

文章编号: 1000-0550(2009)05-0849-14

沉积盆地的层序和沉积充填结构及过程响应¹

林畅松

(中国地质大学 北京 100083)

摘要 现代层序地层学的理论发展,把沉积过程纳入到地质演化的时空框架中并与地球的多旋回或节律演化结合研究,形成了一套带有革命性的、在等时地层格架中研究沉积作用的新方法,成为了油气资源等沉积矿产预测勘探的重要工具。沉积盆地的沉积充填可划分出与各级沉积旋回相对应的层序地层单元。追踪对比由不整合面或不整合面及其对应的整合面为界的高级别层序地层单元建立的区域性等时地层格架,对盆地构造古地理再造和油气勘探战略性研究至关重要;追踪四、五级等低级别层序地层单元和体系域建立的高精度层序地层格架,可为重点区域或区带的沉积体系和储集体的沉积构成和分布等的解剖提供精细的地层对比基础。依据沉积基准面的变化,从层序内水进到水退的沉积旋回中可划分出正常水退沉积、强制性水退沉积、水进沉积及垂向加积等成因沉积类型。海相或湖相盆地中三级层序地层单元内均可较好地划分出低位、水进、高位及下降体系域。

盆地构造作用、气候变化、海、湖平面升降过程对层序发育的控制作用及沉积响应研究,一直是层序地层学或沉积地质分析领域的研究热点。沉积盆地的层序地层序列演化是盆地地球动力学过程的总体响应。层序地层学把盆地古构造、古地理的变迁纳入到统一的地球演化系统中研究,形成了与区域地球演化史或盆地动力学演化相结合的重要研究领域。多旋回盆地或叠合盆地中多期次的构造变革导致了多个区域性不整合面所分隔的多个构造层序的叠加。注重构造—层序地层的结合分析,揭示盆地的层序地层序列与多期盆地构造作用的成因联系,是构造活动盆地或大型叠合盆地沉积地质演化和油气聚集规律研究的关键。盆地构造作用,如前陆盆地多期次的逆冲挠曲沉降和回弹隆起的构造作用、多幕裂陷过程、多期构造反转等与重要不整合及区域性沉积旋回或层序的形成密切相关;而由气候变化引起的海或湖平面变化是控制高频沉积旋回或低级别层序发育的主要因素。在构造活动盆地中,构造坡折带对沉积体系域和沉积相的发育分布具重要控制作用。

关键词 层序结构 成因沉积类型 控制因素 沉积盆地

作者简介 林畅松 男 1958 年出生 沉积地质与盆地分析 E-mail Linc@cugb.edu.cn

中图分类号 P512.2 P539.2 **文献标识码** A

0 引言

从层序地层学的兴起至今,已经历 30 多年的发展,源于被动大陆边缘盆地研究的层序地层学理论得到了不断的丰富、拓延和发展^[1~5]。一方面,层序地层学的概念与生物地层学、沉积学及盆地构造分析等学科的结合,形成了适用于各种盆地建立等时地层格架,并在等时地层框架内进行沉积充填分析及资源预测的重要理论和方法。近二、三十年来,层序地层学在国际上各国的油气勘探中得到了广泛的应用,产生了巨大的经济效益。另一方面,层序地层学把沉积过程纳入到盆地地质演化的时空框架中加以研究,把沉积演化与地球节律变化结合起来,在更为精确的时空格架上研究古构造和古地理的演化,促进了人们对盆地沉积结构及其成因的系统探索。高分辨率地球物

理资料的获取、高精密测试分析技术的广泛应用,使这一领域的研究不断取得新的进展和突破。

层序地层学理论在 20 世纪 80 年代末引入我国后,在多种构造背景盆地的沉积地质分析中得到了广泛的应用。我国诸多重要的沉积盆地都显示出构造、古地理背景的复杂性。近年来大量的系统性研究,重视了盆地各种构造作用对层序结构和发育演化控制的成因分析,在我国东部陆相断陷盆地、中西部大型叠合盆地等的层序地层学研究中,不断获得理论上的创新,并在指导油气勘探实践上取得了一系列重要突破^[6~10]。

本文的目的是结合作者多年的研究成果,对沉积盆地层序地层系列、沉积成因类型和沉积体系域的构成样式及其对构造作用等的过程响应的分析思路和方法,为盆地的层序地层学研究的深化及油气藏预测

¹ 国家自然科学基金项目(批准号:40772075)和国家重点基础研究发展规划项目(批准号:2006cb202302)资助。

收稿日期:2009-09-03

提供启示。

1 层序地层序列与盆地的等时地层格架

层序地层学理论的核心,是提出了一种划分、对比和分析重复出现的、在成因上有联系的层序地层单元的新方法。这些层序地层单元是由与构造升降、海或湖平面变化等有关的沉积基准面变化所形成的不连续面及其对应的整合面为界。沉积基准面的变化主要表现在相对海平面或湖平面变化、河流下切底面等的变化上,并可通过地震剖面上反射不连续性、测井及露头剖面上沉积相的叠置方式和变化等加以识别。

盆地的沉积充填序列是由一系列不同规模或级别的沉积旋回所组成的。我们把与各级沉积旋回对应所划分出的地层单元,称为层序地层单元^[11]。这种界定使层序的划分与盆地的沉积演化序列有较好的对应。在进行层序地层单元的划分时,不可避免地要涉及到层序地层单元的级次问题,尽管这一问题一直存在争议并难以对其作出唯一的界定。许多学者都提出过有关层序级别及其时限的划分方案^[1,2,7]。但各种方案在各级层序的时限范围上是很不统一的,而在层序界面的物理特征和识别标志方面则相对一致。从我国各种构造背景下发育的海相或陆相盆地的沉积序列中,一般都可划分出五个级别具有地层对比意义的层序地层单元(表 1)。这与 Vail 等最早以被动大陆边缘盆地中识别的各级海平面变化周期所划分出的巨层序、超层序、层序、准层序组及准层序等五级的地层单元相对应。至于更小级别的沉积旋回不易作为层序地层单位,它们基本上不具有地层对比

意义。

1.1 高级别层序地层单元与区域性等时地层格架

高级别的层序地层单元是指以不整合面或不整合面及其对应的整合面为界的地层单元。一般包括一至三级,层序不整合界面的分布范围、界面上下的地层接触关系、所限定地层的大体时限及沉积结构等可作为层序级别进一步界定的依据。一般而言,三级的层序地层单元在盆内是基本可以追踪的,是建立盆地层序地层格架的基本地层单位。三级层序地层单元是由不整合(盆地的边缘或隆起带)及其对应的整合面(盆地中部)所限定的一个较完整的沉积旋回所组成,其内可较好地划分出低位、水进及高位体系域。

经历过多期构造变革的大型盆地或叠合盆地中,沉积充填序列中层序地层单元的级别是相对明显的,因而盆地的等时地层格架需要从不同尺度上加以研究(图 1)。在这些盆地中由重要不整合面所限定的高级次层序(一、二级或部分三级)一般属构造层序,在盆地中跨不同构造带可以追踪,包括在古隆起、古斜坡及拗陷带上的追踪对比。有些可能具有全球或类全球对比意义。通过跨盆地不同构造单元的大格架剖面的构造—层序综合解释,追踪这些层序地层单元建立的盆地区域性层序地层格架,对揭示盆地的地质结构或构造—地层格架的基本特征极其重要,可为盆地构造古地理再造和油气勘探战略性研究提供宏观的等时地层对比基础。大型叠合盆地构造古地理的再造,往往以一、二级层序地层单元为基本的编图单位。这种尺度的地层格架与生物地层学、放射性地层学等年代地层学的结合分析,可建立等时的年代地层对比框架。

