

文章编号: 1009-3850(2002)02-0008-10

## 陆相层序地层学研究进展与挑战

谢 渊<sup>1,2</sup>, 刘家铎<sup>1</sup>, 王 剑<sup>2</sup>, 罗建宁<sup>2</sup>, 李春玉<sup>3</sup>

王生朗<sup>3</sup>, 汪 海<sup>3</sup>, 李明辉<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082; 3. 中原石油勘探局, 河南 濮阳 470001)

**摘要:**层序地层学的发展经历了三个发展阶段, 而最近 10 多年的发展最为迅猛而引人注目, 取得了许多重大进展。最突出的表现之一, 就是陆相层序地层学研究已成为一个国际性的热点课题, 尤其是引起了我国众多地质专家的极大关注, 并初步取得了丰硕的研究成果。但是, 与其它学科一样, 陆相层序地层学在向纵深发展的过程中, 也出现了很多问题。如何解决这些问题, 并切实有效地、更为得心应手地把陆相层序地层学应用到油气勘探以及其它生产应用领域, 已经成为二十一世纪陆相层序地层学发展所面临的紧迫挑战。

**关键词:** 陆相层序地层学; 发展阶段; 油气勘探; 挑战

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

世界油气勘探 140 多年的历史证明, 思维和技术的进步是推动油气勘探巨轮滚滚向前的根本保证, 而地学中新概念和新技术的不断涌现、发展及综合利用又是油气勘探能够不断造福于人类的最根本原因之一。近 20 多年蓬勃发展的层序地层学, 正是一个综合了有关油气储层质量和分布的主要控制因素, 并充分考虑了许多经济评价因素的新概念和新技术 (Weimer, 2001)。它为油气勘探中烃源岩、盖层、油气储层的预测、圈定及描述提供了强有力的技术支撑; 它在对各种不同的盆地和构造位置中的相和环境变化的预测效果, 以及对地层解释的积极影响等许多方面, 不亚于板块构造对构造地质的影响。

正是在层序地层学蓬勃发展与广泛应用的同时, 它存在的一些问题也引起了国内外许多重要学术会议和人们的深深思索和探讨。1997 年我国石油学会举办的“层序地层学及其在油气勘探开发中

的应用”专业会议, 2000 年在巴西举行的主题为“地质学与可持续发展——第三个千年的挑战”的第三十一届国际地质大会, 以及 2001 年在美国丹佛市召开的主题为“能源的长期探索”(energy odyssey)、素有“上游世界石油大会”之称的 AAPG 年会, 就专门针对层序地层学进行了热烈的探讨; 国内众多专家学者在我国许多盆地的层序地层学研究的辛勤耕耘和探索中, 也提出了陆相层序地层学研究面临的一些难点与挑战。本文正是把在学习和应用层序地层学进行海陆相沉积研究中所遇到的一些问题提出来, 以期达到抛砖引玉之效, 与业界同行一道, 共为陆相层序地层学灿烂的明天而努力。

### 1 层序地层学的形成与发展

#### 1.1 层序地层学发展阶段

近 20 年来, 地学的一项意义重大的革命性进

展,就是层序地层学的蓬勃兴起和广泛应用。它是研究一系列以侵蚀不整合面或无沉积作用面及与之可对比的整合面为界的,具旋回性的,成因上有联系的,并可置于年代地层格架内的沉积岩层关系的一门地层学分支学科,它通过综合分析地震、岩心、测井、古生物及地球化学等资料,进行沉积盆地不同级序沉积地层单元的划分与等时性对比,建立层序地层格架,在整体统一的格架中研究沉积体系、沉积相的时空展布,重塑盆地沉积充填演化史,预测生储盖组合及地层、岩性油气圈闭的空间分布<sup>[1,2]</sup>。目前,它作为一种非常有效的理论和方法,已被广泛应用于沉积地层分析和油气勘探开发等许多领域,并仍呈蓬勃发展之势。回顾它的发展历程,大致可分为三个阶段:

### 1. 层序地层学萌芽阶段(1948~1977)

最早在1948年美国地质学会举办的沉积相研讨会上,Sloss, Krumbein及Dapples等就提出了“层序”是“一种以不整合面为边界的地层单位”这个概念,可一直到二十世纪70年代“层序”仍未得到普遍认可和应用,只是Sloss(1963)在北美克拉通晚寒武世至全新世地层研究中,率先应用“层序”进行了地层划分,其后也仅有他的学生接受和应用了这一概念,并主要限于克拉通盆地中根据地表露头所见的区域不整合面进行地层层序划分,但这为当今层序地层学的发展奠定了概念基础。正如Vail首次对层序地层学进行系统总结时所讲的那样,一些对今天的大学是不言而喻的概念,在当时却遭到人们的嘲笑与反对,而也正好是人们不轻易接受“层序”的这段历史,代表诸如盆地构造沉降、海平面变化及沉积供给等这些重要的层序地层学概念从萌芽至逐渐建立并融入到地层综合解释的过程。

### 2. 地震地层学成熟和层序地层学形成及发展阶段(1977~1988)

二十世纪70年代末,“地震地层学”(Vail等,1977)和“地震地层学在油气勘探中的应用”(Payton等,1977)等著作的出版,标志着地震地层学已进入发展成熟期。直到80年代末的这一时期,代表层序地层学处于地震地层学成熟发展阶段,进一步完善和发展了层序的概念,明确层序是以不整合面及其与之可对比的整合面为边界,在成因上有联系的具有旋回结构的,并可置于年代地层框架的一套沉积地层;建立了一套主要依据地震资料进行层序分析

的技术系统和方法体系(Vail等,1977);提出了利用地震反射界面上超点的迁移幅度研究海平面变化的方法(Vail等,1977),阐明了全球海平面变化具有相对一致性,海平面变化控制层序发育的观点;应用地震、钻测井资料确定和预测盆地地层结构、沉积相类型及其区域分布,建立了被动大陆边缘盆地地层分布模式,为此后建立具有成因意义的层序演化模式(Posamentier等,1988;Galloway,1989)奠定了基础。因此,这一阶段对层序地层学的发展具有极其重要意义(Sloss,1988;Van Wagoner等,1990)。

