998; Leeder *et al.*, 1998; Coe and Church, 2003; Burgess *et al.*, 2006)。国内的学者也在开展这方面的研究工作,林畅松等(1995、1998、1999)通过对构造沉降和湖平面变化两个主控因素的变化(假设其他因素不变)模拟具盆缘断裂控制的两种层序及沉积体的分布。于炳松(1996)对碳酸盐岩层序进行计算机模拟研究。阮同军(1996)基于研制开发的硅质碎屑岩沉积层序三维计算机模拟系统,对沉积物供应、海平面变化、构造沉降、重载沉降等因素相互作用下,层序的形成演变全过程进行了三维动态模拟。樊太亮等(1997)在考虑沉积作用、构造沉降、压实作用和侵蚀作用的基础上,自主开发的层序地层模拟系统——SSBM,并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。胡受权等(1998, 2000, 2001)对泌阳断陷湖盆陆相层序过程—响应机制进行了单因素(构造沉降、湖平面变化和物源供给)的计算机模拟。胡宗全、朱筱敏(2002)对具有地形坡折带的拗陷湖盆层序地层模拟进行了研究,通过建立基底沉降速率、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,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,并取得了很好的模拟效果。胡宗全、李明娟(2003)对控制层序发育的湖盆地形、基底沉降、湖平面升降和沉积物供给等主要因素,运用计算机技术对具坡折带的陆相盆地层序地层进行进一步的数值模拟研究,综合分析了这些因素在时间和空间上的变化规律。蔡希源、辛仁臣(2004)采用数值模拟方法,开展了湖平面相对升降对“盆地充填”过程影响的数值模拟,所得到的模拟结果与实际剖面吻合较好。

(2)沉积充填物理模拟技术。沉积充填过程的物理模拟是研究沉积过程的重要手段,也是预测油气储集砂体分布的有效方法之一。主要研究内容包括湖盆缓坡沉积体系的形成机理、沉积过程、砂体演变规律研究,湖盆陡坡沉积体系的形成机理、沉积过程、砂体演变规律研究,突发性密度流沉积作用及砂体分布规律研究,沉积模式研究,动力沉积学实验研究。物理模拟实验技术在国内已经得到广泛的研究,赖志云(1994)进行了舌状三角洲和鸟足状三角洲形成及演变的沉积模拟实验,刘忠保等(1995、2006)进行湖泊三角洲砂体和沉积物重力流砂体形成及演化的沉积模拟试验研究,张春生等(1995、2000)开展了舌状砂体和三角洲分流河道及河口坝形成过程的物理模拟实验,张关龙等(2006)开展了三角洲前缘滑塌浊积体形成过程模拟。

上述研究证实了物理模拟技术是一种研究沉积过程、层序发育过程有效的手段,通过改变、调整不同的实验参数变量,如盆地形态、水动力条件(流速、流向、流量)、沉积物供给等条件,可以详细刻画不同因素对陆内克拉通盆地层序发育、沉积过程、沉积体系形成机理、砂体分布及演变规律的影响。

(3)多场景技术(multiple scenarios)。对于层序地层控制因素的多变量特征,可以采用多场景技术来解决如何定义合适的变量值、分析这些变量产生的不确定的结果。多场景技术的主要方法是定义一系列参考变量组,然后在合适的范围内调整所有的参数,产生一系列的模拟场景,来评估每个变量的敏感性,了解这些变量值如何产生一系列的多种岩性和地层格架预测结果(Deutsch, 2002; Wendebourg, 2002)。该技术广泛应用在静态、动态油藏建模(Deutsch, 2002)和烃类充注建模中(Wendebourg, 2002), Peter 等(2006)借助 DIONISOS 三维正演模拟软件,利用多场景技术,产生不同的模拟结果,通过和实际资料对比,来研究层序不同控制变量的不确定影响,并确定这些变量合适的参考值。

