

定量动力地层学的兴起与展望

吴智勇 郭建华 邹华耀

(江汉石油学院,湖北荆沙)

[内容提要] 地层学是研究层状岩石的学科,如果综合了许多传统上由地球科学的单个子学科研究的内容,那么我们就可以称其为定量动力地层学。定量动力地层学是应用数学的定量的方法研究沉积盆地的地质动力学、地层学、沉积学和水力学属性,最终获得盆地内的沉积相展布和地层分布模式的一门综合性学科。它是顺应地层学由定性至定量、由局部至全球、由静态至动态的发展趋势而发展起来的。本文对定量动力地层学的提出、理论基础、研究方法及其对现代地质教育的影响作了简要评述,并用实例阐述了定量动力地层学的应用。

关键词: 定量动力地层学 盆地分析 数学模型

1 定量动力地层学的提出

1.1 定量动力地层学的定义

近10年来,人们开发出了用于模拟沉积盆地的地质动力学、热成熟和流体流动的各种定量模型,并将它们广泛应用于科学研究与生产实践中。盆地充填模型、大气环流与全球气候模型、构造模型以及地下流体流动模型等相继开发应用。这表明地球科学家们对于更精确地和定量地表述复杂自然体系的过程与响应间关系的兴趣在增强;同时这也是对地层或沉积盆地模型中所包含的变量、过程和响应类型逐渐展开和深入研究的结果。

地层学是研究层状岩石的学科,如果综合考虑许多传统上由地球科学中单个子学科研究的内容,那么我们就处在地层分析演化过程的中间,这种地层分析方法即称为定量动力地层学(quantitative dynamic stratigraphy,略称QDS)^[1,2]。定量动力地层学应用数学的定量分析方法研究沉积盆地的地质动力学、地层学、沉积学和水力学属性,最终重建沉积盆地乃至全球范围的沉积相展布和地层分布模式。从定义上说,定量动力地层学并不是一门单独的学科,它只是为模拟各种地质过程的模型、概念和地质解释等提供了一个框架,使它们能够在更高层次上有机地联系在一起,从而对研究对象进行更全面的模拟和预测。因此,定量动力地层学实质上是由一系列建立在盆地动力学、地层学、沉积学和流体力学基础上的概念模型、过程-响应模型和其他一些地质模型组成的综合体。

1988年2月,75名不同学科和研究领域的地球科学家在科罗拉多州的丹佛参加了由AAPG、科罗拉多矿业学校、天然气研究所、自然科学基金委员会、美国能源部、美国地质调查所共同举办的定量动力地层学短训班。与会者分成7个专题小组探讨了构筑定量动力地层学模型的哲学思想和策略、不同模型中变量的选取和提炼、用地层信息确立和验证定量动

力地层学模型现状及今后的方向与要求、定量动力地层学模型的应用及其对教育、科学、工程等方面的影响等。会后,厚达 600 余页的会议文集(Cross, 1989)正式出版,标志着定量动力地层学的问世。

1.2 定量动力地层学是地层学发展的必然产物

定量动力地层学是顺应地层学发展总体趋势而产生的。

1. 定量动力地层学是在全球地质学的发展过程中所产生的,它的理论基础和研究方法,都具有鲜明的全球性。六十年代,板块构造学说以其鲜明的“全球观”“运动论”在地学界掀起了一场地学革命;随后,古地磁学及相伴而生的磁性地层学为全球地层对比提供了一个客观的对比标准;历时半个世纪的大洋钻探计划(DSDP 和 ODP)为全球地质学提供了丰富的生物地层学、海洋沉积学、全球气候变化以及海洋环流等方面的资料,成为全球地质学的摇篮,孕育了全球地质学。

2. 定量动力地层学已基本上脱离了传统地层学以直接观测为主的研究方法,逐渐进入到以数理模拟为主的研究方法,从而可动态地定量地推测出盆地中地层分布模式随时间的演化过程。因此,我们可以说,定量动力地层学的提出体现了当代地层学的发展趋势。