### 3. 层序地层学理论系统化与综合化发展阶段(1988年—至今)

“海平面变化综合分析”(Vail等,1988)、“层序地层学工作手册”和“层序地层学基础”(Sagrec和Vail等,1988)及1988年SEPM层序地层学特刊(Wagoner等,1988),以及Mitchum等有关层序地层学的著作的问世,标志层序地层学进入全面发展的新阶段。

1988年,经典层序地层学理论体系宣告形成(Vail and Posamentier,1988)。它发展了沉积学中的层序、体系域等概念(Mitchum等,1977;Brown等,1977),并分别以初次海泛面和最大海泛面把一个完整的层序划分为三个体系域,详细定义了层序与层序类型,层序界面及类型,沉积体系域,初始和最大海泛面,层序级别,准层序和准层序组,凝缩层和可容纳空间等一系列相关概念。突出地强调海平面升降变化的全球性和周期性,同时还强调构造沉降、全球海平面升降、沉积物供给速率及气候等四个基本变量对地层单元的几何形态与岩相组合的控制。

1989年,出现了以Galloway代表的成因层序地层学新学派。它以最大水进面(海泛面或湖泛面)泥岩作为层序边界,强调在海平面或湖平面从下降到上升所完成的进积-退积-加积作用过程,形成一个完整的成因地层单元,层序内部具有向上变粗再变细的演化序列。由于最大水进面处的泥岩沉积在钻井岩心和露头剖面上易于识别,在测井剖面上有特征的响应,在区域上展布稳定,厚度薄并具极好的等时性,因而成因层序地层学被广大油气地质工作者较容易地应用于科研与生产实践中<sup>[3,4]</sup>。

到1994年,Cross等提出了高分辨率层序地层学这一新理论。它以全新的思路和技术方法,根据基准面旋回原理和可容空间变化原理,揭示基准面

旋回层序与沉积动力学和地层响应过程的关系,研究相对应的沉积相演化序列,预测有利储集砂体的产出位置和发育情况。它强调基准面升降旋回取决于海(湖)平面变化、构造沉降、沉积负荷、沉积通量及沉积地形等综合因素,在一个基准面升降过程中形成的沉积充填序列即为一个差异层序单元,而层序界面对于基准面下降到最低点的位置,既可位于沉积界面之上(相关整合面),也可位于沉积界面之下(不整合面或冲刷面),基准面旋回层序级次取决于地层基准面旋回周期的长短<sup>[5~9]</sup>。该理论较好地解决了陆相盆地沉积层序对比分析的一些难题。

上述三大主要理论体系的各放异彩,基本上代表了这一阶段层序地层学的突出进展,也代表了层序地层学全面蓬勃发展,真正广泛应用的一个辉煌时期。

## 1.2 层序地层学研究进展

层序地层学研究取得的进展,主要集中于从1988年以来的第三发展时期。此间,层序地层学真正成为了地学一大亮点和热点,并取得了巨大的、多方面的、多层次的进展:

### 1. 学派纷呈

从传统层序地层学发展到传统层序地层学、成因层序地层学、高分辨率层序地层学等三大主要理论体系齐放异彩,并成为层序地层学的三大主要流派和三大支柱技术体系。传统层序地层学仍然闪闪发光,高分辨率层序地层学蓬勃兴起,同时,还出现了不少新的层序地层学概念和发展方向:

高频率层序地层学(Van Wagoner等) 高频率层序地层学主要研究相当于Miall等(1990)和Posamentier等(1992)划分的四-六级高频旋回层序的层序地层学,它不同于高分辨率层序地层学(Posamentier, 1991; Cross, 1994),因为高分辨率实际上强调的是不同级次的基准面层序旋回的等时对比的高分辨率、高精度<sup>[10, 11]</sup>。高频层序旋回是周期为米兰科维奇驱动的气候变化和短周期海平面的产物<sup>[12]</sup>,大量发育于多数旋回为自旋回的碳酸盐岩中,它具有局部或区域对比意义。如巴哈马群岛新近纪泥灰岩/灰岩交互的进积型碳酸盐岩高频旋回的主要控制机制就是轨道岁差/旋回(Eberli, 2000)。

生物层序地层学(殷鸿福等, 1997) 生物层序地层学把层序地层学与生物地层学紧密结合,通过生物带“顶”、“底”相对位置,更精确地确定层序年

龄、划分对比层序和恢复层序沉积环境<sup>[11]</sup>。

成岩层序地层学 成岩层序地层学是把成岩作用和孔隙演化与海平面变化相联系的产物<sup>[13]</sup>。它强调成岩微观资料在层序形成演化研究中的重要意义,因为成岩事件和成岩现象在层序界面的特征表现,一定程度上响应了沉积时期的海平面变化、构造抬升、气候变化等信息,因而能够为层序研究提供更有用的微观信息。如在挪威海域埋深很大(大于5000m)的早中侏罗世地层中,受层序地层的控制,进积作用期海水与淡水混合带向海方向迁移而不大可能渗入滨海相砂岩形成高孔隙度储层;而在强烈加积作用时期,海水与大气淡水混合强烈并使滨海相砂岩发生较强的绿泥石沉淀作用,形成厚厚的绿泥石包壳而阻止后期硅质胶结作用的发生,从而局部发育高孔隙度( $> 30\%$ )的优质储层(Lafont等, 2001)。

