

层序地层学发展的若干重要方向

章建雄

(成都理工学院沉积研究所,成都)

[内容摘要] 随着地球科学的“环境化”和“社会化”,层序地层学研究重点及前沿正发生转移,主要表现在其不断向下列诸方向发展:①层序生物地层学;②成岩层序地层学;③高分辨率层序地层学;④高频层序地层学;⑤应用层序地层学;⑥模拟层序地层学和⑦勘查层序地层学。

关键词 层序生物地层学 成岩层序地层学 高分辨率层序地层学 高频层序地层学
应用层序地层学 模拟层序地层学 勘查层序地层学

随着全球自然资源不断耗损和社会对自然资源需求的与日剧增,迫切要求地球科学家建立一种更严密更精确的新兴综合学科,对地球资源进行新一轮评价,以获取新的矿产资源储备;另一方面,全球环境及气候恶化和全球海平面上升事件等正不断威胁着人类生存条件和社会经济的发展,迫切需求建立一种多功能实用科学,以指导调节全球和区域的环境及气候变化,使之降至最小程度,最终保证人类社会持续发展的条件,在此种严峻形势下,层序地层学应运而生。它具有如下主要特点^[1]:①强调全球海平面变化是层序形成的主要控制因素;②注重不同级别等时地层格架及地层单元的建立;③强调成因地层学的意义,即强调地层的成因分类;④在突出地震地层学中不整合面的同时,强调层序界面之间地层的三维构型;⑤在地震、测井、岩心和露头等资料综合之基础上,注重结合生物及磁性地层学的研究。作为多学科渗透交叉的综合产物,它吸取了诸多学科的长处,补充了其它学科之不足,自80年代诞生以来,以其极大的适用性、灵活性、经济性和优越性,而得到广大地质界的极大重视和社会各界的大力支持,因而得到飞速发展,并已自成其科学体系。在“一切科学技术应服务于人类社会生存和发展条件”以及地球科学由“矿产型”转向“环境型”和“社会型”并进入大综合、大交叉、大联合、大协调整合飞跃的现阶段^[2],层序地层学作为地球科学的重要基础学科之一,其重点和前沿正发生转移,并主要向如下几个方向发展。

1 层序生物地层学的发展

层序生物地层学(sequence biostratigraphy)^[3]作为层序地层学和生物地层学交叉综合产物,是层序地层学高度发展的必然结果。它首先提供可预测的相关界面体系组成的一个物理框架,把生物地层学观察结果置于此框架中,这些物理相关面确定了真实的年代地层单元,通过时间间隔网格,这些地层单元可用于评估生物带“顶”和“底”的相对位置。层序生物地层学的发展和应用具重大意义:①更精确地确定地层年龄、对比地层和评价沉积环境;②

① 本文1997年1月12日收修改稿。

通过层序生物地层学中的物理相关界面可把非海相生物带与开阔大洋微古化石带进行对比;③为使用高新技术辨认地下层序单元提供了可预测方法和理论前提。

2 成岩层序地层学的发展

长期以来,人们在进行层序地层学研究过程中,往往只注重测井、地震及野外露头资料的宏观分析,而忽略了沉积记录中各种微观现象固有的意义。近年来通过研究发现,在沉积岩粒间胶结物、次生加大边、次生矿物和孔洞充填矿物中,准确记载着当时地球动力学和物理化学条件及各种自然变迁的信息^[4]。自90年代以来,一些具有远见卓识的沉积学家已意识到成岩微观资料在层序地层学研究中的重要性,并很快把成岩作用与层序研究有机结合起来,从此,成岩层序地层学(diagenetic sequence stratigraphy)应运而生。