2 定量动力地层学的研究内容

定量动力地层学是以盆地动力学为主线,通过一系列地质动力学、热成熟和流体流动定量模型,对不同气候条件和构造条件下的沉积物风化剥蚀、搬运沉积和成岩变化等过程进行定量模拟,并估算出沉积盆地中的沉积物总量。在此基础上,采用概念约束和体积约束条件确定出盆地内的地层分布模式。

定量动力地层学的核心是沉积盆地充填模型。该模型涉及到沉积物形成至沉积的整个过程以及盆地沉降、全球气候变化和海平面升降等控制因素。这些主要参数之间相互依赖、相互影响,每一参数又由若干个变量构成,它们的共同作用,控制着地层的形成与分布(图 1)。严格地说,所有与地层形成过程和分布模式有关的地质过程均是定量动力地层学的研究内容。

3 定量动力地层学模型

近 20 年来,地质学家们已开发出了许多盆地模型,这些模型大多数起源于地球科学的某个子学科,并且用于模拟某一特定规模和特定初始、边界条件的过程-响应关系,只是近来才试图将那些跨越学科边界的模型综合起来,用以模拟地质过程的某一部分响应。这些模型均建立在理论或经验公式(或称“概念”)的综合基础上,而且经常综合了物理、化学和物质守恒原理。沉积盆地分析经常涉及的模型有地质动力学模型(包括热模型和成熟模型)或称盆地级模型、沉积模型或称小型模型、地层模型或称中型模型,此外,还有流体流动模型、大气和海洋环流模型和流体/岩石相互作用模型等。

1. 沉积模型 沉积模型的目的是动态地模拟沉积物生成、搬运和沉积过程。这些模型采用物理定理或经验归纳式,并假定其沉积界面在均一或非均一的流动条件下动态地变化着。目前的沉积模型均为正演模型,其时空范围均较小,且大多不与动力学模型相结合。由于这类模型大多建立在基本原理之上,因此,相比较而言,它们能较精确地反映现实世界。

2. 地质动力学模型 地质动力学模型讨论地壳和岩石圈的大型热力和机械变形,正演

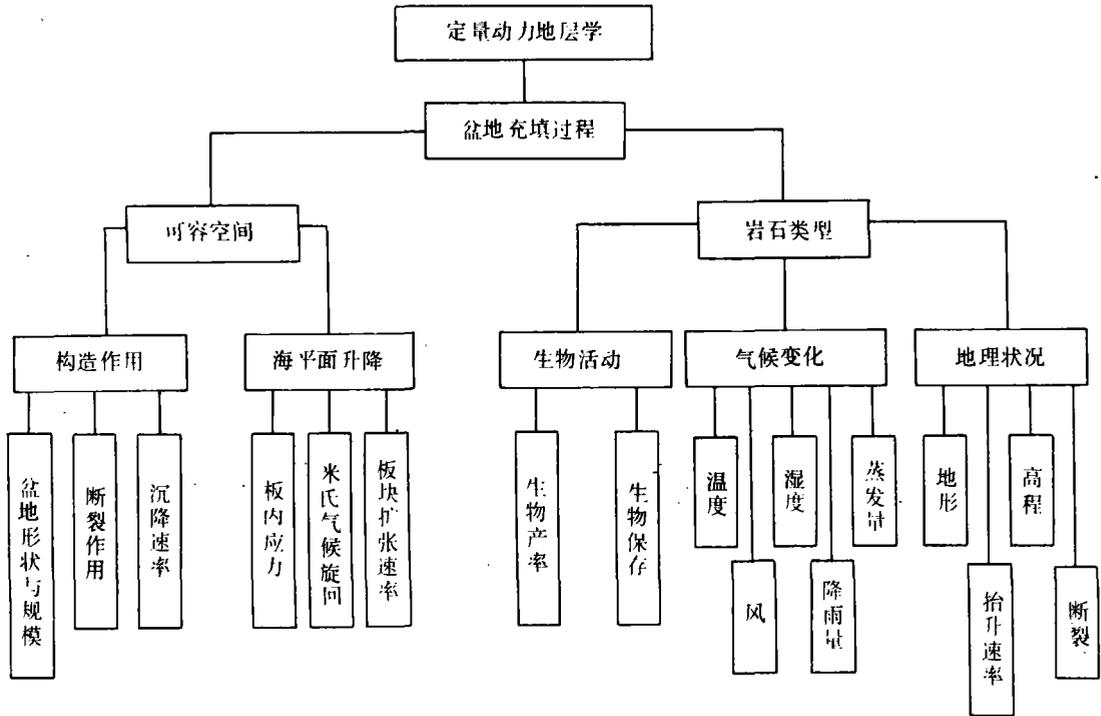


图1 定量动力地层学研究内容

(参照 Perlmutter 和 Matthews, 1989^[3]; Li, Y. Y., 1993^[4], 有增删)