此外,还涌现出了露头层序地层学<sup>[13]</sup>、测井层序地层学、化学层序地层学、应用层序地层学以及层序充填动力学等等新概念。

这些新的层序地层学概念的大量涌现,无一不是层序地层学引起人们广泛兴趣百家争鸣的结果,无疑是它特有的魅力的具体体现,无疑是人们倾注大量思索和实践的最好表白。

### 2. 研究对象与理论模式拓广

从被动大陆边缘盆地拓展到活动性大陆边缘盆地(包括造山带沉积盆地)、克拉通内陆拗陷盆地、裂谷盆地、断陷盆地等,从海相盆地拓展到陆相盆地,从滨浅海相硅质碎屑岩沉积拓展到海相碳酸盐岩沉积及海陆混合沉积,甚至发展到冰川沉积的层序地层学研究。如Davila Roberto对巴西潘雪拉盆地冰蚀谷充填的拉伯砂岩,对威斯特伐利亚阶( $C_2$ )/斯蒂芬阶( $C_3$ )进行层序地层学研究认为,冰积区的层序地层概念模型不同于一般的被动边缘盆地,主要区别在于冰积区海侵期具有很高的沉积供给和前积速率,而盆地中的主要退积作用和细粒物质沉积远离冰川中心。Camana等对阿尔卑斯、意大利撒丁岛、比利牛斯山脉、西班牙、瑞典和中国不同地质构造背景元古代到中生代的硅化萤石、重晶石、含硫化物岩层硅化和矿化碳酸盐岩宿主岩层的层序地层研究。

同时,根据对不同类型盆地、不同沉积类型的层序地层研究,相应形成了适合不同构造沉积背景盆地<sup>[14~18]</sup>、不同类型沉积的层序地层模式的“百花齐

放”之势。

### 3. 研究手段更新多样

从最初主要依靠地震、钻井资料发展到地震、钻井、测井、露头剖面、古生物组合及古生态、地球化学、成岩演化、磁性地层以及现代计算机技术等多种手段综合应用的新阶段,并开始实现宏观地质调查与微观测试分析、定性描述与定量刻画-模拟的充分结合,更加强调多学科交叉渗透与整合发展。

如利用地面穿透雷达(GPR)对巴西潘雪拉盆地 Vila Velha 砂岩中冰川河道舌形体进行三级沉积层序海侵体系域的内部组成分析,三维几何形态的描述(Marques 和 Edmundo, 2000);利用深度分辨率相当于 10 m 的 3-D 地震图象和测井资料进行四级高频层序体系域、层序边界和层序的识别与编图(Hongliu Zeng, 2001);用定量化的 FMI 图象 FMI 测井资料校正高分辨率层序地层图,标定了不同等级的沉积旋回,得出海侵期沉积较细、储层不发育,仅在海侵旋回的白云岩化部分发育高渗透率储层,而海退期沉积物较粗、发育高孔渗储层,尤其是海退的淋溶带发育高渗透率储层(Eberli, 2001);用碳酸盐岩碳、氧、锶稳定同位素定量测试手段(李儒峰等, 1996; 郑荣才等, 1997; 谢渊等, 2002)研究海相层序地层的形成演化,揭示稳定同位素组成变化与海平面升降、层序形成演化的关系<sup>[19]</sup>。

### 4. 研究精度极大提高

从最先主要研究三级层序发展到包括四-六级高频层序在内的多级别层序地层研究,并以高分辨地震、测井和精细露头层序地层学分析、高新测年技术等为依托,研究高频沉积旋回的成因与控制因素,对沉积演化史的刻画与层序地层的垂向演化及空间展布形态和样式的模拟再现更趋深刻与真实。

如 Koleva-Rekalova (2000) 研究保加利亚东北部 Cape Kaliacra 剖面萨尔马特阶 11m 厚的沉积由 6 个风暴层(碳酸盐岩暴风层)与微晶灰岩交互沉积的高频层序旋回,认为每个风暴层沉积从一个侵蚀面开始,侵蚀面上由风暴流高峰期块状滞留沉积组成(灰质砾石),向上很快变为风暴回流的最后阶段砂粒级鲕粒灰岩(交错层理),风暴层上部由正常气候下海侵时期的微晶灰岩退积层序盖住; Bachmann (2000) 研究了德国三叠纪干盐湖米级的砂岩-碳酸盐岩-页岩韵律旋回性沉积,认为海侵-海退或更好解释为气候潮湿-干旱变化形成的沉积旋回受 1 万年的米兰

科维奇气候周期变化的控制。

### 5. 生产应用要求提高及领域拓宽

初期主要为沉积盆地分析、储集体-烃源岩-盖层发育与分布的宏观预测等提供指导,现今已发展到为精细油藏描述、储集小层识别与对比,次生孔隙发育带预测、储层非均质性描述、岩性-地层型隐蔽油气藏<sup>[20]</sup>的勘探甚至油田开发生态模拟等多领域服务。从服务于油气勘探程度低的地区发展到为勘探程度高的油气开发区甚至油气老区的促产挖潜提供技术支持。从最初为油气勘探服务发展到服务于煤田等其它矿产<sup>[21]</sup>的勘探开发。层序地层学自 80 年代诞生以来,其进展除了表现在集中应用于研究地质背景和年代的拓展、层序沉积模式、矿产资源评价以及油气勘探等方面。

此外,还有学者对黑色页岩是海(湖)侵沉积的经典结论提出了疑义。Guzzo 等(2000)研究认为,湖泊相黑色页岩更有可能记录的是碎屑湖泊中低水位期间的沉积。因为根据包括瑞典下白垩统在内的全世界的湖泊相黑色页岩的描述,有一个共同的特点:均直接与含盐和低水深环境相联系,沉积中发育泥裂、蒸发岩、白云岩、燧石、叠层石,具碳酸盐岩氧同位素正偏移以及高盐度的生物地球化学标志。气候变干旱也同时减少了碎屑溶解的供给和底水的通风换气性,从而有利于有机质的聚集和保存。因此,气候变化所决定的底水氧化作用强度和水/沉积物的注入情况的变化,是控制湖泊小级别沉积旋回的主要因素,有机质的沉积是介于碎屑沉积作用和化学沉积作用之间的一种地质作用。