表 1 层序地层单元的级次和时限

Table 1 The orders and time limitation of sequence stratigraphy unit

层序地层单元	层序界面特征	地质含意和层序结构	时间跨度 M_a
一级	盆地范围内可追踪对比的角度或微角度不整合面	盆地或单一原型盆地从形成到衰亡的整体沉积序列。	> 40 ~ 60
二级	盆地较大范围内可追踪的角度或微角度不整合面、区域性沉积间断面,沿界面发育规模较大的下切谷充填或底砾岩层。	由与区域构造或盆地构造作用有关的区域性沉积旋回构成(幕式构造作用、区域应力场转化等);	10 ~ 50
三级	由局部(盆地边缘)不整合和与其对应的整合面所限定。界面具有冲刷下切的水道砂砾岩或下切谷沉积、沉积体系叠置样式的转化或沉积环境的突变。	由盆内三级的沉积旋回所构成。与盆内构造作用、海或湖平面变化或沉积基准面等周期性变化有关,包括气候引起的湖平面变化、基底差异沉降、同沉积构造活动等。	1 ~ 10
四级	由海泛面、湖(洪)泛面;或局部的侵蚀面及其对应的整合面为界面	由盆内四级的沉积旋回所构成,主要与海或湖平面或沉积基准面变化有关。	0.08 ~ 1.0
五级	由海泛面、湖(洪)泛面为界,主要以较深水的泥质沉积层为标志,界面上可发育水进期的海或湖侵形成的内碎屑泥砾沉积。	由盆内五级的沉积旋回所构成,主要与海、湖平面或沉积基准面变化、物源供给变化有关。	0.03 ~ 0.08

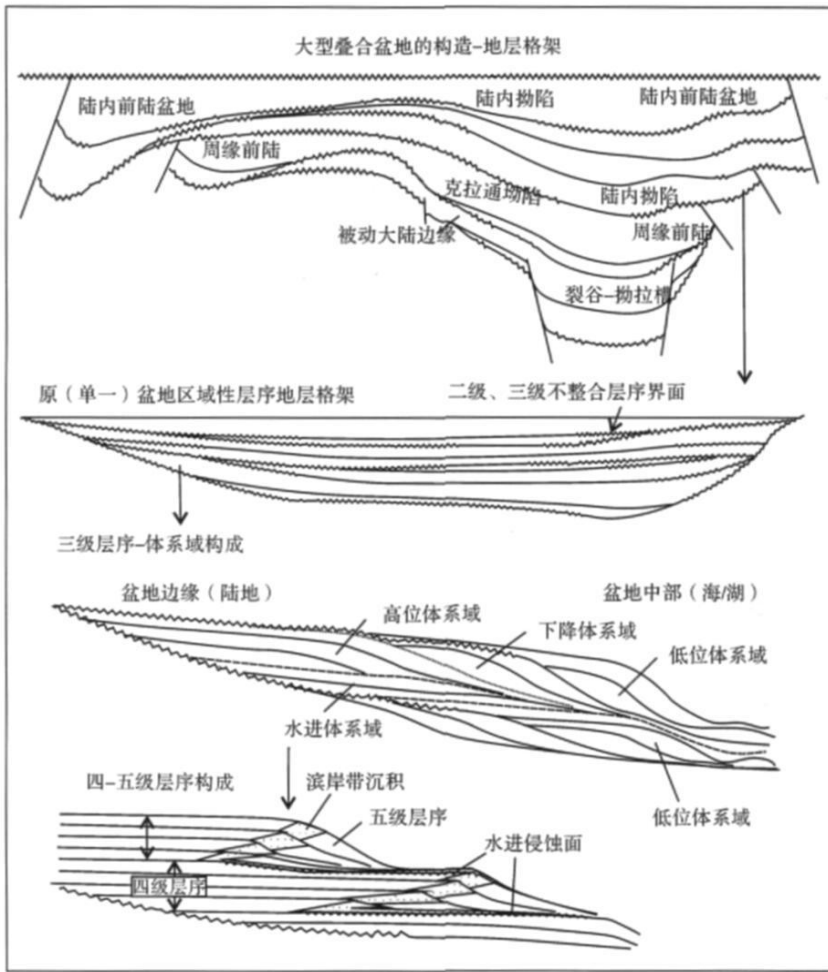


图 1 大型构造活动盆地或叠合盆地的层序地层格架 (塔里木盆地为例), 示意不同尺度的地层格架样式
 Fig 1 Sequence stratigraphic framework of large scale tectonic active basin or superimposed basin (Tarim basin in China), showing the hierarchy of the sequence stratigraphic architecture

1.2 低级别层序地层单元与高精度的层序地层格架

低级别的层序地层单元是指三级以下的各级层序地层单元,由高频的沉积旋回组成,主要是依据水进面或水进-水退转换面等划分和追踪对比的。以三级层序内四、五级等低级别的层序地层单元和体系域为地层单元可建立高精度的层序地层格架^[3 12]。在盆地重要的区域或区带建立这种精细的地层对比格架,可为沉积体系和沉积相以及储集体等的分布和构成特征的深入研究提供重要基础。比如,以四、五级层序地层单元进行沉积相分布编图,揭示精细的沉积环境和沉积相的构成特征,对重点区块储集砂体的沉积构成和储层不均一性的研究具有重要意义。高精度层序地层格架的建立需要依赖于测井、露头、岩芯等资料的综合分析,特别是高分辨三维地震资料和密集的钻井控制。

四级层序地层单元一般包含若干个五级层序地层单元,后者大体与准层序相对应。在海或湖盆沉积序列中,四级层序地层单元一般显示出从进积到退积的沉积结构,代表碎屑体系一次较明显的推进到衰退、最后水进的沉积幕。五级层序地层单元代表一次单一的进积到退积的沉积体。退积或水进期沉积层一般很薄或表现为无沉积作用面,或为水进的弱侵蚀面。这种高频的沉积幕或沉积周期受控于海或湖平面或气候等的周期变化。部分可能是河流改道或三角洲废弃等沉积“自旋回”的产物。

四级层序地层单元的识别和追踪对比是建立高精度层序地层格架的关键。目前国内外关于四级层序的定义和划分方案还没有十分明确。这里所划分的四级层序地层单元,主要是指三级层序格架内次一级的简单的水进-水退沉积所组成的沉积旋回,其内

至少包含两个或两个以上的五级层序地层单元(准层序)。在滨岸带,四级层序地层单元的分界面位于主要的水进界面、或从水进到水退沉积(或加积)的转换界面上。在河流或浊积体系中,四级层序总体是向上变细的,底界为河道的冲刷面或泛滥平原沉积顶部的暴露面等。

在我国鄂尔多斯西缘古生代太原组的陆表海含煤岩系中,低级别层序地层单元的沉积旋回结构清晰,分布稳定,四级层序易于识别并可在大范围内追踪^[13]。这些四级层序由下向上从前三角洲或间湾泥岩、向上过渡为三角洲前缘砂坝或水下分流河道砂体、三角洲平原及泥岩沼泽等沉积,随后出现海进形成的生物扰动层、薄层席状砂,到灰岩、泥灰岩、海相泥岩沉积,具有从进积到加积和退积的沉积结构。在我国第三纪丽水近海盆地中,识别出的四级旋回也由总体向上变粗的三角洲沉积所组成,四级旋回的主要海泛面分布稳定,以形成富含微体化石的海相暗色泥岩为特征^[11]。