Ginsburg(1992)在研究大巴哈马台地时明确阐述了海平面变化对碳酸盐岩早期成岩作用的影响。Tucker(1992)则系统地总结了层序地层与成岩作用的关系并明确指出,碳酸盐沉积物的成岩作用可在相对海平面变化及沉积体系域这一框架内加以论述,并认为在不同的海平面旋回时期及不同的气候条件下,会出现不同的成岩作用类型。因此,成岩作用信息会有助于对不整合面的认识,从而有利于重建海平面变化。据此,Akihiro Kano(1992)提出了成岩层序地层学的概念,Goldstein等(1992)提出了碳酸盐胶结层序地层学概念,他们认为浅水碳酸盐岩层序的成岩特征如胶结物及溶孔等,可帮助认识不整合面。其原因是:在部分暴露于水面的大陆架碳酸盐岩横剖面上,随埋深增加成岩作用序列分别是渗流作用、淋滤潜流作用、潜流作用及深埋成岩作用;当大陆架完全被上升的海平面淹没时陆架在海底环境中接受碳酸盐沉积物,因此其岩石由两个部分构成,上部为海水成岩相,下部为淡水成岩相,不整合面位于上部成岩相和下部成岩相之间。他将这一思想应用于瑞士Gotland地区泥盆系浅水碳酸盐岩层序中,至少找到了9种不整合面。这对碳酸盐岩层序中难以识别的不整合面的重新认识,具有理论指导作用。这不仅为成岩矿物研究方法在层序地层学中的运用铺平了道路,而且作为理想的桥梁,把成岩作用和孔隙演化与海平面变化科学地联系起来。成岩层序地层学研究内容主要包括:①沉积相、层序和区域成岩作用的关系;②成岩作用与层序边界的关系;③不同成因层序,其成岩物理、化学特征及其变化;④胶结成岩事件的区域对比和连续性研究;⑤层序边界代表胶结物晶体生长间断研究;⑥成岩层序作为胶结物结晶生长过程中一系列沉积、加大事件的总和的研究;⑦孔隙和孔隙流体阶段性演化与海平面周期性变化的关系。

3 高分辨率层序地层学的发展

高分辨率层序地层学(high-resolution sequence stratigraphy)^[5]概念首先由Posamentier(1992)在阿伯塔东珂里三角洲人工模拟试验基础上而提出,他认为层序地层学原理与地质背景规模大小和演化时间长短无关,不仅可应用于海洋环境中,也可用于其它大陆环境中,高分辨率层序作为一次海平面升降旋回的沉积响应^[6],其分级单位仍是层序,它具有常规层序的一般属性(包括准层序和体系域),并在控制生、储层分布及圈闭岩性分类中具有重要作用。异旋回控制是陆相层序发育最重要的驱动力,它决定着地貌旋回、层序内部构成、成因层格架及体系域几何形态及其变化。陆相层序随气候和环境变化的时间尺度通常小于四—五级地层基准面变化周期,在不显示海洋影响证据的陆相序列中,区域分布稳定的层序及其

边界不整合面的成因可能是气候旋回的产物而与地层基准面无关^[7]。因此,高分辨率层序地层学的任务是运用综合分析的方法来研究并解释异旋回控制在陆相沉积过程中的作用,这将求助于地质科学各分支学科和诸如气候学、土壤学及海洋学与其它相关学科的通力合作和共同作战。

由于陆相地层缺乏生物化石,加之长期以来根据地磁资料进行的层序对比花钱、费时且不准确,地层学家们一直被陆相地层对比问题所困扰。随着高分辨率层序地层学发展及其在陆相地层中的应用,仅通过有限的盆内地层对比,可精确预测沉积相及其几何形态。因而高分辨率层序地层学不仅解决了地层学家们的后顾之忧,而且在陆相石油储层、层控矿床及地下含水层等方面的预测中具重大的理论和现实意义^[8]。

