

文章编号: 1009-3850(2000)03-0097-08

层序地层学的研究现状

赵国连

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101)

摘要: 本文介绍了层序地层的发展历史,总结了各阶段的主要理论和概念,以及各阶段所取得的成就,指出各阶段在理论上的发展及存在的不足;由此而追索到现代层序地层学的基本概念及理论的由来。总的来说,层序地层学经历了初期阶段、地震地层学阶段和现代层序地层学三个发展阶段,其中主要涉及层序控制的因素,海平面变化,可容纳空间变化和体系域类型等概念。笔者认为层序地层学发展主要原因是地震勘探技术的发展及石油工业的发展。作为边缘学科,它与诸多的学科都有较深的渊源。笔者认为,正是在这些结合点上,层序地层学才得到了极大的应用。笔者认为陆相层序地层学在中国有了较大的发展,在国际上属领先地位。本文总结了层序地层学的发展历史、现状及可能的发展方向,这将有利于人们进一步了解本学科的进展。

关键词: 层序地层; 地震地层; 陆相层序; 可容纳空间

中图分类号: P539.2

文献标识码: A

目前关于层序地层学研究已在全世界各地展开。因而正确地了解层序地层学,可以帮助我们发扬本学科的特点,利用该学科与其它学科的结合,在解决矛盾中互相提高,为现代层序地层学和相关学科的发展作出有益的探索。

1 经典层序地层学的研究概况

经典的层序地层学是一门边缘交叉学科,相对于现代层序地层学而言,它仅涉及被动大陆边缘的滨浅海相研究,因地质学(特别是地层学、沉积学、构造地质学)和地球物理学的相互渗透而迅速发展起来的一门学科,因其片面强调海平面变化对层序的控制作用,因而没能应用到陆相层序地层的研究中来。层序地层最早的萌芽思想产生在一百多年前(Sloss, 1984)^[1]。早在十九世纪中叶,地质学家在建立年代地层时就把不整合作为地层的顶界/底界。这正是现代层序地层的边缘。

1.1 层序地层学的诞生及概况

自从层序的概念(Sloss等, 1948)提出后,层序地层学便由此诞生,因长期进展不大,因

而在本世纪 20 年代以前,称初期阶段。

在该阶段,层序地层学只是处于依附经典地层学的时期,虽然人们建立了某些层序,如 Sloss(1963)建立的“北美地台层序”,但其影响并不大。但他所用的方法和提出的基本概念,仍沿用至今。当时 Sloss(1963)以不整合面为界,将北美克拉通前寒武纪末于全新世之间的沉积物划分为 6 套地层,称之为“层序”,并把它们当作填图单元。但 Sloss 所用的方法,却是传统的地质学方法,而且所用的基础资料也是由基础地质提供,这就是当时人们并不认可它的原因之一。

1.2 地震地层学阶段

多次覆盖技术和计算机的应用,才使地震技术走上了现代发展的道路。地震方法以其能提供从地表到地下一整套的构造特点,因而倍受地质学家和地球物理学家的青睐。在四五十年代,由于钻探高潮的出现,地震勘探活动猛增。在世界上,近期新发现的油田有 90% 以上是用地震勘探方法找到的。地震勘探是层序地层学的基础。地震地层学的主要论点和成就如下:

地震反射面与等时面 除了流体面(油水面、气水面)可能为穿过地层面外,一次地震反射都是沿地层面/不整合面的重要波阻抗(密度-速度)变化的响应,地层面是代表残留沉积作用面的那些层状接触面,而不是人为确定的岩石地层界面。Vail 等(1977)认为,地震反射界面是等时面,它能穿过岩石地层相的边界。因此地震反射除不整合外,在横向上可以穿过各种不同相的边界。在有井下资料的条件下,有可能把反射特征的横向变化联系起来。

地震相与沉积相 地震相单元被解释为表示该单元内产生反射的沉积物的一定的岩性、层理和沉积特征。地震相的解释主要依据下列要素:

内部反射成分和结构,包括反射界面的连续性、振幅和频率、层速度;边界关系,包括终止型边界和过渡型边界;反射波组的几何外形;横向上的相关系。

地震相往往与沉积相一一对应,常见有平行-发散反射,其分布广,振幅和连续性变化很大,多呈区域性分布,一般为宽阔而相对稳定的陆棚、三角洲台地,或在宽大的盆地平原上沉积。前积结构,它是在陆棚-台地和三角洲体系向盆地迁移过程中,在前三角洲和陆坡环境中沉积的岩相的响应(这一过程称为前积)。丘状-披盖结构,与其对应为深水碎屑陆坡-盆地环境和碳酸盐陆棚-台地环境下的沉积相及盆地平原和深海地形上的半远洋沉积。

用反射终止来识别不整合,对于削截反射来说,倾斜并被削截的反射代表区域不整合并存在地表侵蚀,反射局部削截,成为海底峡谷和被侵蚀的丘状体;超失反射,包括上超、下超和顶超,代表无沉积不整合;整一反射,能横向追踪到根据削截和超失解释的不整合。

海平面的升降周期 水域的变化控制各种沉积环境和岩相的分布,控制生油岩和储油岩的形成及分布,控制沉积体上、下界面的不整合面及可与其对比的整合面的分布范围。海水面的升降又是构造运动的一种表现,研究海平面的变化,可以帮助我们分析盆地的沉积史和构造史,以提供确定地层时代的依据。海平面的相对变化,可以是局部的、区域的或全球的,海平面的相对升降周期是指海平面由逐渐相对上升、静止到迅速下降所经历的沉积时期。Vail 认为海平面变化具有全球性,而且海平面升降速率总是大于盆地沉降速率。

海平面变化的标志可概括为海岸上超表示海平面相对上升,海岸顶超表示海平面相对

静止, 海岸上超向下迁移表示海平面相对下降。

海岸上超是海岸岩相反射层渐次向陆终止, 因为盆地下沉保持静止时, 海平面相对上升, 或海平面上升比盆地上升速率大; 海平面保持静止而盆地下沉, 海平面下降但盆地沉降速率更大, 都会出现海岸上超。海岸线的迁移是海平面变化、盆地沉降和沉积物供给等的函数, 同样在上超过程中, 可以发生岸线的海进、海退和静止三种情况。上超的特点之一是上超点不停地向陆地方向推进。如破坏性陆坡, 即超覆(海相上超或陆隆)型陆坡的沉积速率小于沉降速率。

海岸顶超是盆地沉降与绝对海平面彼此在一个前积期内基本保持平衡。顶超的特点之一是上超点固定不动, 而海岸线随着沉积物的连续堆积不断后退, 而沉积基准面没有发生升降。

主要成就 在理论上, 地震地层学促进了人们对地层学以新的思考, 并导致现代地层学的产生; 在实践上, 人们开始利用地震速度来提取岩性信息。并在盆地规模上开始对地层结构、沉积相的变化与区域分布进行分析预测。Vail 首先用地震地层学来研究海平面的变化; Todd 和 Mitchum 对墨西哥湾和非洲西部海上的三叠纪、侏罗纪及早白垩世地震地层学进行研究; Glement 对俄克拉荷马 T13N, R101W 格里区韦托加-奇卡沙趋向带模罗斯普林格底砂岩进行地震模拟, 为油气勘探提供了重要的依据。

2 现代层序地层学的特点

2.1 基本理论

从80年代到现在, 前期大约至1989年, 随着可容纳空间概念的建立, 层序地层学的理论与方法日趋完善。此时层序地层学的主要研究内容如下:

在研究海平面变化周期的不同相里(低水位期、海进期和高水位期)具有成因联系的地层沉积层序(Haq等, 1989), 建立以地层不连续面为界, 在成因上有联系的旋回性地层的年代地层学体制, 以解释沉积环境及其有关岩相的分布, 这些岩相单元可能限于以层面为界面的等时段内, 也可以跨越时间面(Vail和Sanghee, 1988)。下面为一些基本概念的论述:

1. 海平面的相对变化与可容纳空间

全球海平面升降可用周期性曲线表示, 构造沉降可用线性表示, 两者合并则产生海平面的相对变化曲线, 海平面的相对变化提供沉积物积聚的可容纳空间。

2. 层序界线及类型

层序界线是限定层序的区域性地层不连续面, 根据海平面下降速度的对比, 层序界线可分为两种类型。

类型 I 层序界线 该界线为一区域性不整合面, 是全球海平面下降速度大于盆地沉降速度时产生的, 其特征是具有地面上的暴露面和伴随河流的活动而同时产生的侵蚀作用;

类型 II 层序界线 该界线为一区域性的面, 它对应着海平面的缓慢下降, 其速度小于沉积海岸线坡折点处下降的速度, 所以在这个海岸坡折点的海平面没有相对下降。此界线面也有地面暴露和海岸上超面下移的现象, 然而它缺失由于河流的活动而造成的区域性侵蚀以及向盆地方向的岩相剧烈变化, 与原来的地震地层学概念相比, 下超面已不再是划分层序

的界线, 仅为亚层序的界线。

据此, 层序也可以分为以下两类:

类型 I 层序 该层序的下界面为类型 I 层序界线, 上界面为型 I 或类型 II 层序界线所控制的一套层序。自下而上由低水位期体系域、海进期体系域和高水位期体系域组成。

类型 II 层序 该层序的下界面为类型 II 层序界线, 上界面为类型 I 或类型 II 层序界线所控制的一套层序, 由下而上分为陆棚边缘体系域、海进期体系域和高水位期体系域。

2.2 陆相层序地层学的研究概况

国外学者普遍认为, 尽管存在一些疑问, 但海相层序地层学的基本原理能够应用于陆相地层^[2], 他们认为海平面升降、构造运动和气候等控制因素使海陆相的沉积特征不同, 并认为海相层序地层学的概念在陆相地层中的应用, 要求对基准面和沉积物供给的控制因素作细致的研究。在滨岸非海相环境中, 相对海平面变化可作为其地层及地貌的基准面; 而向陆, 决定可容纳空间的地层基准面更复杂, 且具有多种形式, 如河流地层的均衡剖面、某些风成地层的地下水面以及某些山间盆地的湖面, 由于更靠近物源, 沉积物供给变化更为复杂, 气候和构造因素对沉积物供给的影响便清楚地表现出来。

加拿大学者把陆相近海冲积层的发育与海平面升降联系起来建立陆相近海冲积层的层序地层学模式^[1]。相对海平面变化是河流体系中的地层基准面—河流均衡剖面的主要因素, Shantey 和 McCabe(1991, 1993) 认为河流沉积体几何形态的变化与同期海平面的升降相联系, 水进体系域和高位体系域可以根据冲积层内的几何形状标志和沉积学标志识别出来, 低位体系域受地区限制并向盆地边翼超覆。该体系域内部结构的特征为构成叠置的、向上变粗并加厚的河道充填复合体的砂质至砾质堆移质沉积。水进体系域的特征为由向上变细变薄的层组构成的推移质和悬浮质的沉积混合物, 这些地层在低位期沉积广泛, 说明在基准面上升期间的可容空间增大, 高位体系域由悬浮质沉积和较大的土质层组成, 这些特征可表明有限的可容性和地面梯度最小的特征。

在加拿大召开的讨论会(1991)认为, 必须考虑基准面和沉积物补给空间控制因素来研究陆相层序地层学; 其控制因素包括气候作用, 构造作用和海平面变化等。当可容空间为正时, 地层构型受到造成沉积物补给作用的强烈影响; 当沉积物补给速率大于可容空间增长速率时, 发生进积; 当沉积物补给速率与可容空间增长速率相等时, 发生加积; 当沉积物补给速率小于可容空间增长速率时, 将发生退积。

中国学者从环境和相类型分析入手来研究海相层序地层学, 划分沉积体系, 确认层序边界类型和层序类型。目前主要学派有以下三个:

1. “类海相”派

该学派认为, 湖泊与海洋类似, 是陆相沉积盆地中的主导沉积控制体, 它不仅控制着自身的沉积发育, 也控制着毗邻的河流及风成沉积, 湖平面变化以类似于海平面变化控制着整个盆地的沉积发育, 因而他们认为, 只需稍加修改, 即可把海相层序地层学的模式直接应用到陆相沉积盆地。