在陆相盆地中,特别是碎屑湖盆沉积序列中,三级层序内的四级沉积旋回发育,分布也相对稳定。如在库车凹陷古近系露头剖面 and 依据密集的测井资料分析都可识别出由河流和三角洲、滨浅湖沉积所组成的四级层序,并在拗陷大部分区域可以进行追踪对比(图 2)。湖泛泥岩段和河流、三角洲沉积相序的结构变化是划分这些层序单元的主要依据。在深湖盆背景下,发育有由湖底扇或浊积砂质沉积所构成的四级层序。在渤海湾盆地沾化凹陷古近系沙三段沿断裂坡折带发育的湖底扇浊积沉积中,具有明显的四级、五级的沉积旋回结构,其中的四级旋回在洼陷带内是可以追踪对比的。在渤中拗陷的东营组中,广泛发育有由湖底扇和三角洲沉积构成的四级层序。这些四级层序的湖泛泥岩段和浊积砂岩或三角洲前缘砂质沉积构成了主要岩性圈闭的储、盖层。

碳酸盐岩台地沉积序列中高频的四、五级的旋回一般是很发育的^[14]。在塔里木盆地奥陶系良里塔格组碳酸盐台地边缘沉积序列中,识别出多个高频的沉积旋回或四级层序,其沉积相序由下而上从灰泥丘的泥晶灰岩、藻礁的藻粘结岩、生物骨架礁灰岩和鲕粒滩或生屑滩颗粒灰岩、亮晶粒屑灰岩等。这种高频的层序地层单元主要是由向上变浅的台地边缘碳酸盐岩沉积组成的,追踪对比的主要界面是顶部的、与生物礁共生的鲕粒滩或生屑滩沉积与上覆水进沉积的泥晶灰岩或泥质岩的分界面,有时存在暴露面或准同

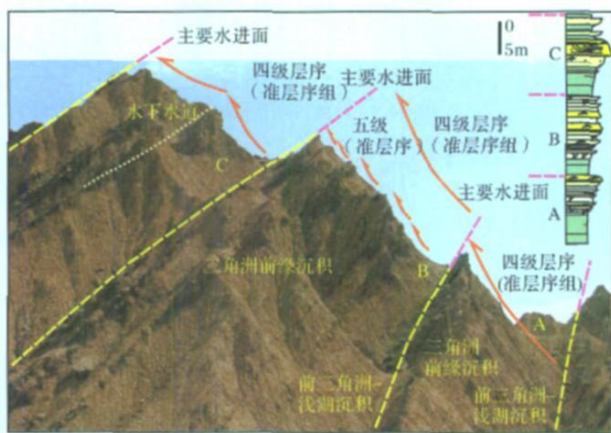


图 2 库车拗陷北缘露头剖面古近系苏维依组四级层序地层单元划分

Fig 2 The classification of the fourth order sequences of the Eocene Shuweiyi Formation in the outcrop along the northern margin of the Kuqa Depression

生期岩溶面。这些单元的分布和组合关系反映了碳酸盐岩台地的沉积结构特征,建立这级层序的对比格架可揭示礁、滩相和准同生期岩溶层的分布(图 3)。

2 层序地层界面、沉积体系域与成因沉积类型

2.1 层序地层单元的界面类型

盆地沉积充填中各种成因地层单元的识别和划分主要是依据两类基本的物理界面:一类是在沉积基准面(海、湖平面)下降期形成的剥蚀面或水退面,如陆上剥蚀不整合界面或沉积间断面、暴露面、强制性水退顶部的退覆不整合面和底部的水下剥蚀面等。另一类是代表沉积基准面上升时形成的水进(海或湖泛)面,如海(湖)泛面、高级别沉积旋回中的最大水进界面、从水退转向水进沉积的初始水进界面、水进时的海(湖)侵蚀面、岸线上超面等。这些界面的识别需要综合地质、地球物理及地球化学等资料分析。地层单元的终止接触关系,如削蚀、退覆、顶超、上超、下超或底超等接触关系是地震剖面上或宏观露头剖面上识别上述界面的重要标志。

如何选择这些界面划分不同级别的沉积旋回或层序正是出现不同学派、或称不同层序地层模式的差异所在(图 4)。由 Exxon 公司的研究者提出的所谓经典的层序地层学,是以不整合面或不整合及其对应的整合面来划分高级别层序的,层序内的体系域、准层序组、准层序等低级别的层序地层单元则以各种水

进界面为界。由 Galloway 等提出的“成因地层层序”是以海侵面来划分“沉积幕”和“沉积事件”等地层单元的^[15]。Embry 提出以初始水进界面为界划分海进—海退旋回^[16]；而 Cross 提出的高分辨率层序地层

划分方法则以不整合或水退界面划分长周期、中周期及短周期层序单元^[17]。事实上, 学派之争不是重要的, 关键是认识不同物理界面的性质并正确进行追踪对比, 以建立可靠的等时地层对比格架。

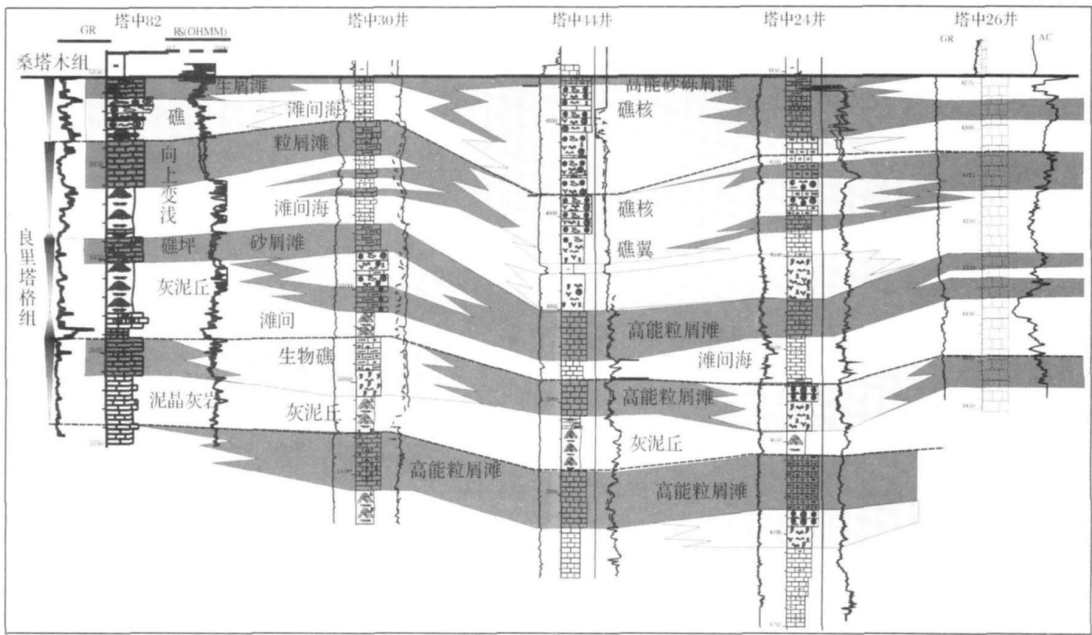


图3 塔里木盆地塔中良里塔格组中上部高精度层序格架

Fig. 3 The high resolution sequence framework of the upper part of the Lianglitage Formation in Tarim Basin

