

全球旋回地层学述评

吴智勇 姜衍文

(江汉石油学院, 湖北荆沙 434102)

全球性旋回沉积是全球海平面变化、全球气候条件、全球构造演化、全球古地理背景及沉积特征综合作用的产物。全球旋回地层学是综合应用概念性的、定性的和定量的方法研究地层记录中由气候和构造过程引起的旋回沉积模式的一门学科,它是脱胎于层序地层学的一门新的地层学分支。全球旋回地层学通过估算沉积盆地中沉积物类型和沉积环境变化来预测地层学特征,实际上是一种过程-响应模型。文内较为系统地介绍了全球旋回地层学的基本原理和应用方法,并借用两个实例阐述了全球旋回地层学在预测盆地中的地层厚度、岩相分布和碳酸盐岩生长方式等方面的应用。

关键词 全球旋回地层学 层序地层学 地质旋回 地层模拟 旋回地层带

第一作者简介 吴智勇 男 30岁 讲师(硕士) 地层学与事件地质学

1 全球旋回地层学母体——层序地层学

本世纪初, Suess^[1]首先提出在全球范围内不同大陆中的海相地层,其沉积和非沉积作用具有明显的同时性,并认为这与全球海平面的变化有关。Sloss等^[2]在对各个大陆的露头资料、地下年代地层学和生物地层学资料进行详细研究的基础上,首次将显生宙沉积记录划分为6个全球性旋回沉积,每一旋回层序的顶、底均为全球性角度不整合和平行不整合所限定。Vail等^[3]在Sloss研究成果的基础上,在显生宙沉积中识别出14个全球性旋回,并将其解释为全球海平面变化和全球构造事件的产物。此后,Vail和他的Exxon研究所的同事们在一系列论文中,对层序的概念作了精辟分析。Haq等^[4]的划时代巨作“三叠纪以来的海平面变化年代学”的发表,以及Wilgus等主编的“海平面变化——一种解释方法”出版^[5],宣告层序地层学正式问世。

层序地层学是根据地震、钻井和露头资料,以及有关的沉积环境和岩相对地层进行综合解释,并进而建立起以地层不连续面为界的成因上有联系的旋回性地层的年代地层框架^[6]。层序地层学的基本观点是,地层单元的几何形态和岩性受4大参数的控制(表1)。其中,沉积速率和盆地的沉积物供给速率控制着沉积盆地的几何形态;沉降速率和海平面升降速率综合起来控制着沉积物的可容空间。

层序地层学改变了分析全球地层记录的基本原则,它的提出,消除了地层学中长期存在

表1 层序沉积的控制作用^[6]

层序地层学参数	参数控制作用
构造沉降	沉积物沉积空间
海平面升降	地层和岩相型式
沉积物供给	沉积物充填和古水深
气候	沉积物类型

的年代地层与岩石地层单位及生物地层学单位的三重命名的混乱现象,建立起了全球统一的成因地层划分方案(成因地层年表)。此外,由于地层在几个层次上的有序排列是以地震层序概念推导的,所以可以提出一个理论格架,从而建立一些能够更精确地模拟地层体系结构、沉积相分布和盆地演化的判别性地质模型,提高地层学的预测性和定量性。可以这样认为,层

序地层学的提出是地层学分析中的一场革命,其意义之深毫不亚于板块构造学说引起的革命。

2 全球旋回地层学

全球旋回地层学是脱胎于层序地层学的一门新兴的地层学分支学科。综合采用概念性的、定性的和定量的方法,研究地层记录中由气候和构造过程引起的旋回沉积模式,并通过估算沉积盆地中来自物源区的沉积物的类型和沉积环境变化来预测地层学特征,实际上是一种过程-响应模型^[7]。

2.1 全球旋回地层学的研究对象——地质旋回

全球性旋回沉积是全球海平面变化、全球气候条件、全球构造动力、全球古地理背景及沉积特征综合作用的产物^[7]。目前,已从地层记录中识别出了从数百年至数万年内形成的各种旋回^[7]。Vail等^[3,8]和Haq等^[4]在各地大量地震地层资料的基础上,综合各方面资料和前人研究成果,将全球海平面相对变化细分为1~6级旋回,其中一级旋回两个,二级旋回14个,三级旋回80余个。其中最引人注目、研究最广泛的是周期为几万年至几千万年的全球海平面升降旋回所产生的周期性沉积记录。一般认为,这种全球性的海平面升降旋回是由全球构造演化和全球气候变化诱发的。

2.1.1 全球构造演化产生的沉积旋回

长期的构造演化有可能产生新的沉积环境,沉积速率与基底沉降速率之间的平衡决定着盆地内部或外部泄水区的发育与否。构造作用导致物源区抬升剥蚀速率的变化,将产生构造诱发的沉积旋回,这类旋回很可能是长期的和不对称的。Vail等所划分的一、二级旋回即属于这类旋回^[3]。