4 高频层序地层学的发展

高频层序地层学(high-frequency stratigraphy)概念最初由Wagoner等(1991)提出。相当于Miall等(1990)和Posamentier等(1992)的四—五级甚至六级旋回或准层序,周期为0.01Ma~0.2Ma,为米兰科维奇驱动的气候变化和低频短周期海平面变化的综合产物,属行星轨道参数(偏心率、偏度和岁差)不规则旋回层序,常以进积型、加积型或退积型组合型式产出,并构成三级复合层序(composite sequences)^[9]。高频层序资料最早发现于北美中大陆晚宾夕法尼亚世碳酸盐岩地层中,其中共划分出至少55个旋回束(cycle bundles)或四—六级旋回。随着工作的深入和研究程度的提高,发现在全球范围内不同时代碳酸盐岩地层中均分布有类似的退积型高频层序和进积型高频层序,前者属向上变深变细变厚序列,分布于海侵体系域中;后者属向上变浅变粗变薄序列,分布于高水位体系域中。高频层序通常低于地震分辨率,但通常可利用测井曲线资料进行识别和解释。

Wagoner等(1991)认为^[10],这种高频层序侧向或横向追踪范围最小仅数千km²,最大可达数百km²,具局部或区域性对比意义,在特殊条件下可进行全球对比^[11]。大量研究证实,碳酸盐岩地层中所以大量发育四—六级高频层序,其主要原因有:①在碳酸盐岩中大多数旋回为自旋回,海平面升降标记保存良好;②碳酸盐岩形成于具有稳定大地构造背景中构造沉降速率低的盆地或台地中,微小的全球海平面下降均可造成明显的相对下降;③碳酸盐岩主要形成于中低纬地区,温暖的气候背景有利于海相生物的繁盛和碳酸盐砂的堆积,容许高沉积速率的产生,从而提高了易于显示轻微海平面波动的沉积厚度和沉积相。在高频层序发育的巨厚沉积地层中,呈叠置出现的四级层序的众多砂体,通常是油气勘探的重要目的层^[12]。对于这类复杂地层的层序地层学特征,可通过对高频层序边界的仔细对比,将储集砂体归并为复合层序的层序组,然后再通过识别三级层序边界的办法进行油气勘探和预测^[13]。

5 应用层序地层学的发展

目前,全球气候变暖和全球海平面上升等事件正不断地威胁着人类生存条件和社会发展,迫切需求地球科学家建立一种多功能实用科学,以指导调节全球和区域的环境及气候变化,在此种严峻形式下,应用层序地层学(applied sequence stratigraphy)^[14]应运而生。

继美国等西方国家之后,中国地球科学家已经注意到,由于全球气候变暖、海水增温、冰川融化、海水体积增大等因素,造成了现阶段及将来很长时期全球海平面上升^[15]。尽管海平面上升是缓慢而“微不足道”的现象,但其长期累积值将会相当巨大,加之我国海岸线长,沿

海地区地质结构复杂,随着经济建设的发展所导致的地下水过量开采、土层压实、水位抬升等引起的区域性海平面相对上升更加严重,加剧了海平面上升的危害,并将对我国沿海地区的经济发展带来许多极不利的影响^[16]。如造成沿海地区风暴潮灾害加剧、洪涝威胁加大、增大排污困难、港口功能减弱等。因此,中科院地学部组成由十一位专家对地势较低、经济发展最快、人口相对稠密的珠江三角洲、长江三角洲、黄河三角洲和天津地区进行了实地考察,对当地政府作了通报,交换了意见,得到了当地政府有关部门的高度重视和大力支持,并采取了相应的对策和措施,获得了较佳的效果。

可见,以地史不同时期海平面变化为主要研究对象的层序地层学及其进展,在现阶段人类注重全球海平面变化对沿海地区经济发展的影响和对策研究课题中具有重大现实意义。

6 模拟层序地层学的发展

模拟层序地层学(modelling sequence stratigraphy),有人称之为定量层序地层学(quantitative sequence stratigraphy)^[15],属沉积学高度发展的产物,构成沉积学新理论体系的重要内容之一。沉积盆地地层模拟始于30年代,由于盆地沉积充填的控制因素复杂多变,难以将这些因素(尤其是基底沉降、海平面变化、沉积物供给速率)与充填过程及层序在时空上的联系概念化,因而模拟研究进展缓慢。进入80年代后,随着地球动力学、层序地层学及盆地分析等理论学科的兴起和发展以及高新技术在沉积学中的广泛应用,为地层模拟提供了可能,便发展了运用数学模拟分析方法来研究盆地层序的主要控制因素的相互作用及其对层序几何形态、沉积相及地震地层的影响,使之进入实用阶段,并成为盆地分析的一项常规研究手段和方法。