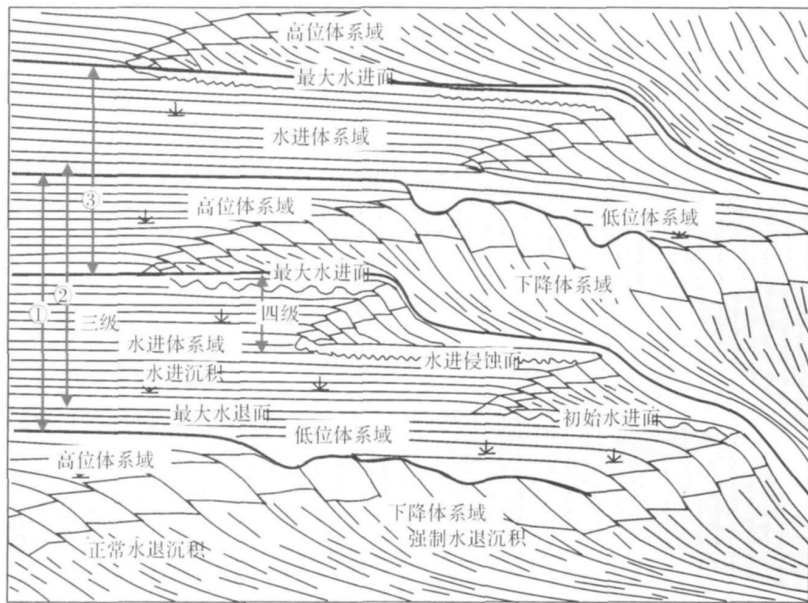


图4 盆地沉积充填中的主要物理界面及不同的层序划分方法

(①Exxon 层序;②Embry 的 T-R 旋回;③Galloway 的沉积幕)

Fig. 4 The sequence stratigraphic surfaces and different classification of sequence models

(①Exxon' model; ②Embry' T-R cycles; ③Galloway' depositional episodes)

陆上剥蚀不整合面是在沉积基准面下降时由地 表作用, 如河流侵蚀、风蚀、风化及土壤作用等形成的

地层不整合面或间断面。陆上剥蚀不整合面随着强制性水退过程不断向盆地扩展,直至强制水退过程的停止达到最大的分布范围。剥蚀不整合面在横向上可过渡到强制性水退形成的退覆面、沉积转换面或整合面。剥蚀不整合界面下、上地层往往存在缺失,界面上可观察到剥蚀残积底砂砾岩、古土壤层、风化淋滤现象等。在地下地震剖面上则表现为下切侵蚀、削截、退覆、上超等接触关系。

强制性水退面包括强制性水退沉积的顶界面和底界面^[5]。强制性水退沉积的顶界面是典型的退覆不整合面。在地震剖面上这种接触关系是较容易识别的。当沉积基准面下降时,进积倾斜层的退覆是呈下降式的,因而进积沉积的高度(厚度)向盆地方向不断变薄。但由于沉积基准面进一步下降的削蚀作用,或随后的水进侵蚀作用,这一界面有时没有得到保存。强制性水退沉积的底界面是强制性水退时水下沉积(进积倾斜层)的底界面,是分隔强制性水退沉积与高位域或更老的沉积层的界面。这一界面一般属整合面。在地震剖面上,这一界面位于具有退覆顶面的前积沉积的底超界面上。沉积基准面的下降会导致浪基面的下降,强制性水退沉积的底界常表现为水下的海(湖)浪蚀面。事实上,沉积基准面的开始下降可导致多种水下侵蚀作用。如滨岸的浪蚀作用、三角洲前缘的水下水道的冲刷作用以及潮下带潮道的下切侵蚀等,使临滨—三角洲前缘近端沉积上覆于前三角洲—远岸沉积之上,沉积相发生突变。

水退到水进沉积的转换面主要是指在相对连续的沉积旋回中从水退或加积(少数情况)沉积到水进沉积之间的转换面。这一界面也是从水退到水进沉积之前的最大水退界面,或从水退到水进的初始水进面。在层序地层模式中,低位体系域顶界面的最大水退界面或初始水进面构成与上覆水进体系域的分界面。在陆上环境中,这种转换界面的识别是相对困难的。由于沉积基准面的上升,可容纳空间增加,河流体系类型可能发育明显的变化。如从辫状河体系向上演化为曲流河体系的转换面,可以与滨岸带由河流或滨岸平原向上过渡为滨海或滨湖沉积的转换对比。在深水盆地地区,这种界面一般是不易识别的。在深水浊积体系中,物源的供给量可能会发生变化,从而导致沉积粒度的变化和扇体的后退。值得指出,由于横向上的沉积物供给变化和构造沉降差异,这种界面有时是明显穿时的。

水进(海、湖泛)面是划分体系域、四、五级层序

地层单元的重要界面。水进面应具有水深突然增加或沉积基准面突然上升的地质证据,包括沉积相变化、古生物组合、古生态变化以及沉积地球化学等的标志。水进通常与弱的水下侵蚀作用、小的间断面或无沉积作用相伴生。水进时波浪、水下水道、潮道的侵蚀形成的水进面又称水进(海、湖)侵蚀面。水进面一般不会出现上覆地层的上超,除非这个面与层序边界相重合。在岸上或陆地环境中,应存在一个与水进面对比的界面。如洪泛面、河流的废弃或因河流作用和弱的陆上暴露引起的局部侵蚀等为标志^[3]。局部的古土壤层、泥炭沼泽层或煤层也可作为对标的标志。这些可对比面通常只能通过水进面向上游或下游方向的对比加以证实。

最大水进(海、湖泛)面是指在一个沉积旋回中水进达到最大的水进面,标志着一个沉积旋回水进的终止。因此,最大水进面也是一种沉积转换面,分隔水进沉积与水退沉积。界面上覆的前积层往往下超于这一界面上,在地震剖面上识别最大水进面的一个标志是高位体系域前积层底的所谓的下超面。最大水进面一般位于最大水进期形成的凝缩层的中部。凝缩层主要以深水的细粒沉积所组成,富含有机质并分布广泛。最大水进面一般是整合的,穿时性小,是进行层序追踪对比时的重要标志。

2.2 沉积体系域及相关概念

沉积体系和沉积体系域的概念是早在 20 世纪 60 至 70 年代提出的。沉积体系是指在成因上有联系的、与特定沉积过程有关的沉积相的三维组合。沉积体系域则是指同一时期发育的一系列在成因上有联系的沉积体系的组合^[18]。因此,沉积体系域可理解为等时地层单元内所有沉积体系的组合。但原始的沉积体系域概念中是没有特定的时空内涵的。在经典的层序地层模式中,一个发育完整的层序或沉积旋回,可依据最大水进面和初始水进面划分出高位、水进及低位体系域(图 4)。高位体系域中有时依据强制性水退面可进一步划分出下降体系域^[19]。事实上,层序地层格架中的沉积体系域代表了一个沉积旋回中不同沉积基准面演化阶段的沉积体系组合。沉积体系域的发育和分布直接与沉积基准面、沉积速率及可容纳空间的变化有关。值得指出,对沉积体系域的沉积相构成的研究是层序地层学研究的重要内容,对层序内生、储、盖配置关系和分布的预测至关重要。这也是进行体系域划分的主要目的。