和反演两种形式都在使用。这类模型将地壳和岩石圈中物质的性质和分布转换为数据和正演模型中的最佳数值解,进而用力学模型模拟特定应力场和温度场下地壳与岩石圈的变形。大多数地质动力学模型的时间范围为数百万年,空间范围为数十至数百公里。

3. 地层模型 地层模型采用其余两类模型中的理论和经验公式,并结合用于解释和预测盆地内岩性分布和体积的经验归纳式,它们的时、空范围介于前二者之间,一般为数百万年和数公里至数十公里。

4 建模策略及步骤

目前所观察到的沉积盆地只是其演化过程中某一阶段的瞬时状态,而实际上,地层的性质及分布是一种与沉积盆地连续演化有关的依赖于时间的动力学过程。因此,定量动力地层学模型应当将盆地的演化与沉积物的形成、搬运和沉积压实等动力学过程当作一个完整的系统来研究和处理。要做到这一点,就必须在地质研究的基础上综合考虑地质、地球物理、地球化学、热力学、渗流力学等多种因素及其错综复杂的关系和演变过程,从中提炼出能正确反映盆地演化过程的各个参数以及这些参数间的定性、定量关系(即建立起概念模型);在此基础上,建立起数学模型,并进行模拟预测。

定量动力地层学模型的建立大致应包括以下几个步骤:

1. 简化地质过程 自然界中的地质现象是极为复杂的,各种地质现象错综复杂,各种地质过程相互依赖、相互影响,现有的各种模型都不可能完整地代表任何一种地质作用过程。

因此,在定量动力地层学模型的建模之前,必须对实际过程进行简化。在这一过程中,必须考虑3个重要因素:(1)这种简化和近似对实际过程是否合适;(2)模型所采用的维数是否能较准确地反映现实世界;(3)模型变量的取值范围的确定是否合适。

2. 确定研究目的、范围和边界条件 在设计模型时,首先要明确所要解决的问题,模型的假设、简比条件以及局限性应当在模型建立之前阐述清楚。各种假定、定理、近似运算、约束条件、方程和逻辑运算式相互之间应当一致,而且与模型中所用到的边界条件和初始值也要相符。此外,数值模型中的时间步长和网络间距的选择要稳定、准确,并与整个模型相吻合。

定量动力地层学模型的时、空范围应大于研究对象的时空范围;此外,如果模型是离散型的,区域和空间则可用网格代表,此时网格节点的间隔应小于研究对象的尺度。这样可以使模型更稳定,结果更准确;同样,时间步长的确定也应短于研究对象的变化。

3. 准确反映复杂体系中的地质过程 地层记录是沉积物形成、搬运、沉积以及沉积之后作用于沉积地上的各种地质过程的综合产物,由于地质过程的复杂性和时间性,我们无法完全认识地史时期的地质过程。就任何一个地质过程而言,我们不知道哪些过程是重要的,也不知道其相对重要程度和相互依赖程度等。此外,我们对过程-响应之间的反馈机理远不了解,这使得建模工作更为困难。

由于定量动力地层学模型的运行通常与时间有关,因此它们受到过程速度的影响和控制。例如,浊流的流动速率受浊流与周围水体间的密度差、浊流规模、坡度和所搬运物质的比重、粒度、形态的影响;反过来,流动速率又影响着浊流的侵蚀能力,从而导致浊流成分的连续变化。此外,诸如碳酸盐生产率、构造沉降速率等因素对于了解复杂自然体系都是十分重要的,也是定量动力地层学模型赖以存在的基础。