关于盆地充填过程的动态模拟研究,Read等(1986)、Bond(1989)、Aigner(1990)、Watney等(1990)、David等(1991)、Hardle等(1991)、Bond等(1991)、Jerve(1992)、Goldhammer等(1993)作出了突出贡献^[17~20]。其中最典型的是Jerve(1992)以大西洋型大陆边缘沉积充填过程为实例进行计算机模拟,并建立了进积式盆地充填作用的数学模型。该模型以层序地层学、沉积学及地球物理学原理为程序基础,以基底沉降史、海平面变化史、沉积物供给速率为输入参数,对盆地主物源方向硅质碎屑物的侵蚀、沉积、压实和盆地基底构造沉降及其对上覆载荷的均衡补偿过程进行描述^[21]。程序在二维空间内细分出许多时间单元,并在每一时间单元内,根据限定的控制沉积作用的物理进展,确定该时期输入碎屑物的几何形态、岩相分布及先期沉积物的侵蚀情况,进而重建盆地的沉积层序,最终较好地预测源岩、储层、盖层的时空配置关系,预测油气勘探中可能钻遇的砂组层数、厚度、埋深和储层特征等。实践业已证实,模拟层序地层学理论的发展对于研究盆地充填的主控因素以及在钻井资料有限情况下预测储层分布、控制地震资料的解释和检验勘探方案具重大意义^[22]。

7 勘查层序地层学的发展

目前,油气勘探的费用愈来愈高、困难愈来愈大,而且造成漏矿或盲目开采等现象,从而造成财力、物力及人力的巨大浪费,由于勘查层序地层学(exploration sequence stratigraphy)的应用为含油气盆地分析和油气勘探开辟了新的前景,促进了对烃源层和储层三维时空分布规律的了解和认识,提高了油气勘探精度,降低了油气勘探风险,因而最终提高了社会效益。难怪A. D. Miall(1992)指出^[23],层序地层学最大的贡献和进展之一,就是

勘查层序地层学理论的诞生及其在找矿和油气勘探活动中所带来的巨大社会财富!勘查层序地层学在油气勘探活动中的应用主要表现为如下几个方面。

(1)研究沉积体系域与生储盖及其组合的关系

Sangree 等(1990)^[24]对陆源碎屑岩层序地层体系域与油气生、储、盖、运移及圈闭的关系进行了深入研究,提出了各种体系域的勘探模式(表1~表8)^[9]。

表1 海进体系域的勘探模式

储层	烃源层	盖层	运移	圈闭
海岸—近滨相砂体具有良好的渗透性和孔隙性,潟湖相是变化的,可预测呈线性延伸的储层	海进体系域顶部和侧向的生油层好	海进体系域的顶部盖层好,侧向和底部复杂多变	典型的海进体系域主要表现为向下向侧向运移	孤立砂体的地层圈闭,底部连续的海进体系域要求有构造圈闭

表2 高水位体系域的勘探模式

储层	烃源层	盖层	运移	圈闭
以不连续的河流相和三角洲相为主,近滨相次之	一般为深部生油层,高水位体系域页岩通常贫油,以生气为主	向上倾方向渗漏到海进体系域,具侧向渗漏,最大海泛面是顶部盖层	气和少量油一般源于同期的生油岩,好的油源经常需要垂向断层通道	主要为构造圈闭,形成时间早是关键

表3 高水位体系域冲积扇的勘探模式

储层	烃源层	盖层	运移	圈闭
冲积砾岩和砂岩,连续性差—好,最好的储层砂是在海进体系顶部的域残留砾岩	难以生成油源,最好是深部较老的生油层	无盖层,风险大,与海进体系域有关的页岩是最佳封闭,但常被水道切割	经过断层垂向运移或通过高水位体系域侧向运移	最好的是构造圈闭,深部盆地具地层圈闭