在河流沉积剖面中,依据沉积基准面变化划分沉

积体系域有时是困难的。一种划分方法是依据可容纳空间的变化和河流体系的叠置结构进行划分。一般可划分出高可容纳空间和低可容纳空间两种沉积体系域^[5]。低可容纳空间体系域以发育多层叠置的河道砂体和缺少泛滥盆地沉积为特征。沉积体系的分布受到古地形或古地貌的制约,并主要充填于下切河谷内或低地形带,上覆于不整合层序界面之上。在横向上这些砂体复合连片,形成复合河道砂岩带,具有辫状河流体系的沉积特征。这些沉积相当于低位体系域或早期水进体系域。高可容纳空间体系域主要由厚的细粒越岸泛滥盆地沉积和分散的单一河道砂体组成,以垂向加积过程为主,沉积体的分布受到下伏地形或构造影响小。因此,河流体系中的高可容纳空间体系域相当于水进和高位体系域。

湖盆层序中沉积体系域的划分可依据湖泛面和碎屑体系的进退演化等进行划分。一个完整的湖泊

沉积层序同样可划分出高位、水进及低位体系域^[11]。在一些发育有较深湖环境的盆地中,在高水位晚期也可识别出下降体系域。但湖盆中的物源方向多变,沉积相构成复杂,沉积厚度变化大,受地形、地貌及局部构造影响明显。在盆地形成演化过程中构造古地理常常发生过重大变化,其沉积基准面或湖平面的变化与沉积体系域的组成和分布等都比海相被动大陆边缘盆地要复杂得多。

在构造较活动的盆地中,由于古构造、古地形的变化形成对沉积体系具有重要控制作用的构造坡折带,构成深湖与浅湖过渡带的洼陷边缘坡折,控制着低水位域分布(图 5)。研究表明,构造坡折带包括多种成因类型,如断陷盆地中明显活动的同沉积断裂常常形成断裂坡折带,前陆盆地中造山冲断带与前渊过渡带的隐伏逆冲断层可形成挠曲型的构造坡折带,对盆地的沉积地貌和沉积体系域起重要控制作用。

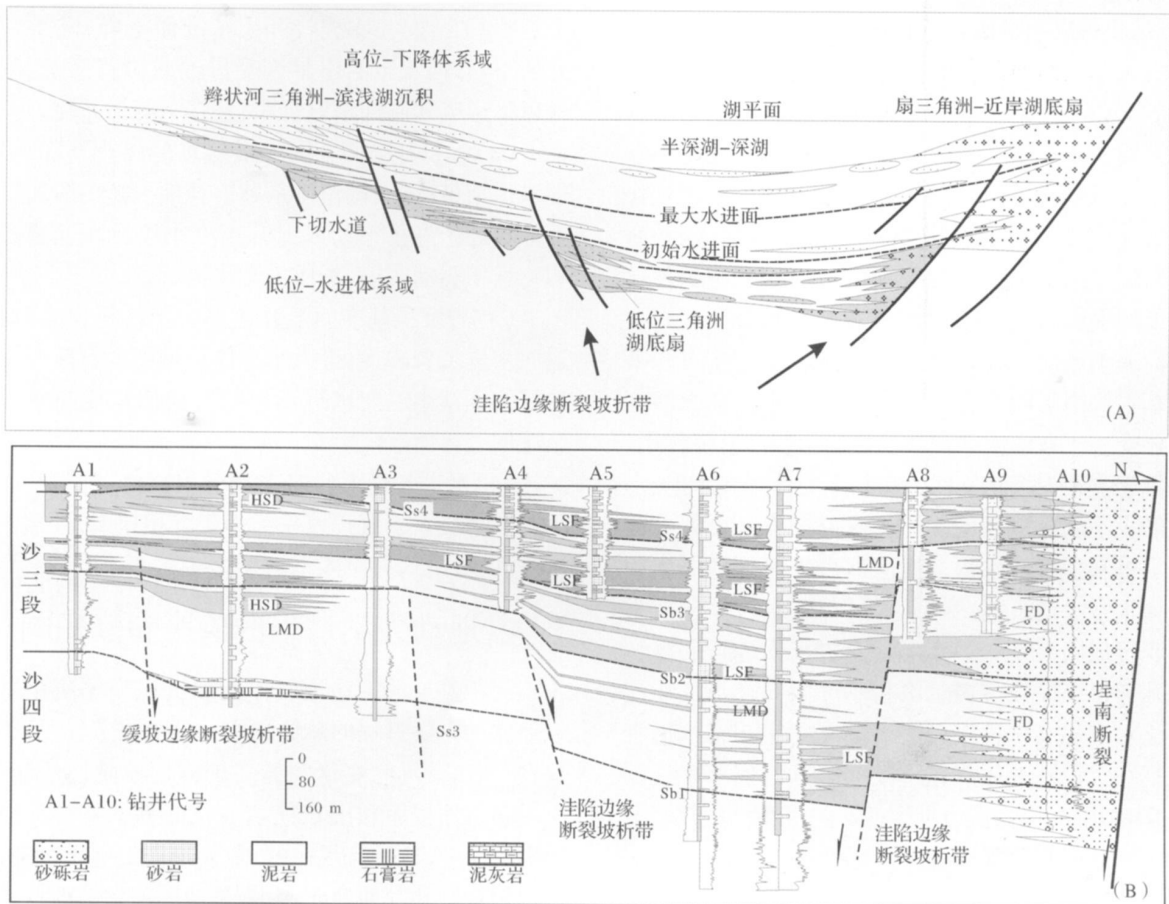


图 5 断陷湖盆的层序构成模式(A)和连井剖面显示的断裂构造坡折带(B)
 A. 断陷湖盆的层序构成模式; B. 过渤海湾盆地沾化凹陷沙河街组沙三、沙四段连井沉积剖面
 Fig. 5 Sequence architecture of faulted lacustrine basin (A) and a well cross section showing the faulted slope-break zone in the Zhanghua Depression (B) in the Bohaiwan Basin

由于湖盆的构造古地理背景是不断变化的,不同演化阶段沉积体系域的沉积体系构成是不同的。从

湖盆的构造古地理演化上,一般可划分出早期的冲积—浅湖盆、中期的半深湖—深湖盆、到晚期冲积—浅湖盆型等沉积层序类型,不同湖盆层序的沉积体系域的沉积体系组成和分布显著不同。比如,深湖盆层序低水位期的下切河道在盆地边缘构造坡折带以上区域发育。沿坡折带下倾方发育的低位体系域包括低位三角洲、湖底扇及半深湖、深湖细粒等沉积组合。下切水道成为这些低位域的物源供给通道。下切谷主要发育于相对缓的斜坡带。在洼陷中部,可发育轴向的浊积体系,并常常沿同沉积断裂等古构造形成的构造低地分布。高位体系域发育有相对深水的扇三角洲或河流三角洲,与前三角洲滑塌浊积,滨浅湖、深湖沉积等共生。浅湖与半深湖交替的湖盆层序中,高水位体系域发育陡岸扇三角洲、湖底浊积、缓坡湖岸三角洲等沉积;低位体系域则由冲积河流、下切谷水道和浅湖沉积为主体。

2.3 沉积基准面旋回与沉积成因类型

沉积基准面的概念由来已久,人们很早就认识到河流的下切存在一个平衡界面,称为沉积基准面。沉积基准面是一个动态平衡面,在沉积基准面之上不发生沉积作用或遭受剥蚀,沉积基准面之下发生沉积作用。从全球尺度上,沉积基准面是陆地剥蚀作用和海洋加积作用趋向于达到的平衡面。从陆上冲积环境到海或湖平面,沉积基准面一般从高到低逐渐递降到海平面或湖平面。因此,在海洋或湖泊盆地中沉积基准面基本等同于海平面或湖平面。沉积基准面的变化主要受控于在海或湖平面变化和构造的升降作用。