4. 维数的确定 从动态观点上说,地层记录是包括了时间在内的四维地质体。定量动力地层学模型的维数越高,它就越能真实地反映自然状况。然而,由于目前计算机的计算能力和图形显示能力的限制,三维定量动力地层学模型的采样间隔不可能太密,这使其预测精度受到限制。因此,目前定量动力地层学模型仍以一维和二维模型为主。

5. 建立模型 根据前述步骤所确定的模拟对象的地质过程及其相互间的关系、模型的边界条件和初始条件、模型的维数和使用的近似表达式,全面系统地建立起地质模型和数学模型。

6. 定量动力地层学模型的验证 由于定量动力地层学模型所涉及的研究对象极为复杂,其中的各个变量相互影响、相互依赖,因此有必要对模型的提出、应用至预测等各个阶段进行测试校正。定量动力地层学模型的验证包括5个方面:(1)作为建立数学模型的基础的概念模型定义是否明确;(2)数学模型的定义是否清晰,模型中的数学公式和逻辑运算式是否一致;(3)在运行数学模型时,必须进行灵敏性试验,即依次改变模型变量的输入参数考察模型的响应;(4)模型是否适合具体的地质情况;(5)模型得出的预测结果在地质上是否合理,是否与观察资料相符(Cross 和 Harbaugh, 1989)^[2]。

5 定量动力地层学模型的应用

5.1 半地堑中碎屑岩沉积体系

Perlmutter 和 Matthews(1989)以不受季风影响的3°旋回地层带中的半地堑盆地为例

展示了米兰柯维奇旋回期间预测的沉积变化和地层变化,这是因为这一区域具有最广泛的气候变化和动态的地层变化,而且半地堑盆地在相对较窄的地段内包含了较宽的沉积环境,有利于计算机模拟。

在一系列模型假设的基础上,Perlmutter 和 Matthews(1989)将气候旋回划分为6期,并对各期中沉积区域的变化进行了预测,并将不同气候条件下预测得出的岩石类型综合成一个地层剖面;再根据地层剖面生成合成速度曲线图,并进而合成出时间地震剖面。通过这些模型预测成果图,可以识别出半地堑盆地的几个沉积中心和有利的生储盖组合(Perlmutter 和 Matthews,1989)。

5.2 碳酸盐台地中碳酸盐岩生长方式

Li, Y. Y. 等(1993)描述了一个模拟受构造及气候过程控制的碳酸盐岩生长方式的全球定量旋回地层学模型,该模型采用7个因子模拟了物理、化学环境对碳酸盐岩堆积速率的影响。这7个因子是:海平面变化、基底沉降速率、食物供给(营养物的影响)、有效的光线、温度、盐度和溶解氧。它们被看成是气候及构造过程的函数。该模型还综合了米兰柯维奇短期气候变化及盆地长期构造演化以检验潜在的碳酸盐沉积方式。在此基础上,他们用计算机进行了二维模拟,结果表明:①不同气候和不同构造过程中的碳酸盐沉积方式能够定量模拟;②在热带地区,碳酸盐产量朝赤道(纬度减小)方向随温度及营养供给的增大而增大,而在不同的气候期,碳酸盐产量因热带范围的扩大或缩小而变化;③与混浊度相结合,该模型可描述在不同气候模式下不同的碳酸盐沉积方式;④在盐度异常高或异常低地,碳酸盐沉积速率都会急剧下降,而离开海岸线盐度趋于正常;⑤周期性的海平面变化造成碳酸盐沉积的周期性变化。在对得克萨斯州上宾夕法尼亚统的实际研究中,对最敏感的几个参数(如混浊度、混浊度的横向比例、相0值及碳酸盐总体沉积速率)取适当的值,成功地再现了所观察到的碳酸盐滩,从而验证了上述结果。因此, Li, Y. Y. 等(1993)认为,野外、井下及地震资料中观察到的碳酸盐生长方式可用旋回地层定量程序进行精确模拟(Li, Y. Y. 等,1993)。