表4 低水位体系域盆地扇的勘探模式

储层	烃源层	盖层	运移	圈闭
一般具高的渗透率和孔隙度,连续性可变,上部河道朵叶状砂体难以评价	源于深层的渗漏,可能来自凝缩层顶部和侧向页岩	良好,凝缩深海页岩,若被坡崩覆盖,则可能无盖层	从深部烃源岩垂向运移。也可源于凝缩层并向侧向运移	一般为地层圈闭

表5 低水位体系域斜坡扇的勘探模式

储层	烃源层	盖层	运移	圈闭
河道砂厚5m~40m,漫滩沙薄(1cm~3cm),河道砂不连续,漫滩砂广泛分布,但难于识别和评价	不确定,可能源于深部地层	内部页岩封闭,顶部靠凝缩层页岩封闭,天然堤限定的漫滩砂和裙边式尖灭	不确定,可能经过断层垂向运移或低水位体系域中垂向运移	一般为地层圈闭,有些为构造地层圈闭

表6 低水位体系域前积复合体的勘探模式

储层	烃源层	盖层	运移	圈闭
与河流、三角洲和近滨相,迭加可变,连续性较好	深层或海进体系域顶部的烃源层	海进体系域顶部封闭良好。侧向封闭可能很差	深部烃源层,可能以断层为通道,也可从海进体系域中向下运移	一般为构造圈闭,可能有压实圈闭

表7 低水位体系域水下深切谷充填的勘探模式

储层	烃源层	盖层	运移	圈闭
水下河道砂、浊积体等。连续性差,极易变	不确定,同期烃源层可能富气源	局部的页岩封闭	不确定,经过断层垂向运移可能最佳	地层尖灭

表8 低水位体系域深切河谷充填的勘探模式

储层	烃源层	盖层	运移	圈闭
一般为辫状河道砂。连续性好一很好	烃源来自海进体系域顶部,可能有深部油源	海进体系域页岩,侧向封闭性差	海进体系域向下运移,也可通过断层垂向运移	一般需要构造封闭或鼻状构造圈闭

(2) 圈定有利储层段和预测油气勘探远景区

勘查层序地层学提供了一种高效率的勘探工具,在有限井的勘探新区、井多的勘探成熟区和勘探尾声地区的应用中具有重要意义^[25]。

勘查层序地层学在勘探新区的应用包括识别地层单元的年代,了解有限井或露头资料

所控制的地下界面的延伸情况,确定远景带。层序地层学也用于圈定有利地层圈闭带,在有远景的构造带上预测出储量和盖层的质量。在勘探新区,很关键的应用是在区域主干线上建立层序和体系域的关系,确定远景带和圈闭类型,以便进行更详细的勘探。主要表现在:①在盆地主干测线网上建立层序界线格架;②确定剧烈构造沉降阶段层序界线;③在主干线的层序格架内细分体系域;④在储层和盖层分布的地层格架内确定含油远景带;⑤确定圈闭类型并开始勘探开发。

在勘探成熟区,由于含油远景较高的构造圈闭大都已被开采,勘查层序地层学主要用于识别和详细研究地层圈闭的含油远景。这方面的应用具有如下特点^[24]:①在大多数成熟区,测井资料的应用是高效益的;②深水沉积物中新的生物地层资料可能是有特殊价值的因素;③地震资料应用最有效益的地方是:有各种富含油带的盆地;前期勘探的主要对象是构造圈闭;析的区域有可用的组合放炮地震资料;④老的测井曲线所作的合成地震记录是有效的。

(3)在油气田开发中的应用

勘查怪序地层学概念可提供新理论、新方法、新手段来研究勘探和开发程度高的盆地^[27],在油气田开发中,其任务主要是^[24]:①确定新型成藏组合类型,对经过详细钻探的盆地进行新一轮勘查;②确定并圈定难以预测但可能有经济价值的地层圈闭;③重新评价正在生产的油气田,延长油气田开采寿命并增加储量;④建立更为详细的地层格架来探索新的成藏组合。