综上所述,近 20 年来,层序地层学理论的巨大发展及其在国内外油气勘探和地质研究等领域中的广泛而又有效的应用表明,它在许多方面明显优越于其它分支的地层学科:①沉积解释比其它地层学更加符合客观地质实际;②对生、储、盖层的时空展布具有更强的预测性和更高的预测精度;③更有助于在油气勘探成熟的盆地和新的油气勘探盆地中发现新的油层;④能帮助更为准确地计算盆地油气资源量和发现常规解释所遗漏的隐蔽油气圈闭及含油气远景区。正是由于层序地层学具有这些优越性,铸成了它旺盛的生命力,使它已经、正在并即将给地层学、沉积学及油气勘探等带来更具革命性的飞跃和发展<sup>[22]</sup>。

## 2 陆相层序地层学研究现状

陆相盆地层序地层研究作为层序地层学的一个主要方面,自二十世纪90年代以来,就成为了源于海相沉积研究发展起来的层序地层学发展史上的一大亮点。

而陆相湖盆与海相盆地相比,存在诸多的差异:

①湖盆具有物源多且近,沉降中心多且迁移性强,相带窄且变化快,水域面积小且变化大等特点(Shanley等,1994)。②除近海湖盆偶有“海泛”作用外,尚无资料表明湖盆中湖平面变化与全球海平面变化有任何关系(薛良清,1990),因此,一般湖盆的湖平面变化基本上不受全球海平面变化的影响。湖平面变化具有周期性和幕次性两种变化,其中湖平面的周期性变化与气候和季节的周期性变化有关,而幕式变化则主要由构造运动所致(解习农等,1995)。③湖盆规模小,内部构造分异大,沉积及沉降速率差异大,增加了沉积层序的复杂性和多样性。④断陷湖盆层序的形成与演化主要受控于区域性构造事件或幕式构造旋回,复杂的构造格局和幕式构造作用导致层序样式的多样性和层序构成的复杂性(解习农等,1995)。正因为二者存在这些差异,所以,最初人们怀疑,从研究浅海相盆地发展起来的传统层序地层学理论,能适用于陆相盆地吗?

对此,近些年来国内外许多会议和学者都作过努力探索。1991年在美国举行的NUNA会议,对层序地层学在陆相地层中的应用进行了专门探讨,认为经典的层序地层学原理和概念能有效地应用于陆相地层研究中,只要清楚而深刻地认识到层序地层原始模式是一种综合性概念,层序地层是受多种因素不同程度地影响、控制作用的叠加效应的产物,那么经典的层序地层学原理和概念就可以应用于不同构造沉积背景的地层划分对比与油气勘探预测之中。许多学者也认为,由于湖平面的变化对湖盆沉积作用的基本控制与相对海平面变化对浅海地层的控制极为相似(Shanley等,1994)<sup>[15]</sup>,所以,尽管湖相层序地层单元厚度比相应的海相单元薄,但是,源于浅海沉积研究发展起来的传统层序地层学的基本理论和方法能容易地用于湖泊沉积研究(薛良清,1990)<sup>[3]</sup>,而且湖盆构造运动的阶段性与气候变化的周期性在一定范围内的一致性也为层序的等时对比创造了可能(纪友亮等,1996)<sup>[17]</sup>;只不过陆相层序

的形成与演化更多地受到构造、气候的影响(Shanley等,1993; Van Wagoner, 1995; Aitken, 1996; Miall, 1996)。

目前,国外均已大规模地运用传统层序地层学理论和方法,开展陆相湖盆层序地层学研究。高分辨率层序地层学和成因层序地层学在陆相沉积研究中也得到了广泛应用。已初步建立了冲积地层(Shanley, 1992, 1993; McCabe, 1993; Wright Marriott, 1993; Olsen等, 1995; Van Wagoner, 1995)、风成沉积(Havholm和Kocurek, 1991)及湖相沉积(Johnson等, 1987; Dunkelman等, 1988; Scholz等, 1990; Xue和Galloway, 1993; Aigner等, 1996)等不同沉积类型的陆相盆地的层序地层模式,取得了很好的科研与应用成果。

我国在近20年,尤其是近10多年中,陆相层序地层学研究进展很大。先后引进并创造性地应用和发展了经典层序地层学、成因层序地层学及高分辨率层序地层学理论和方法,出版了大量颇具代表性的科学著作和论文《地震地层学》(徐怀大等, 1980),《陆相断陷盆地区域地震地层学研究》(张万选等, 1988),《应用层序地层学》(张宏逵等, 1990),《层序地层学原理 海平面变化分析》(徐怀大等, 1993),《层序地层学研究与应用》(刘宝璋等, 1994),《高分辨率层序地层学派的理论、方法及实用技术》(Cross, 1995; 邓宏文等, 1995),《层序地层学理论与研究方法》(陈洪德等, 1996),建立了断陷湖盆(魏魁生、徐怀大, 1993; 王东坡、刘立, 1994; 顾家裕, 1995; 纪友亮等, 1996; 姜在兴等, 1996; 赵省民等, 1997; 邓宏文等, 1997; 王洪亮等, 1997), 坳陷湖盆(王东坡和刘立, 1994; 顾家裕, 1995; 郑荣才等, 1996, 2000)等多种不同类型陆相盆地的层序地层模式,探讨了陆相层序地层形成演化的控制因素,并初步取得了较好的应用效果。在大庆、胜利等油田中,应用层序地层学、三维地震及储层评价等技术,在低位体系域砂体中发现了一大批隐蔽油气圈闭。

概而言之,近10多年来,国内外陆相层序地层学研究及应用的蓬勃发展表明,陆相层序地层学已经显现出其极强的科学性和有效的实践性。它为传统地层划分对比方法(放射性年代学法、生物地层学法、磁性地层学法、气候地层学法及岩性法等)长期面临的地层对比不等时、精度低等问题的解决,开辟了一种新的途径,为盆地分析、地层和沉积相空间展

布预测、盆地模拟等研究提供了新的技术支撑。为复杂陆相沉积盆地地层岩性隐蔽油气藏的勘探开拓了新的思路;为相变频繁的陆相沉积砂体的油气勘探、开发指明了方向。

### 3 陆相层序地层学面临的挑战

与其它地质学科一样,层序地层学也处于不断发展和完善之中。层序地层学理论自其问世以来,就存在一些颇具争议的难点,而目前研究尚不深入的陆相层序地层学,更是面临许多急待解决的问题:

#### 3.1 三大层序地层学理论体系在陆相盆地研究中均面临挑战

传统层序地层学是以不整合面及其与之可对比的整合面为层序边界,强调地层不整合面及与之可对比的整合界面的时间重要性,特别强调海平面变化对层序的控制作用;它在海相沉积研究中已经较为成熟。但在我国广泛分布的陆相盆地的积层序研究,它难以出色地解决诸如复杂多变的陆相层序到底具体受哪些因素、受到何种程度的控制一类的问题,尤其是在非湖相的陆相沉积(河流沉积、洪冲积沉积、风成沉积甚至火山沉积)中,更无法借用海/湖平面变化进行层序分析,因此它在一些方面还需深入探索。

成因层序地层学以最大水进面泥岩沉积作为层序边界,强调海(湖)平面从下降到上升所完成的进积-退积-加积作用形成一个完整的成因地层单元,层序内部具有向上变粗再变细的演化序列。由于最大水进面泥岩沉积在钻井岩心和测井剖面上易于识别,区域上展布稳定、厚度薄并具有极好的等时性,在湖相盆地中易于识别,能有效地应用于科研和生产实践;但它忽略了最大水退期发生的暴露侵蚀作用及其对砂体的成因控制,因而难以进行不同成因砂体的追踪与对比。同样在非湖相陆相沉积盆地(河流沉积、洪冲积沉积、风成沉积甚至火山沉积)研究中,它就显得无能为力。

成因层序地层学与传统层序地层学,在非湖相陆相层序研究中都面临着一个共同的重大问题—基准面的问题(徐怀大,1997),而已建立的陆相盆地地层基准面概念尚较薄弱(Shanley等,1994)。对此,Cross(1994)等进行了深入探索,他们引用并发展了Wheeler(1964)定义的基准面概念,提出了基准面旋回与成因地层层序形成的过程-响应原理,建立了以

成因层序为基础的高分辨率层序地层学。该理论除了应用于海相地层分析外,现已广泛应用于河湖相地层研究(Aigner等,1996;赵省民等,1997;邓宏文等,1997;郑荣才等,1996,2000)、储层预测(王洪亮等,1997)以及河流相储层模拟(Eschard等,1998)等方面。但它仍存在一些问题:层序划分对比的等时性还有待完善,难以识别和确定层序界面的性质及其相关的成因层序类型;尚难统一层序级别划分,从而难于实现大范围、区域上的层序地层对比;主要适用于钻井较多、范围不大的研究区,且对局部出现的自旋回事件考虑不够(徐怀大,1997)。

上述可见,三大层序地层学理论体系各有千秋,它们的应用领域各有一片天地。对于陆相湖盆沉积而言,尽管它受到海平面变化的影响是有限的(Shanley等,1994),但由于湖平面的变化对湖盆沉积作用的基本控制,在很大程度上类似于相对海平面变化对浅海地层的控制,经典层序地层学的理论、研究思路及方法能同样有效地应用于湖相沉积盆地研究中;目前,经典层序地层学仍是陆相湖盆层序地层学研究的一个主要流派。而对于非湖相的陆相河流沉积、风成沉积等,由于缺乏直观标志的湖平面特征,应用高分辨率层序地层学的地层基准面升降变化旋回进行层序地层分析就显得合理和可行。

#### 3.2 II型层序在陆相盆地中是否存在

II型层序在陆相盆地中是否存在,是一个长期存在争议的问题。一种观点认为,陆相盆地由于不大可能发育与海盆可类比的陆架坡折,因而不存在II型层序;另一种观点则提出,由于大型的内陆盆地一般存在较大规模的古地形坡折,因此可能发育II型层序,如徐怀大(1992)在松辽盆地和王英民等(2001)在准噶尔侏罗纪大型拗陷湖盆坡折带都识别出了II型层序。而目前对湖盆坡折带的认识分歧也较大,并主要集中于断陷型湖盆,对拗陷型湖盆研究甚少。因此,II型层序是否存在于陆相盆地,还需要进行深入探索。

#### 3.3 沉积体系域的识别、划分及名称需要统一

沉积体系域是“一套有成因和年代联系的同期沉积体系的组合……,每一体系域由在边界面之上的地层几何体与层序内的位置和内部低级层序的叠置型式而客观确定”(Posamentier,1988),它是构成层序的主要单元,包含有特征的地层、古生物及测井响应等信息,具有可预测的地层层序、展布形态及沉积

相组合,因而通过它的研究,能有效地预测生、储、盖层的分布。

而目前,陆相层序中沉积体系域的划分与命名真是“百家争鸣”。一些学者(Shanley 和 McCabe, 1994; Wright Marriott, 1993; Olsen 等, 1995; Van Wag-ner, 1995)在冲积地层层序中基本上沿用海相层序沉积体系域的三分法和名称术语;又有一些学者(Scholz 等, 1991, 1993; Hunt 等, 1992; 李思田等, 1992; Dag Nummedal, 1993; 王东坡等, 1994; 郭建华等, 1996; 王留奇等, 1996; 吴因业等, 1998)则把湖相层序划分为低水位体系域、湖进体系域、高水位体系域及下降(湖退)体系域;而 Xue Liangqing 和 Galloway (1993)按成因地层的观点,将松辽盆地白垩系湖相沉积层序,划分为低水位进积复合体系域、退积体系域和进积体系域;纪友亮等(1996)在断陷湖盆中,把层序划分为低水位体系域、湖泊扩展体系域、高水位体系域、湖泊收缩体系域及非湖泊体系域 5 种类型;岳文浙等(2000)在克拉通盆地研究中<sup>[23]</sup>,认为把层序二分为海侵(湖进)和高水位体系域较为合适;……。