沉积盆地中沉积旋回的变化主要体现在水退、水进或静止不动等过程的变化。水退过程又可划分为正常水退和强制性水退。相应地可把层序内的沉积划分为正常水退沉积、强制水退沉积、水进沉积及垂向加积等成因类型^[5]。借助计算机技术进行的沉积层序几何形态模拟可揭示沉积基准面升降与沉积速率变化对上述沉积过程的控制作用^[20]。正常水退沉积是指在沉积基准面静止不动或上升的速率小于沉积速率时,由沉积物供给导致的水退沉积。正常水退沉积包括下列几种基本情况:(1)沉积基准面逐渐上升,滨岸体系向水盆地进积或前积的同时伴生着垂向加积作用,且垂向加积作用不断加大,随之岸线向盆地方向的迁移减小。(2)沉积基准面上升速度逐渐减小,滨岸体系向水盆地进积的速率不断加大而垂向加积不断减小。(3)沉积基准面大体保持不变,岸线向盆地进积,顶部表现顶超或弱的垂向加积。

强制水退沉积是由沉积基准面下降导致的水退沉积,岸线被强制向水盆地方向迁移,与沉积物供给无关。强制水退沉积具有特定的前积结构特征,岸线呈现阶梯状的下降,并缺少正常水退伴生的加积作用。水进沉积是在沉积基准面上升速率大于沉积速率时形成的,沉积体系呈退积式。垂向加积是当沉积基准面的上升与沉积供给量达到平衡时造成的沉积相在垂向上的叠置,岸线不发育迁移。这种情况一般在相对短的时间内发生,长期保持不变是不常见的。

沉积基准面的旋回性变化直接控制着沉积旋回的发育演化。在一个完整的沉积基准面变化旋回中,沉积物供给量与可容纳空间增、减的关系决定着沉积岸线和沉积相带的迁移。盆地中滨岸沉积相带的迁移和沉积体系域的发育演化与下列沉积基准面变化的四个阶段有关^[5]。

(1)在高水位晚期,沉积基准面下降,陆上河流开始下切,河流至滨岸带遭受侵蚀或过路搬运,滨岸带以下形成强制性水退沉积,发育下降体系域。

(2)沉积基准面下降到最低点后停止下降,强制性水退结束,进入低位体系域发育期。这一阶段沉积基准面处于静止不动或上升速率小于沉积速率。沉积物堆积驱动水退,形成正常水退沉积。

(3)当沉积基准面上升速率大于沉积速率时,水退向水进沉积转换,进入水进体系域的发育阶段。低位域的正常水退向水进沉积的转换面构成与水进体系域的分界面。

(4)水进到最大后向水退沉积转换,沉积基准面上升速率从大于沉积速率到小于沉积速率,开始正常水退沉积,进入高位体系域发育期。

3 盆地动力学过程的层序和沉积响应

沉积盆地的层序地层序列和沉积充填演化是盆地地球动力学过程的总体响应。盆地构造作用、火山爆发、冰川及气候变化等的多旋回性或阶段性演化,决定着盆地层序和沉积充填演化的基本特征。地球历史记录中,这种有规律的、重复出现的地质事件,包括沉积旋回和其他地质作用,是地球演化节律性的表现^[7]。层序地层学与地球地质记录中可能具有全球规模的、或局部尺度的节律性或旋回性的探索相结合,把古构造、古地理的变迁纳入到统一的地球演化的时、空框架上加以研究,构成了区域地球演化史和盆地动力学过程研究的一项重要内容。事实上,盆地

构造作用、气候变化、海、湖平面升降过程的层序和沉积响应研究,一直是沉积地质和盆地分析等领域的研究热点。

3 1 盆地构造作用的沉积层序响应

盆地的沉积充填演化首先受到盆地构造作用的总体控制。盆地构造演化的多期次和多旋回性是地球表层构造作用的一个基本特征。这一过程无疑是地质记录中沉积旋回发育的重要原因之一。大量研究表明,高级别的一、二级层序的形成多与区域性构造升降作用有关,层序界面往往是构造作用产生的构造不整合面或古构造运动面^[6,9]。从全球构造体制上,大陆板块的裂解、海底扩张、板块的聚合和造山作用等被看作是导致巨旋回或超旋回的沉积基准面或海平面变化的主要原因。这些区域性构造过程可导致大区域的沉降或隆升,引起盆地或洋盆体积和形态的明显变化,对沉积基准面或海平面区域性长周期的变化产生重要影响;而区域板块构造作用和轨道驱动作用等导致高频的旋回变化^[21,22]。在陆内盆地中,构造沉降速率的变化是沉积基准面或盆地基底升降的最直接的控制因素。

3 1 1 大型叠合盆地的层序地层系列与多期原盆地的叠合结构

我国诸多规模较大的沉积盆地,如塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地等均经历过多期的构造变革,形成极其复杂的构造—地层结构。我国学者很早就注意到这种盆地的叠合结构特征及其独特的油气聚集过程,并称之为多旋回盆地或叠合盆地^[23]。塔里木盆地是一个典型的大型叠合盆地,从古生代至中生代经历了漫长的地质演化史。近年来的研究表明,盆地多期次的构造变革导致了多个区域性不整合面所分隔的多套沉积旋回的叠加,形成了复杂的层序地层格架。结合盆地的区域构造背景,注重构造—地层的结合分析,揭示叠合盆地的层序地层序列与多期原型盆地形成演化的成因联系,在等时地层格架中研究了盆地的古构造、古地理及油气成藏规律,是叠合盆地沉积地质演化及油气聚集规律研究的一个重要切入点^[24]。由重要构造不整合面所限定的高级次(一、二级)层序一般属构造层序,事实上代表了叠合盆地中单一原型盆地的沉积充填。通过跨盆地不同构造单元的大格架剖面的构造—层序综合解释、追踪这些不整合面的分布,建立盆地区域性的构造—层序地层格架,可揭示多期原型盆地的叠合和改造过程。分隔盆地不同演化阶段或单一原盆地沉积层序的重

要不整合面,是多旋回构造—沉积演化序列上的结点。这种界面上、下盆地的古构造、古地理以及海、陆、源区分布往往发生了重大变化,特别是盆内的隆拗格局和古构造地貌发生了重要的变革。分隔盆地不同演化阶段的重要不整合面上、下的古构造、古地理乃至古气候等往往发育突变;而代表单一原型盆地沉积充填内的次一级层序地层单元的构造古地理背景,包括剥蚀物源区与沉积区的分布以及古构造格架等是相似的,或者说是渐变的。盆内重要的油气藏的形成和分布、再调整或重新配置与这些重要的变革密切相关。研究重要不整合面上、下构造古地理的变革是一个今后十分值得关注的重要课题。