5.3 混合模型

Lawrence 等(1990)^[5]以半经验算法为基础开发出了一个二维地层模型,并成功地应用于美国墨西哥湾岸区 Main Pass 盆地的碎屑岩、马来西亚沙捞越海岸的碳酸盐建造以及美国巴尔的摩峡谷的碎屑岩/碳酸盐岩混合沉积的地层模拟中。这一模型可以用于预测储层分布、调整勘探井位置、进行地震资料解释等,它不仅可以对整个盆地,而且可以对盆地的某一局部地层进行模拟。从三个地区的地震剖面 and 模型预测结果的对比可见模型的应用是极为成功的。

6 定量动力地层学展望

6.1 定量动力地层学的优点

(1)定量动力地层学使我们能更完整、更有效地综合各个分散学科的有关知识。

(2)它要求更精确地定义那些被模拟的地质系统所涉及和运行的各个变量。

(3)它评估或度量了模型描述和预测的置信度。

(4)它可能通过揭示过程变量和响应之间的相互依赖性和反馈机理来产生新的认识,这种关系在其他模型中是模糊的或者未被注意。

(5)由于模型实验可能否定一些以前接受的概念和解释,它也许能促进新观点和新解释

的产生。

(6)通过实时图形显示模拟,它能使用户观察到和更完整地理解过程及其相互作用产物间的相互关系。

(7)它减少了科学家们手工操作的时间和精力,从而可以提出和测试更多的假设,更深入地认识复杂的自然体系。

6.2 定量动力地层学模型的潜在应用

今后的发展将要求在盆地级定量动力地层学模型中,不断加强动力学、热史、大地构造、盆地构造、沉积学、地层学、流体流动和流体/岩石相互作用等内容的份量。这种综合了上述众多学科的研究内容和定量动力地层学模型使用户能方便地调节盆地的形成过程盆地充填参数,如原始地形与水深、沉积物通量、海平面波动以及构造影响等,并且还能对油气生成、运移和聚集过程进行模拟。这种定量动力地层学模型在石油和矿产勘探领域有着广阔的应用前景。

用实际资料校正过的详细而规模较大的定量动力地层学模型能在三维空间上描述流体流动单元的体积、尺寸、几何排列方式以及这些单元的垂向或侧向渗透率,同时还可对含水层、弱含水层和隔水层的位置及范围进行二维或三维模拟,因而在油气田开发、储层管理、地下水地质学、废水排放与管理等领域也是十分有用的。

6.3 对教育的影响

1. 建立定量数学模型要求有较高的数学水平 长期以来,地质学作为一门描述性学科,其定量化程度相当低,反映在教育体制上,表现为课程设置和学生质量上对数理基础不够重视,这样培养出来的毕业生就很少积极主动地用定量方法来解决实际问题。定量动力地层学增强了地质学的定量化程度,它要求地质人员有较强的数学基础来建立和使用数学模型。

2. 定量动力地层学模型的开发和使用要求有较全面的地质知识 定量动力地层学综合了地球科学中几乎所有的子学科,它要求地质人员经过更严格和更广泛的训练,对地球科学的各个分支都有较全面的了解,对地质作用与沉积响应之间的复杂关系有较深刻的认识。

定量动力地层学的发展对当前的教育体系提出了挑战。要构筑好的地质模型,就必须要有较好的模型开发人员。解决这一问题的根本方法就是改革当前的地质学教育方法,增强数理基础教育,加强学科间的交叉联合,提高学生的综合能力。

主要参考文献

- 1 Cross, T. A. Quantitative Dynamic Stratigraphy. Prentice Hall, 1989
- 2 Cross, T. A. and Harbaugh, J. W. Quantitative dynamic stratigraphy, a workshop, a philosophy, a methodology. In: Cross, T. A. (ed.). Quantitative Dynamic Stratigraphy Prentice Hall, 1989. 3—20
- 3 Perlmutter, M. A. and Matthews, M. D. Global cyclostratigraphy—a model. In: Cross T. A. (ed.). Quantitative Dynamic Stratigraphy Prentice Hall, 1989, 3—20
- 4 Li, Y. Y., Lerche, I. and Perlmutter, M. A. Global cyclostratigraphy, a model of carbonate growth pattern. Marine and Petroleum Geology, 1993, 10, 620—631
- 5 Lawrence, D. T., Doyle, M. and Aigner, T. Stratigraphic simulation of sedimentary basin, concepts and calibration. AAPG, 1990, 74(3): 273—295