笔者认为,在湖盆层序中,由于湖平面升降旋回是湖盆抬升-沉降、扩张-收缩、气候演变及沉积物供给等诸多因素综合作用的结果,湖平面升降变化具有直观、传统常用等特点,因此,在湖盆层序研究中,应该而且完全有条件把湖平面升降变化作为划分沉积体系域的重要依据,采用低水位体系域(暂把 I 型和 II 型层序发育之初形成的体系域均冠名为低水位体系域)、湖侵体系域及高水位体系域三分法较为直观、全面、方便及统一等众多优点。

### 3.4 确定层序边界、层序级次的难度大

目前,层序地层学的三大主要理论体系问题的焦点之一,就是层序界面和层序性质的确定、级别划分。

#### 1. 层序边界问题

层序作为一个完整的沉积旋回出现在地层学界已有 50 多年,但其边界问题却仍存在一些分歧:①以不整合面或与之可对比的整合面为层序边界(Vail 等, 1988);②把最大湖(海)泛面作为层序的边界(Galloway, 1992),具有分布范围广、沉积特征明显、易于追踪对比及可操作性强等特点;③以基准面下降到最低点的位置作为层序界面(Cross 等, 1994),它既可是沉积界面之上的相关整合面,也可

是沉积界面之下的不整合面或冲刷面。

笔者认为,在湖相沉积研究中,可以尽量考虑采用不整合面或与之可对比的整合界面而不是采用最大水进面作为层序边界来划分层序。这是因为:①尽管最大湖泛面沉积层是很好的标志层,但一个层序中最大湖泛面期的沉积会因沉积古地形条件的差异而形成不同类型的沉积物,而且深湖区沉积因远离物源而在层序的各个时期可能变化不大,因此以最大湖泛面沉积层作为层序边界进行全盆层序地层对比容易出现穿时现象;②一个层序的关键之处,在于其内部地层有无密切成因联系,而最大湖(海)泛面上下的沉积,在岩相古地理、地球化学、古生物、古生态等方面是相似的,以此作为层序边界则明显破坏了一个有密切成因联系的沉积旋回的完整性;③由于不整合面附近会出现包括沉积、地球化学、古生物、地震、测井等很多特征的响应,因此,以不整合面作为层序界面本身就具有良好的操作性;④不整合面之下常是一些前积式三角洲沉积砂体,表明不整合面对沉积储层的分布有着明显控制作用,因此,以此为层序边界能更好地了解储层的展布与含油气系统的特征;⑤尽管不整合面每一点的年龄可能都不相同,但对于一个层序沉积体所对应的时间段中绝对不会含杂其它年代的沉积地层,因此,不整合面是一个等时面,具有强的年代地层学意义。

而在非湖相的陆相沉积中,根据基准面旋回分析,把基准面下降到最低点的位置作为层序界面是切实可行的。

#### 2. 层序级次问题

关于陆相沉积层序级别的划分,目前方案颇多,具代表性的主要有:①传统层序地层学层序级次(Vail 等, 1991):巨层序( $> 50\text{Ma}$ )、超层序组( $27 \sim 40\text{Ma}$ )和超层序( $9 \sim 10\text{Ma}$ )、层序( $0.5 \sim 5\text{Ma}$ )、准层序( $0.05 \sim 0.5\text{Ma}$ )及小层序( $0.01 \sim 0.05\text{Ma}$ );②王鸿祯等(1998)层序级次划分:巨层序( $500 \sim 600\text{Ma}$ )、大层序( $60 \sim 120\text{Ma}$ )、中层序( $30 \sim 40\text{Ma}$ )和正层序组( $9 \sim 12\text{Ma}$ )、正层序( $2 \sim 5\text{Ma}$ )、亚层序( $0.1 \sim 0.4\text{Ma}$ )及小层序( $0.02 \sim 0.04\text{Ma}$ )<sup>[24]</sup>;③李思田等(1995),岳文浙(2000)提出陆相层序级次划分:充填层序、构造层序、层序、亚层序及小层序;④高分辨率层序级次(郑荣才, 2001):巨旋回( $30 \sim 100\text{Ma}$ )、超长期( $10 \sim 50\text{Ma}$ )、长期( $1.6 \sim 5.25\text{Ma}$ )、中期( $0.2 \sim 1\text{Ma}$ )、短期( $0.04 \sim 0.16\text{Ma}$ )及超短期( $0.02 \sim 0.04\text{Ma}$ )。

目前,在湖相沉积中应用颇多的层序级次划分仍是Vail等(1991)的层序级次划分方案。而对于非湖相陆相层序级次的划分方案明显需要进行统一规范,以便于对比研究。

### 3.5 陆相层序地层控制因素复杂、研究难度大

海相层序发育受海平面变化、构造沉降、物源供给及古气候四种主要因素不同程度的叠加控制作用,这种认识已经得到广泛认同。而这些因素的作用,在陆相层序形成与发育中仍然如此吗?研究表明,它们在控制陆相层序发育的重要性方面变得更加复杂,陆相层序受构造运动和气候的控制更加明显(Shanley等,1993; Van Wagoner, 1995; Aitken, 1996; 李思田等, 1995)。而陆相层序地层发育控制因素的复杂性,源于陆相沉积盆地本身具有物源多且近、沉降中心多且迁移性强、相带窄且变化快、湖盆规模和水域面积小且变化大、内部构造分异大、沉积及沉降速率差异大、区域性构造事件或幕式构造旋回复杂等特点。而且,不同构造沉积背景的陆相层序地层发育控制因素大不相同,不同级次的层序其控制因素的巨大差异性更是为控制因素研究“雪上添霜”,增大了难度。

目前,对陆相盆地一级、二级低频率层序的主要控制因素是构造作用的认识争议不大;一般研究较多的是三级层序的控制因素,但还存在一些分歧;而对四—六级层序的控制因素研究,因其要求高分辨率、高精度的资料,而研究程度较低,且争议颇大。

#### 1. 三级层序发育的控制因素

研究表明,陆相三级层序的形成演化同样受到构造沉降、物源供给、古气候及湖平面变化等因素的控制,但它们在控制层序发育的重要性方面存在差异,不同类型陆相盆地、不同类型沉积的层序的控制因素及其重要意义存在差别。