3 1 2 前陆盆地构造作用的层序地层响应

在前陆构造背景中,盆山耦合过程的沉积和层序响应研究是近年来取得一系列突出进展的重要领域。前陆盆地沉降机制一般认为与前陆逆冲造成的岩石圈挠曲沉降有关。这种盆山耦合机制已被广泛用来解释前陆盆地总体的沉积充填和层序的发育演化过程^[25]。我国中西部分布有中生代众多的陆内前陆盆地,前陆逆冲挠曲沉积过程中沉积层序形成演化的研究受到了广泛的关注。在塔里木盆地中生代库车前陆盆地层序地层的研究,揭示了逆冲挠曲沉降过程对区域性沉积旋回或层序发育演化的控制机制^[26]。白垩至古、新近系内的区域性沉积旋回或层序的形成演化,是多期次的逆冲挠曲沉降到应力松弛、最后回弹隆起前陆构造作用的结果。层序发育早期,逆冲作用和强烈造山,形成了山前巨厚的、同逆冲构造期扇或扇三角洲砾岩带;随之是快速挠曲沉降导致了区域性的水进。后期逆冲造山作用的减弱,应力松弛和剥蚀、回弹隆起,盆地沉降变缓至抬升,结束一个区域性沉积旋回的发育过程。这种过程是多次进行的,导致盆内古构造格架、沉积物分散体系和物源以及沉积体系域的时空配置的多旋回变化。拗陷内中、新生代湖盆构造沉降速率的变化分析表明,区域性的沉积旋回均与构造沉降速率的幕式变化有关,反映了构造沉降作用对盆地沉积充填演化的总体控制。

3 1 3 裂陷盆地的层序序列与多幕裂陷作用及构造反转

在裂谷型盆地中,构造演化的阶段性或幕式的裂陷过程往往是形成盆内高级别层序或沉积旋回及区域性不整合面的直接因素(图 1)。Vail 等早期对西大西洋的大陆边缘的摩峡谷海槽的研究就指出,构造沉降对盆地的区域性沉积旋回的发育演化具有一级

的控制作用。我国东部中新生代的断陷盆地的研究表明,在裂陷期发育的二级超层序或部分三级层序的形成与幕式的裂陷过程有着密切的成因联系。在渤海湾、东海、南海、二连等第三纪断陷盆地的二级层序一般都属构造控制的沉积层序或构造层序,二级的从较快的水进到水退的沉积旋回与幕式的构造沉降速率变化具有较好的对应关系。各裂陷幕的断裂活动和展布方向、古构造格架、沉积物源体系和沉积体系分布样式及沉降中心等方面存在的明显差异。各裂陷幕间的不整合面的形成与每一裂陷幕末期的构造抬升和下一裂陷幕开始的构造变动有关。在江汉盆地的研究也发现,从晚白垩纪至早第三纪盆地经历了 4 个明显的断裂活动幕,控制着四个二级层序的发育^[27]。各裂陷幕的主断裂展布方向发生了从北西向、北北东向到北东向的转化,各个二级层序的沉积中心、沉积体系域的展布样式等也随之发生明显的变迁。伴生的岩浆岩类型也发生了变化,从碱性玄武岩、石英拉斑玄武岩到橄榄拉斑玄武岩等。

断陷期断块的掀斜旋转是普遍存在的构造作用。在断陷盆地中的断块掀斜旋转是产生不整合层序界面的重要原因,对层序的结构和沉积构成具有重要的影响^[28]。当断块掀斜旋转时,向上掀斜一侧会产生相对的隆起,导致相对的海或湖平面的上升,遭受剥蚀,形成不整合面。不整合面下伏地层在一定程度上向掀斜方向旋转变陡,造成上覆地层与下伏地层之间的角度或微角度不整合接触。向上倾方向不整合的削截作用加强;向洼陷方向在断裂坡折带或掀斜枢纽带处转为整合接触。在半地堑断陷的缓坡带,这类不整合较为发育,主要构成了三级层序或部分二级层序界面。

由于区域构造背景、深部过程及构造应力场变化引起的构造反转,是造成盆地充填过程出现沉积间断、形成重要的不整合界面的重要构造事件。盆地后期的构造反转也常表现出幕式或多期的特点,在盆地整个沉降演化过程中叠加了隆起事件。这些构造不整合面均构成高级别的层序界面,多为局部角度和微角度不整合界面,不整合面下伏的部分地层受到了一定程度的变形。这些构造作用控制着盆地的古构造格架样式、沉积中心和沉积体系域的分布,决定着盆地的构造和地层格架的基本特征。

3.1.4 构造坡折带

构造坡折带是指盆地中长期活动的同沉积构造或基底构造形成的古地貌突变带或斜坡带^[27, 29]。沉

积盆地中的古地貌、古地形是直接影响沉积作用的主要因素。在层序地层分析中,坡折带是一个重要的概念。在被动大陆边缘盆地的层序地层模式中,陆架坡折构成海进体系域和低位体系域的地貌分界。低水位期坡折带以上为剥蚀区或暴露区,而坡折带以下为低位体系域的发育区。在我国许多盆地的层序地层学研究发现,盆地中规模较大的同沉积断裂或基底断裂的长期活动,形成突变的古地貌斜坡,对沉积体系域的发育和分布起到重要的控制作用。构造坡折带正是指这种由同沉积构造活动形成的地形、地貌突变的斜坡带。

在不同类型盆地的层序格架中,这些构造坡折带对沉积体系域分布的制约作用类似于被动大陆边缘盆地的坡折带。构造坡折带常常控制着特定沉积相带或沉积体系域的发育部位,构成古构造、古地貌或古环境的分界。构造坡折带从成因类型上可划分出断裂坡折带(断坡带)、断弯坡折带、褶皱弯曲坡折带等。盆地构造坡折带的研究,需要对构造坡折带的构造样式和动力学成因、坡折带的构造古地貌、沉积物分散体系以及层序结构等进行综合分析。构造坡折带的概念提出后在我国许多盆地的层序地层和沉积充填分析以及砂岩油气藏预测勘探中得到了广泛的应用,取得了重要的经济效益。

(1) 裂陷型盆地的断裂坡折带

在裂陷或走滑—伸长型盆地中,各种拉张或张扭性断裂作用形成一系列同沉积断裂或同沉积断裂带。一些规模较大的断裂一旦形成,在整个裂陷期由于应力易于集中而长期活动,导致明显的差异沉降,长期构成构造古地貌单元和沉积相域的边界。在渤海湾盆地东营、沾化等凹陷中,古近纪断陷期广泛发育规模较大的断裂坡折带,其主控断裂生长系数(GI)一般在 0.5~0.6(图 5)。湖盆中部的深湖洼陷往往由断裂坡折或断弯坡折带构成边界。沿洼陷边缘断裂坡折带的下斜坡具有相对低洼的构造地貌特征,沿断坡带的下斜坡与深湖过渡带是低位域三角洲和湖底扇的有利发育部位,物源可来自侧向或纵向的沉积物分散体系。侧向的陆源碎屑体系可切过断坡带注入深湖区,或沿断裂转换带的斜坡注入深水环境。

沿断陷盆地的陡坡带往往形成多个同沉积的断阶构造,不同断阶形成的坡折带对不同沉积相带的分布有制约作用。陡坡边缘断裂一般控制着近端的冲积扇、扇三角洲砂砾岩相带、向盆地方向的断裂坡折带对扇三角洲前缘、低位域三角洲或湖底扇的发育和

分布具有明显的控制作用。但随盆地演化,不同断裂阶坡折带与砂分散体系和沉积相分布的关系是复杂的。在渤海湾盆地,断陷中部洼陷边缘断裂坡折一般构成孔店至沙四下沉积期边缘冲积扇或浅水扇三角洲的沉积边界。随后盆地边缘断阶上超。在沙三沉积期,洼陷边缘断裂坡折控制着湖底浊积扇和低位期扇三角洲前缘沉积带的分布,而陡坡边缘的断裂坡折则控制着冲积扇和扇三角洲的近端沉积。