2. 陆相派

该学派是以陆相层序研究为主题的学者为代表, 他们认为, 陆相层序的充填风格、沉积

体系都有其自身的特点,其层序的控制因素不同于海相层序,其中构造的控制作用较明显。

李思田(1992)^[7]从层序地层学概念的根源出发,提出了完全不同于国外海相层序地层学模式的陆相层序地层学,他把相和沉积体系放到盆地整体地层格架内,按等时界面划分,识别并对比层序界面,划分层序^[1,5,7]。并提出了盆地充填系列和构造层序,前者指盆地充填的整体,在大型叠合盆地的条件下,包括了不同盆地原型(或称单型)沉积充填的总和;构造层序是指界于I级古构造界面(大区域性的不整合面及假整合)之间的沉积序列,它与Hubbard的大层序(megasequence)大致可以对比,其内部常有次级的古构造面,伴有侵蚀和间断。构造层序由界于II级古构造面间的层序组成。同时他还认为,层序有三分性,层序的顶界面是古构造运动面,其下部反映了初始充填或早期充填的特征,古地貌复杂,冲积体系发育;中部为相对稳定阶段周期性的水进,主要是三角洲-湖泊发育期;顶部河流作用强化,分异性强,是新构造强化之前奏,这是划分层序的根据,并认为体系域可以划分为:沉积体系单元(VI),成因相(VII),成因相内部单元(VIII),岩性-能量单元(IX)等一系列不同级别的建造。

解习农认为^[1,4,5],陆相断陷盆地受构造作用的控制明显,物源近,堆积快,突发事件沉积所占比例较大,气候变化对沉积影响明显,因而陆相层序分析不能套用海相层序分析方法。中国中生代盆地多数为叠合盆地,因而首先需要识别出组成叠合式盆地的原型,每个原型代表一个构造层序,断陷盆地有的单独出现,有的则作为叠合式的一个原型。断陷盆地的层序样式据应力场及构造作用划分为拉张/张扭型层序,走滑-伸展型层序和热沉降型层序,并认为不同的构造层序样式具有不同的体系域,拉张/张扭型层序由初始充填体系域(PST),湖扩展体系域(EST),湖萎缩体系域(CST)等三个体系域构成,主要以冲积扇,扇三角洲,三角洲和湖泊体系沉积为主;挤压/压扭型层序由冲积扇,河流及洪泛平原沉积;走滑-伸展型层序及热沉降型层序与拉张型层序相似,但又有其自身的特点,走滑-伸展型层序以冲积扇、扇三角洲和湖泊体系为主,而三角洲体系极为少见;热沉降型层序主要以冲积扇、河流、三角洲和湖泊体系沉积为主。

3. 综合派 该学派认为,层序受海平面变化、湖平面变化、沉积物供给、构造作用及气候等因素的影响,因而提出了新的综合方法。他们把湖盆分为敞流湖盆、闭流湖盆,各自有自己的沉积模式^[3]。

他们研究了陆相盆地的沉积基准面和可容空间,认为地层的展布形式和沉积相的分布取决于可供沉积物沉积空间的多少和新增可容空间的变化率,陆相断陷盆地中的沉积基准面是湖平面的递降水流平衡剖面/河流平衡剖面。

盆地层序受构造作用、气候变化、沉积物供给和湖平面变化的控制,其中前两者为主导因素,后两者次之,其中构造作用又是湖平面变化最主要的控制因素,对敞流盆地,构造作用与其相对成镜像关系;而对闭流盆地,盆地基底的整体构造作用对其相对湖平面变化无影响。气候的作用方式表现为潮湿气候条件将使湖平面上升,使闭流盆地成为敞流盆地,而干燥气候的作用方式则相反。敞流盆地中,层序边界的形成主要受构造因素的控制,叫构造层;而闭流盆地的层序主要受气候作用的影响,叫气候层^[3]。