主要参考文献

- 1 覃建峰.层序地层学进展及其在油气勘探领域中应用的研究现状.世界石油科学,1993,第1期
- 2 SEPM research committee. Frontiers in sedimentary geology. Journal of Sedimentary Petrology, 1993, 63(2)
- 3 Brakenridge, G. R. Geology and global change. Geotimes, June, 1992
- 4 Allen, P. A. et al. Basin analysis: principles and applications. BSP, Ltd., 1990
- 5 Hailwood, E. A. et al. High-resolution stratigraphy. Geological Society Special Publication. 1993, No. 70
- 6 James, P. High-resolution sequence stratigraphy. Journal of Sedimentary Petrology, 1992, 62(2)
- 7 Posamentier, H. W. Sequence biostratigraphy. AAPG, 1991, 75(6)
- 8 Weimer, R. J. Development in sequence stratigraphy: foreland basin and cratonic basin. AAPG, 1991, 76(7)
- 9 Sangree, J. B. et al. GCSSEPM Foundation 11th Annual Research Conference Program and Abstracts. 1990, December 2
- 10 Haq, B. U. Sequence stratigraphy, sea-level change and significance for the deep sea. Special Publications International Association. Sedimentology. 1991, No. 12
- 11 Goldhammer, R. K. et al. The origin of high-frequency platform carbonate cycles and third-order sequences, constraints from outcrop data and stratigraphic modelling. Journal of Sedimentary Petrology, 1993, 63(3)
- 12 Hardie, L. A. et al. Field and modelling studies of Cambrian carbonate cycles. Journal of Sedimentary Petrology, 1991, 61(4)
- 13 Dunn, P. A. et al. Two-dimensional forward modelling of Lower Ordovician platform carbonate sequences. AAPG, 1991, 75(3)
- 14 Bond, G. C. Evidence for orbital forcing of Middle Cambrian peritidal cycles; sedimentary modelling. Kansas Geological Survey Bulletin, 1991, 233

- 15 Watney, E. K. et al. Sedimentary modelling, computer simulations and methods for improved parameter definition. *Kansas Geological Survey Bulletin*, 1992, 234
- 16 Bond, G. C. et al. Role of thermal subsidence, flexure, and eustasy in the evolution of Early Paleozoic passive margin carbonate platforms. *SEPM special publication*, 1991, No. 46
- 17 Goldhammer, R. K. et al. Eustatic controls on the stratigraphy and geometry of the late buildup, the dolomites of northern Italy. *SEPM Special Publication*, 1992, No. 47
- 18 Lerche, I. et al. Global cyclostratigraphy: a model of carbonate growth patterns. *Marine and Petroleum Geology*, 1993, 10(3)
- 19 Read, J. F. et al. Models for generation of carbonate cycles. *Geology*, 1986, 4, 107—110
- 20 Shanley, K. W. et al. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata. *AAPG*, 1994, 78(4)
- 21 Garcia-Mondejar, J. et al. Sequence stratigraphy and system tracts of a mixed carbonate and siliciclastic platform-basin setting. *AAPG*, 1993, 77(2)
- 22 Kaufman, J. Numerical models of fluid flow in carbonate platforms. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, 64(1)
- 23 Montanez, I. P. et al. Eustatic control on early dolomitization of cyclic peritidal carbonates. *Geological Society of American Bulletin*, 1992, 104, 872—886
- 24 Wescott, W. A. Geomorphic thresholds and complex response of fluvial systems — some implications for sequence stratigraphy. *AAPG*, 1993, 77(7)
- 25 Wright, V. P. et al. The sequence stratigraphy of fluvial depositional system. *Sedimentary Geology*, 1993, 86(3)
- 26 Haq, B. U. et al. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, 1987, Vol. 235
- 27 David, T. et al. Stratigraphic simulation of sedimentary basins, concepts and calibrations. *AAPG*, 1990, 74(2)
- 28 Aigner, T. et al. Stratigraphic modelling of epicontinental basin. *Sedimentary Geology*, 1990, 90(2)