另外,板内应力可以解释海平面变化中的三级周期的起因。Cloetingh^[9]通过热机制模拟证明,构造运动诱发的岩石圈垂直运动,可能为被动大陆边缘的地震记录导致的视海平面三级周期提供某种解释;板内应力的变化与沉积负载引起的岩石圈挠曲间相互作用,可能在被动大陆边缘翼部产生高达100 m的视海平面变化。Cloetingh通过模拟指出,在被动大陆边缘处 1×10^3 Pa的应力变化,即可产生50 m或以上幅度的视海平面波动;这些应力变化,可能与板块的拉裂和破碎、收敛板块边界处的动力变化、板块碰撞作用引起的岩石圈应力场的重大改组有关;岩石圈中变化着的水平应力场,可以解释相邻沉积环境中视海平面的周期性变化。

2.1.2 全球气候变化产生的沉积旋回

目前,解释全球气候变化最成功的理论是米兰柯维奇旋回假说。这一假说最终得到了远

洋浮游有孔虫壳体 and 深海岩芯的氧同位素, 以及各新生代远洋沉积层序中的旋回式沉积的研究结果的证实, 已为大多数地质工作者所接受^[10]。

米兰柯维奇旋回可以用一组嵌套的余弦函数来表述。在米兰柯维奇旋回期间, 某一特定地区经历的气候波动与余弦曲线的特定相态有关^[7,11]。对余弦函数求导表明气候变化率在两个气候端元(即气候最大期和气候最小期)最小, 而在过渡段变化最迅速。因此, 端元气候条件下的风化和搬运条件接近或处于平衡状态^[7]。

要了解气候变化如何产生沉积旋回, 就必须了解米兰柯维奇旋回期间区域气候的动态变化。地球大气环流通常被简化为3个环: 哈德利环、费里环和极地环, 它们构成了哈德利环流。大气温度通常由赤道向两极降低, 并大致与这3个环相对应: 哈德利环——热带, 费里环——温带, 极地环——极地气候; 大气湿度则与单个环的位置有关, 在环的上升侧通过较潮湿, 而在下降侧则较为干燥^[7,11]。米兰柯维奇旋回通过改变哈德利环流模式而引起全球气候变化, 进而控制着盆地中沉积物输入量和分布, 最终产生旋回性的沉积记录。

2.2 全球旋回地层学的基础与核心

如前所述, 全球旋回地层学实际上是一个过程-响应模型。该模型所依据的理论基础是沉积学中有关沉积物风化、剥蚀、搬运、沉积等过程的基本原理。全球旋回地层学模型为这些原理设置了一个统一的框架, 并将这些原理依据其时、空上的相对重要性安置在该框架中。在此基础上, 对盆地范围内的沉积形式和相演化进行估算或预测, 从而将沉积学与地层学联系起来, 进而模拟地层记录和沉积旋回。

全球旋回地层学的核心是全球沉积动力学。动力学及其系统讨论的是一个轨道世界, 在这一世界中, 只要给出初始条件和相关条件, 就可确定物体运动的和变形的过去、现在和将来。全球旋回地层学模型应用沉积物形成、搬运与沉积过程的基本原理, 综合全球构造面貌、全球气候条件、全球地理变化、全球海平面升降等, 对沉积物的类型及在沉积盆地中的分布等进行正演预测。

2.3 全球旋回地层学模型假设

由于现实世界中, 地质过程与沉积响应之间的关系是极为复杂的, 为了简化运算以便于计算机模拟, 有必要进行一些基本假设。Perlmutter 和 Matthews^[7]对半地堑盆地碎屑岩沉积体系的全球旋回地层学模型提出了如下假设:

- (1) 假定控制沉积体系的主要因素是特定时间段的全球基本气候模式、气候随时间的变化、物源区的岩性、区域地形、水深以及抬升和沉降速率;
- (2) 米兰柯维奇旋回导致了气候变化;
- (3) 至少自寒武纪以来, 太阳辐射量的变化范围基本稳定, 且轨道旋回的幅度和频率也基本相同, 地球自转以同一速率降低;
- (4) 米兰柯维奇波动可用一组嵌套的余弦函数来模拟;
- (5) 自寒武纪以来, 大气、海洋和陆地的动态相互关系没有明显变化;
- (6) 气候对岩石类型的影响是产生沉积物结构特性的基本营力;
- (7) 沉积盆地中短期、单个断滑事件的影响, 导致原有沉积环境的侧向位移, 这一位移改变了局部的沉积物特征, 但不改变整体沉积性质;
- (8) 长期构造演化有可能产生新的沉积环境, 沉降速率与沉积速率之间的平衡导致盆地内部或外部泄水区的形成, 因此, 新环境的产生是盆地生长史的函数及许多断滑事件的总和,