国外的不少学者也认为,陆相层序的受控因素与海相不同,应区别对待,尤其要考虑可

容空间的复杂特点。

2.3 现代层序地层学的成就

现代层序地层学在理论上已突破了地震地层学的研究范围,可容纳空间概念的提出,使人们能正确了解层序的成因,并把层序学推广到陆相地层中来。

在海相层序研究方面^[1,5,6], Christopher 和 Kendall 等(1989)一起研究了全球海平面变化, Scoot, Weimer, Richard 和 Vail(1991)等研究了墨西哥湾沿岸、阿拉伯东南早白垩世的海平面变化,加拿大北极群岛三叠纪的海平面变化事件,修订 Exxon 曲线并对侏罗纪海平面变化进行重新评价。总之,与海平面变化相结合的层序地层学研究,是 Vail 等学者的杰出贡献,为全球性海平面变化及海相地层的全球性对比做了大量的工作。同时也为全球海平面变化提供了证据。目前,利用计算机手段对可容空间变化进行模拟,以此揭示层序变化的原因。为层序地层学的定量化研究作出了贡献。

中国地质学家在海相层序地层的研究方面取得了很大的进展。以王鸿祯院士为首的国家科委与地矿部基础研究重大项目“中国古大陆及其边缘层序地层和海平面变化研究”,涉及到中朝和扬子两个古大陆及其边缘的层序地层研究,在层序边界、层序级别、海平面变化定量计算、高频层序、地层界线优化和层序的构造控制因素等方面的研究,为中国三大古陆在早古生代的古大陆再造及构造重塑提供了重要的证据。

在陆相层序的研究中,中国学者据该领域的领先地位。王东坡(1994)研究了松辽盆地的白垩纪湖相沉积的层序地层,并对海陆相层序的可比性进行了有益的探索和总结,他把此项研究纳入全球沉积地质计划的第一个试点项目全球海相白垩纪地层的对比。徐怀大、顾家裕(1996)^[1,5]研究了松辽盆地的层序地层特征,为塔木的油气勘探提供了有用的证据。至于松辽盆地、渤海湾、鄂尔多斯、四川、柴达木、准噶尔、吐哈、我国南方及海域诸盆地的地层层序的研究更是硕果累累。

国外学者在陆相层序研究方面也有一定的贡献^[1,5]。Shantey 和 McCabe(1991, 1993)对犹太州南部 Kaiparowits 高原的研究,得出沉积体几何形态的变化与同期海相地层变化的内在联系; Mancila(1988), Gulian(1989), Kokogian(1991)和 Uliana(1991)在阿根廷几个内陆盆地勘查了三叠纪和白垩纪冲积层中的低位体系域、水进体系域和高位体系域。Van Wag-ner(1995)对犹太州 Book Cuffs 冲积体系露头进行了研究,盆地中同时有海相地层和陆相地层,他将地层层序边界从海相追索到陆相,从而建立起海相和陆相岩层的年代地层格架。

3 有关层序地层学发展的反思

层序地层学的发展有其自身的必然性,因为沉积过程,本身具有一定的规律,人们一直在尝试将其规律表达出来。而主要围绕两个方面,一是如何将沉积体的几何形态用图象表达出来,同时将其定量化;二是将沉积体系与沉积环境联系起来,同时用沉积动力学模式来说明沉积体的成因。并用建立定量沉积模型的方式将二者联系起来。层序地层学不仅要(layer)对层序和体系域进行详细地划分,而且还要对沉积水动力、沉积速率、物源供给、盆地沉降和气候等因素进行研究和对比。

层序地层学从地震剖面入手,结合测井技术和钻探技术来研究沉积体在空间的展布,使

得我们在研究储层方面可以深入到油层的尺度去再现沉积体的空间展布特征,这将给沉积学及油藏描述带来新的生机。层序地层学今后的发展主要有以下几个方面:

它的前期是从分到合,多学科互相渗透便产生了层序地层学这门新的学科,这正是在当初产生层序地层学的各结合点上,层序地层学的应用将会产生令人瞩目的成果。

(1) 应用层序地层学将会产生新的可靠的年代层序地层表,用重大的层序类型和层序界面,在地层的对比基础上,给出更准确的年龄值,并用同位素测年进行厘定。

(2) 从油藏的规模上研究层序地层学,既描述了油藏,又提高了层序地层学的精度,以便对更小尺度的沉积体进行描述。

(3) 由于目前人们正在应用地球化学、古生物、古地磁及岩石学特征来研究层序的划分,在这些结合点上将产生相应的层序地层研究的新方法和新成果。

(4) 计算机模拟将促进层序地层学的量化,并带来全新的地层学概念。

(5) 由于层序地层学的发展,必将促使地震勘探技术的提高,由此而引发新的构造学与板块构造学的新发现,及深部地质的新认识。

4 讨论

层序地层学理论的提出,就是对沉积层自身规律的再认识,它应该是随时间变化的有机序列,即随时间的变化,沉积模式、地层的叠置方式、生物演化、化学成分、矿物成分、沉积厚度及物源类型均具有一定的旋回性,对其成因的探讨,人们提出了不同的看法,有人认为是构造作用下形成的,有人认为是气候旋回,或者是海平面变化造成的,也有人认为是行星地球演化的过程中形成的,不同级别的层序对应于一定的事件,Vail等强调全球海平面变化所产生的结果,如大陆泛滥旋回、大海侵-大海退旋回、沉积层序旋回等。层序地层学就是通过层序的研究对三级海平面的变化开展大区域或全球性的对比。问题在于并不是所有三级海平面变化都具有全球变化的性质。而多数海平面变化则受区域构造作用控制。在现有的三级与更高级别层序的同位素测年精度的条件下,对不同的盆地进行海平面事件的对比几乎是不可能的。现在人们逐步认识到,高频旋回属于米兰科维奇地球运动周期^[1]。研究表明,岁差周期旋回(19ka, 23ka); E1, E2 偏心率旋回(98ka, 126ka); E3, E4 偏心率旋回(413ka, 1300ka),这些旋回是米兰科维奇地球运动周期的产物,它们产生了高频地层层序。同时科学家们又发现,低频旋回也是由天文事件所引起。这样一来,所有不同级别的层序都有其本身的成因,这就大大加深了层序地层学在理论上的意义。层序地层学已经成为一门系统性较强的学科。

层序地层学的研究将产生出不同的分支学科,其中高分辨率层序地层学及陆相层序地层学将异军突起。这是因为高分辨率层序地层在油藏描述方面有较好的应用前景,而且地震资料也比较充实。相互促进必将带来层序地层学新的发展。

陆相层序在形成过程中,已产生了自己的概念和方法,可与海相层序地层学平分秋色甚至有后来居上的气势。尤其是在中国,因为目前我国已发现的油田以陆相为主,且资料十分丰富,因陆相环境的相变频率远远高于海相,在油藏描述中十分需要分频层序地层学的研究来帮助储层预测,以提高储层预测的精度。

总之,层序地层学这门新兴的边缘学科方兴未艾,为沉积学和地震勘探学提供了一个理想的结合点,将继续为油气勘探和开发带来新的活力,同时层序地层学在此过程中得到进一步的完善。

参考文献:

- [1] 顾家裕,邓宏文,朱筱敏主编.层序地层学及其在油气勘探开发中的应用[M].北京:石油工业出版社,1997.
- [2] 王冰.松辽盆地上白垩统 QYN 组成因地层层序的地层格架、沉积类型、烃类分布[J].国外油气勘探,1994,6(5): 555—569.
- [3] 纪友亮,张世奇,陆相断陷湖盆层序地层学[M].北京:石油工业出版社,1996.
- [4] 解习农.断陷盆地构造作用与层序样式[J].地质论评,1996,42(3): 398—412.
- [5] 顾家裕,邓宏文,朱筱敏.层序地层学及其在油气勘探开发中的应用[M].北京:石油工业出版社,1997.
- [6] C°K°威尔格斯.层序地层学原理[M].徐怀大等译,北京:石油工业出版社,1991.
- [7] 李思田等.鄂尔多斯盆地东北部层序地层及沉积体系分析[M].北京:地质出版社,1992.