1.1.4.3 层序地层控制因素多变量系统的意义

提出的“层序控制因素的多变量系统”观点,具有重要的研究意义。首先,它能够全面反映层序充填这一复杂地质过程,充分体现层序发育过程的复杂性、不确定性和层序控制因素的多变性,能够更准确、更实际地表达层序发育过程;其次,它体现的是一种发散式的逻辑思维方式,跳出了固有的模式,而不是简单的思维定势,针对不同地质背景的研究目标,不会在考虑层序控制因素的时候,仅仅归因于海(湖)平面的相对变化、构造沉降、沉积物供给和气候四大因素;此外,这一系统表明层序地层学研究要被赋予综合、动态、量化、模型化和系统化的特征,才能更有效地研究层序发育、沉积过程、沉积体系形成机理、砂体分布及演变规律,对阐明盆地地层格架、沉积相配置样式、有效预测砂体和隐蔽油藏的分布具有重要实际意义,为今后的油气勘探提供新思路。总之,这一观点的提出,为陆相层序地层学的研究拓展了研究思路,可以进一步丰富层序地层学理论体系,具有科学意义。

1.2 沉积物理模拟技术进展

沉积模拟是沉积学理论研究的一种重要的实验手段和技术方法,可以分为数值模拟和物理模拟。物理模拟是对沉积物物理过程的室内模拟,通过模拟当时的沉积条件,在实验室还原自然界沉积物的沉积过程。最初的物理模拟实验较多地应用于水文和河流地貌的研究,近20年开始重点对湖盆沉积砂体形成过程及演变规律进行模拟研究。本书对沉积论物理模拟技术的进展及发展趋势进行综述。

在前人的研究成果中,一般将沉积物理模拟技术分为3个阶段,但是,随着计算机技术的迅速发展,计算机数值模拟作为沉积物理模拟的配套技术,对沉积物理模拟的影响越来越重要,因此,我们认为应该将沉积物理模拟技术分为4个发展阶段:①19世纪末至20世纪60年代,以现象观察描述为主的初级阶段,该阶段代表性成果有西蒙斯和查理德森(Simons and Richardson, 1961, 1965)的关于水槽实验的系统研究报告;②20世纪60~80年代,以底形研究为主的迅速发展阶段,此阶段中,Southard(1971)有关速度-粒径-水深的图形、Allen(1963)通过流体力学和松散边界水力学研究所体现出来的物理学方法和Best(1988)河道交汇处的流体动力学及其对沉积物搬运和床底形态控制的研究给沉积模拟打下了稳定的基础;③20世纪80~90年代,以砂体形成过程研究为主的湖盆砂体模拟阶段,该阶段建立了若干适合砂体模拟的大型实验室;④21世纪至今,半定量-定量化的模拟阶段,借助计算机技术的快速发展和广泛应用,该阶段特征主要体现在沉积物理模拟和数值模拟的紧密结合,沉积物理模拟与高精度的摄影、测量技术的紧密结合,使得沉积过程的详细记录和沉积体时-空分布特征的精细描述及刻画得以实现(Van, 2006; Juan, 2009; Octavio, 2009)。

1.2.1 沉积物理模拟实验方法

沉积物理模拟是在室内对物理过程进行模拟,其关键是原型与模型的相似性。该方法基本步骤如图1-3所示,在分析地质原型的基础上,设计实验参数,在几何、运动、动力等相似理论的约束下,建立地质模型、物理模型,进而建立原型和模型之间的对比标准,然后进行实验设计,进行模拟实验,在实验过程应进行监控,实验完成后,对沉积砂体的纵、横剖面进行研究,开展实验结果与原型相对比的相似性研究,从而检验实验的准确性。而在具体的实验过程中,应根据模拟区的情况,如模拟区的规模、层位等,进行实验设计,包括对模型比尺、实验装置的有效范围、原始底形、加砂组成、加砂量、水流量、湖水位、河道类型、河岸组成等参数的确定及对含砂量、活动底板、实验过程的控制。

沉积物理模拟实验得到的各种资料和数据,为后续开展的数值模拟设置参数提供的必要参考信息。

1.2.2 国内外沉积物理模拟实验室简介

根据实际需要,20世纪80年代后,不同国家的研究者重建或新建了不同类型的适合于砂体模拟的实验室。本书主要介绍国内外几个典型的实验室。