物源区的抬升剥蚀产生了构造诱发的沉积旋回；

(9) 假定沉积物源区为花岗岩发育区；

(10) 沉积物产量在温暖潮湿和亚潮湿气候条件下最高；

(11) 径流量、植被及沉积的季节性直接影响着沉积物的搬运过程，搬运速率在热带干旱、陆间海及季节性气候下最高；

(12) 沉积物中粗粒组分（砂级或更粗）所占的比例，在化学风化为主的热带极潮湿条件下最小，随着物理风化增强而增大；

(13) 假定压实作用对容积空间的影响相对稳定。

3 全球旋回地层学的应用

3.1 旋回地层带

沉积物通量和沉积条件可通过相对稳定的、较长周期的格架中由米兰柯维奇波动所引起的短周期气候变化而进行估算。这种稳定的长周期格架可通过全球构造盆地演化史资料获得。地质时期中特定阶段的古气候标志，通常可用于分析米兰柯维奇旋回过程中的全球气候和全球地理变化。气候带的变化可通过经历相似端元气候（即出现气候最大值和最小值时期对应的条件）和气候序列的旋回地层带进行表示和描述。通过绘出每一气候旋回时期大气圈的季节环境图，可对上述项目进行研究和评价。

在特定时间段内，盆地的地理位置决定着气候对盆地内地层的影响。地球轨道与自转的规则波动引起了可预测的气候变化，其波动周期约为 20, 40, 100 和 400 ka。这种规则的气候变化直接影响到风化过程、风化速度、径流量以及可能的沉积物搬运过程，这些短周期的规则变化叠加在影响抬升速率和沉降速率的长周期的构造变动之上，它们与物源区的性质和地表起伏共同作用，控制着盆地中的沉积物的产量和粒径分布。因此，根据沉积作用对气候变化和盆地构造演化的响应即可预测地层记录。

旋回地层带是具有相似气候变化的地表区域，它代表了特定区域的端元气候的估测值，而且对任一时间段而言，气候变化范围应当包含在这些端元气候之间^[7]。温度和相对湿度随纬度的理想变化是哈德利环流分布形式的函数，根据这些气候变化和现代海陆分布勾绘出了 10 个旋回地层带^[7]。

3.2 绘制古代旋回地层分带图

采用类似 Parrish 和 Curtis^[12]的方法，通过导出气候最大期和最小期的季节性大气环流模式，可以得出地史时期不同大陆分布格局、不同海平面高度和不同造山带的旋回地层带分布图。过渡气候由最大和最小气候条件内插得出；对每一个带进行适当修正即可适用于气候最大期、过渡期和最小期。在绘制古代旋回地层带时应当注意，由旋回地层带代表的大气环流模式和气候变化，不能与该地层带内特定气候标志物（如蒸发岩、红层、磷块岩、煤、矿物组合、沉积物颗粒性质及沉积层序）发生冲突。

3.3 应用实例

3.3.1 半地堑中碎屑岩沉积体系

盆地地层受盆地中沉积物输入量和沉积物分布过程短期变化的控制，沉积物输入量受到米兰柯维奇旋回时段的气候变化、地形和物源的控制。沉积物输入量和盆地沉降速率之间平

衡状态的改变决定着沉积、沉积环境总体的变化。这一旋回地层模型综合了沉积环境随时间的演化和迁移,导致了规则的、可预测的侧向和垂向地层变化,即旋回。

Perlmutter 和 Matthews^[7]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,之所以选择半地堑盆地,是因为这一区域具有最广泛的气候变化和岩石类型,而且半地堑盆地在相对较窄的地段内沉积环境有较大的变化,有利于计算机模拟。

研究中首先考虑了研究区域的两个端元构造条件——沉降速率大于沉积速率的高边缘和沉降速率低于沉积速率的低边缘,并假设地堑两侧物源区的海拔高度大致相同,因而单位面积内产生等量的类型、结构和矿物成分相同的沉积物。但由于枢纽侧的物源区离盆地沉积中心较远,其平均坡度也较断层侧小,较长的搬运距离加上较低的坡度增大了磨蚀作用的影响,使得搬运到沉积盆地中的沉积物更细、分选性更好;另外,从枢纽侧搬运至断陷盆地中的沉积物量要大于断层侧的沉积物量。尽管断层侧的平均坡度较大,可望导致较大的侵蚀速率并进而产生较大的沉积物量,但由于枢纽侧的补给区较大,供给的沉积物量足以弥补其较低的坡度。这种沉积物供给上的不平衡,加上断层侧的沉降速率较大,使得盆地的沉积分界位于盆地几何中心的靠断层一侧。