**构造作用的控制** 国内许多学者在断陷湖盆、裂谷盆地等盆地三级层序发育演化研究中,已经确定性地得出,构造升降是影响陆相湖盆层序演化的主要因素,它直接决定了盆地沉积可容空间的形成与消亡,构造的幕次性、周期性、脉动性直接控制了层序的多旋回性与层序内部发展演化的阶段性。而对于大型内陆拗陷湖盆而言,由于构造运动不强烈,且盆地范围构造活动强度的差异不显著,构造升降运动不明显的幕式性、周期性及脉动性,对层序的发育演化的控制作用仍是主要的吗?诸如此类的问

题,尚需要深入探索。因此,不同构造性质的陆相沉积盆地,构造对其层序地层形成演化的控制作用的重要性会发生变化,因此,必须具体认真盆地的构造沉积背景及演化。

**古气候的控制** 古气候是影响陆相层序发育的一个重要因素,已经很容易地得到人们的认可。其作用机理是通过影响物源和湖平面变化而产生的一系列效应来影响层序的发育与演化,它的周期性变迁决定着陆相层序中高频单元的发生、发展和定格。在湖相盆地中,气候湿热时期,湖平面较高,深湖水域宽,物源区以化学风化作用为主,细碎屑物为主,形成层序单元厚度不大,以加积-退积为特色;半湿热半干旱时期,物源区物理风化作用强烈,粗碎屑物源丰富,湖平面相对较低,湖水浅且湖域窄,进积-加积作用显著;可见,气候的旋回性变化极大地控制了三级层序的发育与演化,且对沉积物的供给、湖平面的升降也产生了重要影响。而在洪冲积、风成沉积、河流沉积中,气候的变化对三级层序的发育演化是更为直观而又明显。因此,在对不同类型沉积、不同构造沉积背景的层序控制因素研究中,还应更深入地具体分析气候因素控制的重要程度和意义。

**沉积物源供给的影响** 沉积物物源供给,对陆相盆地沉积可容空间的变化有重要影响。物源供给的充足和源区母岩的性质决定了层序中沉积岩石类型,并决定了层序内部沉积相的展布与叠置样式(加积式、进积式及退积式)。目前已经进入到综合利用多学科、多手段获得的资料进行物源及其供给变化的分析的新阶段,常常通过岩石重矿物组合和“ZTR”指数、岩性特征、岩屑组分、岩石粒度、砂体厚度展布、地层倾角测井、露头古水流方向等方法综合研究沉积物源性质和方向、物源供给速率与沉积物堆积速率变化等特征。但是,由于陆相盆地具有体积小、内部构造差异大、多物源、近物源、多沉积沉降中心等特点(Shanley等,1994),物源供给因受多次构造运动、气候变化而发生的频繁的变化。因此,陆相盆地中,物源及其供给情况的变化对层序地层的形成演化产生的影响是深刻的,又是复杂的,其控制作用的大小和强弱程度仍需要深入分析。

**湖平面变化和沉积基准面变化的控制** 海平面变化是控制海相层序地层发育的主要因素(Vail等,1977,1988)已为人们普遍接受,而相对湖平面变化是否是控制湖盆层序地层的主要因素,却尚存争议。

但已成共识的是,在湖相盆地中,湖平面大致相当于沉积基准面,相对湖平面变化与可容空间变化相当,相对湖平面的变化决定着水下可容空间的变化,湖平面变化是构造运动、气候及沉积物供给变化的综合反映,它直观地、直接地控制着湖相层序诸多几何学方面的特征和层序的发育演化。目前,常用泥质岩中 B、Sr、Ba、V、Ni、Co、Fe 等的微量、常量元素及其相关比值的大小变化,结合沉积学等方法,综合分析湖平面变化规律、古盐度、氧化还原条件、离岸距离、古水深、古水温、古气候等条件,识别层序和分析层序的形成,进一步分析湖平面对层序地层的控制关系。

而在洪冲积、风成沉积、河流沉积中,是利用基准面变化来研究三级层序的发育演化。而非湖相的陆相盆地中,基准面变化是受到构造沉降、沉积负荷、沉积通量及沉积古地形等众多因素综合制约的抽象界面的变化(Cross 等, 1994)。基准面变化的复杂性和抽象性,是陆相层序研究中存在的最大问题(徐怀大, 1997),因而是一个需要重点深入探索的领域。

因此,在对不同类型的陆相沉积、不同构造沉积背景的陆相层序控制因素研究中,还应更深入地具体分析基准面和湖平面变化对层序发育演化控制的重要程度和意义。

## 2. 高频层序发育的控制因素

研究表明,高频层序旋回的形成发育主要受自旋回沉积作用的控制。对于海相碳酸盐岩地层,由于四级及其以上的高频旋回常为自旋回,米兰科维奇气候旋回的影响最为明显,米兰科维奇地球轨道参数中的偏心率长周期(0.4Ma)、偏心率短周期(0.1Ma)和岁差周期(0.019~0.043Ma)分别控制了四级、五级、六级高频层序的发育。湖相盆地中,高频层序(准层序等)可以通过粒度、颜色、层理构造等岩性、电性的旋回特征得到反映,因此可直接利用岩性、电性特征实现精度为准层序级别的等时性地层对比;准层序的发育受控于相对湖平面、沉积速率及可容空间增加速率的变化,而湖平面变化是最本质的因素,它也受米兰科维奇气候周期的偏心率长周期决定。

但在非湖相的陆相地层,准层序一般是不可鉴别的(Aitken 等, 1995, 1996; Van Wagoner, 1995);高频层序的研究需要高分辨率的手段和资料、需要高精

度的定年技术作支撑;同时,陆相沉积中自旋回沉积作用(河流具有明显的自旋回沉积作用)是有限的,异旋回最为发育,而异旋回的控制机理更为复杂。因此,陆相高频层序及其控制因素的研究更是一个难点;陆相高频层序所面临的一个重大挑战是,能否采用一种能更完整的方法了解异旋回在陆相层序沉积中的控制作用(徐怀大, 1997)。