在前述假设的基础上,Perlmutter 和 Matthews^[7]将气候旋回划分为6期:气候最大期(A)、气候最小期(C)、变凉期(B_1 , B_2)和变暖期(D_1 , D_2),并对各期中沉积区域的变化进行了预测。

假设每一沉积环境的粒径分布是理想的且粒度与速度直接相关,即可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^[7]。

3.3.2 碳酸盐台地中碳酸盐岩生长方式

Li 等^[11]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)方向随温度及营养物供给的增大而增大,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时,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的碳酸盐滩,从而验证了上述结果。因此,Li 等认为,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学定量程序进行精确模拟^[11]。

4 全球旋回地层学展望

全球旋回地层学可以对沉积盆地中的沉积环境的多样性和盆地中的地层模式与岩相分布进行预测,它大大地拓展了地层学的研究领域,提高了地层学的预测能力,使地层学由定性描述进入到了理性阶段。随着全球旋回地层学的发展,地层学——这门地球科学中的古老的学科必将焕发出新的活力。

但是也必须看到,应用全球旋回地层学模型进行模拟和预测还刚刚起步,尚需对地质过程与沉积响应之间的关系开展更深入的定量研究,以对用于全球旋回地层学模型的沉积学基本原理进行提炼。这一过程应包括:(1)更好地估计由稳定气候和一套已知的基岩所产生的颗粒粒径和矿物成熟度的“均衡”分布;(2)更好地了解由特定气候和一套达到平衡且留下特征信号的岩石所产生的风化剖面的延续时间;(3)对盆地中由构造和气候变化形成的沉积物分布与环境进行定量预测;(4)更深入地了解气候序列是如何改造地层记录的。可以预计,随着对沉积物的形成、搬运与沉积过程,以及全球气候变化和全球构造演化的了解更深入,全球旋回地层学必将发挥越来越大的作用。

参 考 文 献

- 1 Suess E. The face of the earth. Oxford: Clarendon Press, 1906. 556
- 2 Sloos L L. Sequence in the cratonic interior of North America. Geological Society of America Bulletin, 1963, 74: 93~114
- 3 Vail P R, Mitchum R M Jr, Todd R G, et al. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. AAPG Memoir, 1977, 26: 49~212
- 4 Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea level since the Triassic. Science, 1987, 235: 1156~1167
- 5 Wilgus C K, Hastings B J, Posamentier H, et al. Sea-level change: an integrated approach. Soc Econ Paleontol Mineral Spec Publ, 1988, 42: 407
- 6 Sangree J B, Vail P R. 应用层序地层学. 张宏逵等译. 东营: 石油大学出版社, 1990. 17~27
- 7 Perlmutter M A, Matthews M D. Global cyclostratigraphy—a model. In: Cross T A ed. Quantitative dynamic stratigraphy. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 233~260
- 8 Vail P R, Audemard F, Bowman S A, et al. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology—an overview. In: Einsele G, Ricken W, Seilacher A, eds. Cycles and events in stratigraphy. Heidelberg: Springer-Verlag, 1991. 618~659
- 9 Cloetingh S. 板内应力: 视海平面中三级周期的构造起因. 见: 威尔格斯 C K. 层序地层学原理. 徐怀大, 魏魁生, 洪卫东等译. 北京: 石油工业出版社, 1993. 23~37
- 10 吴智勇. 米兰柯维奇旋回及其年代地层意义. 地层学杂志, 1995, 19 (2): 156~160
- 11 Li Y Y, Lerche I, Perlmutter M A. Global stratigraphy: a model of carbonate growth patterns. Marine and Petroleum Geology, 1993, 10: 620~631
- 12 Parrish J T, Curtis R L. Atmospheric circulation, upwelling and organic-rich rocks in the Mesozoic and Cenozoic eras. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology, 1982, 42: 31~66

COMMENTS ON GLOBAL CYCLOSTRATIGRAPHY

Wu Zhiyong Jiang Yanwen

(Jiangnan Petroleum Institute, Jingsha, Hubei)

Abstract

Cyclic deposition on a global scale is the product of the changes in sea-level, tectonics, climate, geography and depositional features of the global or the combination of these. Global cyclostratigraphy is defined as the study of cyclic depositional patterns in the geologic record produced by the interaction of climate and tectonic processes. It is a stratigraphic branch which is developed based on the sequence stratigraphy. Stratigraphic changes through estimating sediment types and depositional environment in a basin can be predicted by means of the global cyclostratigraphy. This paper introduces systematically the fundament of the global cyclostratigraphy and application to predicting the stratigraphic thickness, lithofacies distribution and growing patterns of carbonate.