## 3.6 陆相层序地层学研究面临的其它问题

除了上述几个重大挑战外,当今陆相层序地层学研究还面临下列一些问题:

(1)层序地层研究成果还远未能满足生储盖层和隐蔽圈闭预测评价及油气系统研究的需要,建立的层序地层划分对比方案尚难以在生产与研究中有有效地应用和推广,层序名称纷繁众多,不便统一应用。

(2)等时层序格架建立较难,定年测试工作薄弱。

(3)目前国内对于断陷陆相盆地、前陆盆地的层序地层学研究已有不少成果,而对于大型内陆拗陷沉积盆地层序地层学研究不够深入。不同构造背景、不同类型陆相盆地层序地层模式建立的工作明显滞后,已建立的层序地层模式适用性脆弱,推广难度大。

(4)层序地层学定量研究和计算机模拟的研究工作进展缓慢。

总而言之,陆相层序地层学研究既是当今地学的一个国际性课题,又是一个争议颇大,需要深入探索的理论难点。或许也正是它面临着上述诸多挑战,预示着它的明天更加灿烂。那就让我们大家共同努力,迎接这一天的到来吧!

## 参考文献:

- [1] POSAMENTIER H W, ALLEN G P. Variability of the sequence stratigraphic model: Effects of local basin factors [J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 86(1): 91-109.
- [2] ALLEN G P, POSAMENTIER H W. Sequence stratigraphy and facies model of an incised valley-fill: the Gironde estuary, France [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1993, 63(3): 378-391.
- [3] 薛良清. 层序地层学在湖相盆地中的应用探讨 [J]. *石油勘探与开发*, 1990, 17(6): 29-34.
- [4] 薛良清. 成因层序地层学的回顾与展望 [J]. *沉积学报*, 2000, 18(3): 484-487.
- [5] 邓宏文, 等. 层序地层基准面的识别、对比技术及应用 [J]. *石油*

- 与天然气地质, 1996, 17(3): 177-183.
- [6] 邓宏文, 等. 沉积物体积分配原理—高分辨率层序地层学的理论基础[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 305-313.
- [7] 樊太亮, 等. 沉积基准面变化分析技术及其应用[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(2): 108-113.
- [8] 郑荣才, 等. 浅谈陆相盆地高分辨率层序地层研究[J]. 成都理工大学学报, 2000, 27(3): 241-244.
- [9] 王洪亮, 等. 地层基准面原理在湖相储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(2): 96-102.
- [10] AITKEN J F, FLINT S S. The application of high-resolution sequence stratigraphy to fluvial systems: A case study from the Upper Carboniferous Breathitt Group, eastern Kentucky, USA [J]. *Sedimentology*, 1995, 42(1): 3-30.
- [11] 曾允孚, 覃建雄. 沉积学发展现状与前瞻[J]. 成都理工大学学报, 1999, 26(1): 1-7.
- [12] 陆永潮, 等. 精确的定量和定年技术在高频层序地层研究中的重要性[J]. 地学前缘, 1999, 6(增刊): 28.
- [13] 刘宝瑁, 李文汉. 层序地层学研究与应用[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.
- [14] WEIMER R J. Developments in sequence stratigraphy: Foreland and cratonic basins [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(7): 965-982.
- [15] SHANLEY K W, MCCABE P J. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(4): 544-568.
- [16] 李思田, 林畅松, 解习农, 等. 大型陆相盆地层序地层学研究[J]. 地学前缘, 1995, 2(3-4): 133-136.
- [17] 纪友亮, 张世奇, 等. 陆相断陷湖盆层序地层学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [18] 胡受权, 等. 试论控制断陷湖盆陆相层序发育的影响因素[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 256-262.
- [19] 谢渊, 王剑, 罗建宁, 等. 羌塘盆地那底岗日地区中侏罗世层序地层与碳、氧、锶同位素响应[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 340-349.
- [20] 徐怀大. 寻找非构造油气藏的新思路[J]. 勘探家, 1996, 1(1): 43-47.
- [21] 王剑, 刘宝瑁, 等. 桂中北层控铅锌矿与海平面变化[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996.
- [22] 刘宝瑁, 王剑, 谢渊, 等. 当代沉积学发展现状与趋势[J]. 沉积与特提斯地质, 2002, 22(1): 1-6.
- [23] 岳文浙, 等. 陆相层序地层研究的思路[J]. 地质论评, 2000, 46(4): 347-354.
- [24] 王鸿祯, 史晓颖. 沉积层序及海平面旋回的分类级别——旋回周期的成因讨论[J]. 现代地质, 1998, 12(1): 1-16.

## Current advances and future aspects of continental sequence stratigraphy

XIE Yuan<sup>1, 2</sup>, LIU Jia-duo<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>, LUO Jian-ning<sup>2</sup>, LI Chun-yu<sup>3</sup>, WANG Sheng-nang<sup>3</sup>, WANG Hai<sup>3</sup>, LI Ming-hui<sup>2</sup>

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China; 3. Zhongyuan Bureau of Petroleum Exploration, Puyang, 470001, Henan, China)

**Abstract:** The sequence stratigraphy has undergone three stages of development since the last decades of years. The last decade, however, has seen a remarkable advance in the development of continental sequence stratigraphy. The continental lacustrine basins are quite variable in character compared with marine basins, in that: (1) they have polyphyletic origins of sediments. The depocentres and facies zones tend to be highly variable. (2) Generally speaking, the base levels of lake basins have changed in response to climates rather than eustatic fluctuations. (3) The vast discrepancies in internal structural differentiation and depositional and subsidence rates allow the sedimentary sequences to be more complicated. (4) The lacustrine sequences in faulted basins are primarily constrained by regional tectonic and episodic events. For these reasons, the continental sequence stratigraphy is probably one of the most actively studied in the world. This brief review paper gives in detail the insights from recent developments within the research on the sequence stratigraphy, especially the continental sequence stratigraphy, and future aspects for the better resolution of the future research and oil and gas exploration.

**Key words:** continental sequence stratigraphy; development stage; oil and gas exploration; challenge