在规模较大的断陷盆地,由于反向断裂调节作用形成的断裂坡折带是十分常见的。有时可发育多个断裂坡折带,来自纵向和横向的砂分散体系在断裂坡折低地形成多个次级的沉积中心。如渤海湾盆地东营凹陷,在沙三沉积期南部缓坡反向调节断裂的活动形成了 3 条弧形的、呈 NE 向或 NEE 向延伸的断裂坡折带,来自南缘和轴向的(东部)低位域三角洲、湖底扇以及下降体系域的河流三角洲的沉积中心主要受到了多级洼陷边缘断裂坡折带的控制^[27]。在沙三沉积晚期,梁家楼—现河弧形同沉积断裂系与北部的胜北断层对接形成了洼陷内环断裂坡折带,而陈官庄—王家岗断裂带和八面河断裂带则分别构成了凹陷中环和外环断裂坡折带。沙三中沉积期,来自南缘高位域河流三角洲的沉积中心主要沿陈官庄—王家岗断裂坡折带形成的构造低地发育;而低位扇的发育则主要受到梁家楼洼陷边缘断裂坡折带的控制。这些低位扇复合体厚度大,沿断坡带的西端向东或北东方向延伸。来自轴向的(东部)的河流三角洲前缘沉积同样受到了洼陷断裂坡折带的控制,下降体系域(高位域晚期)的三角洲前缘推进到了洼陷中部梁家楼—现河断裂坡折带上。

(2) 前陆盆地逆冲断裂形成的逆冲挠曲坡折带

在前陆拗陷内由于盆地逆冲断裂所形成的挠曲坡折带也对沉积相带的发育展布产生重要的控制。前陆盆地中逆冲构造对沉积基准面具有控制作用。研究表明,在造山冲断带与盆地前渊过渡带隐伏的逆冲断层可形成挠曲型的构造坡折带,对盆地的沉积地貌和古地理产生重要影响。Butler 等研究了中西西里前陆盆地晚第三纪早期的沉积环境表明,逆冲上盘背斜凸起将整个盆地分成两部分,位于背斜后部为滞水盆地,前部越过背斜形成的前缘斜坡(坡折)为深水前渊盆地^[30]。在我国中西部内陆挤压挠曲盆地中,发育有同沉积褶皱、同生逆断层以及横向调节断裂等同沉积构造。前陆逆冲构造形成对沉积具有重要控制作用的构造坡折带。高水位期在前陆山前近

端发育冲积扇和扇三角洲或辫状河三角洲,形成楔形的粗碎屑砂体。逆冲构造坡折带(低凸起)的前缘斜坡至前渊带主要发育细粒的半深湖—深湖相沉积。当湖平面相对下降时,粗碎屑体系向前推进到前缘斜坡坡折时,形成低位的辫状河三角洲或湖底扇沉积。通过二维层序模拟揭示出,下伏逆冲断层形成的低凸起分隔了前缘带的次级凹陷与前渊盆地,高水位期在山前近端发育冲积—扇或辫状河三角洲,逆冲断层低凸起前缘斜坡至前渊带主要发育细粒的半深湖—深湖相沉积。当湖平面相对下降时,粗碎屑体系向前推进到前缘斜坡坡折时,可形成低位的三角洲或湖底扇沉积。

(3) 碳酸盐岩台地边缘构造坡折带

在塔里木盆地塔中古隆起古生代碳酸盐岩台地边缘坡折带受到了断裂或断隆构造的控制。台缘斜坡带或坡折带是礁体和浅滩相的有利发育带。塔中古隆起北斜坡的 iv 号断裂带控制着构成重要储层的礁、滩相的发育分布。同时,盆内各种断裂的活动对与剥蚀和风化作用有关的岩溶储层的发育分布也具有重要的控制作用。研究断隆、断坡或古隆起、古斜坡对碳酸盐相带和储层发育分布的控制,对盆内海相碳酸盐岩油气勘探至关重要。这一领域的研究预期将取得重要的进展和突破。

3 2 海、湖平面升降与气候变化

3 2 1 海平面和湖平面变化

在震地地层学理论提出时,Vail 等(1977)就试图通过建立全球性海平面变化曲线来建立全球性的等时地层对比系统。这一观点提出后引起了广泛的争议,同时也引起了有关层序形成机制的广泛研究。早期地震地层学的研究者们主要是通过追踪地震剖面上显示的海岸上超点来进行海平面变化研究的,并结合微体古生物和同位素证据,建立了中、新生代以来的全球海平面曲线,用于解释沉积体系域的迁移和层序发育的旋回变化。但在不同区域或盆地中的海平面变化记录受到了构造作用、沉积物供给变化等因素的综合作用,事实上是一种相对的海平面变化。然而,探索全球海平面变化的努力仍然受到广泛的关注。

全球海平面变化的研究需要与全球构造体制、冰川等变化相结合,大区域的或洲际性的海平面旋回的对比可能有助于这一问题的探讨。对塔里木、扬子、华北等台地寒武—奥陶纪海平面变化进行对比分析表明,三个地台在寒武纪和奥陶纪都经历了一个巨型

的海平面升降旋回。在塔里木地台、华北地台和扬子地台寒武系和奥陶系超层序旋回具有可对比性。在寒武系中,主要阶段三级层序发育的数量和主要界面可对比程度较高,尤其是龙王庙阶和凤山阶的三级层序数量和界面位置均能完全对比,说明在稳定克拉通背景条件下,高海平面阶段发育的层序的可对比性较高,而在低海平面阶段,区域特色较明显,反映了沉积物生长率和基底快速沉降变化等的影响^[31]。

湖平面变化对沉积相的分布和沉积旋回具有与海平面相似的控制机制,但湖平面的变化受到更复杂因素的影响。湖平面变化是否受到海平面变化的影响与湖泊所处的区域构造和古地理格局中的位置有关。海平面变化对一些近海湖盆的湖平面变化可能存在直接或间接的影响。在高海平面期湖泊与海岸环境可能相沟通,海水的注入可引起湖平面和水体盐度的显著变化。这些湖泊沉积中发育的少数海相生物或相类似的海源生物,可能是海侵的一种标志。近年研究发现,在塔里木盆地中、新生代以来库车坳陷可能存在多次海侵或海泛事件。如在白垩系舒善河组下部的黑色泥岩中首次发现了甲藻甾烷和 24 正丙基胆甾烷,这两种化合物分别来自沟鞭藻和金藻,它们可能是重要的海相藻类^[32]。在白垩系、古近系及新近系中均发育有超微钙化石,古一新近系有较多的有孔虫分布。我国东部渤海湾盆地、松辽盆地也可能存在短暂的海侵现象。但这些可能存在的短暂的海侵作用并没有对湖平面或层序结构产生有意义的影响。中、新生代以来陆内湖盆的湖平面变化主要是受到构造沉降速率和气候变化的控制。

3.2.2 气候变化

气候变化是海或湖平面变化的重要控制因素。全球气候变化可引起冰盖的消长,从而导致海水体积和海平面的变化。由于湖泊水体比海洋小得多,受气候变化的影响远比海洋大。湖面的变化的频率可能比海平面变化的频率还高,而且其变化的幅度也很大。因此,陆相湖盆中沉积地层格架的变化,无疑与气候变化有密切关系。如现代的 M alaw i 湖在近 15 000 年发生过数百米的湖面波动。干旱、非干旱气候条件的周期性变化不仅可引起湖平面的变化,对沉积物供给以及沉积物类型的变化可产生重要影响,对湖盆沉积充填和层序发育演化起到重要的控制作用。

米兰科维奇天文周期变化引起的地球日照量的周期性变化,被认为是引起气候高频周期性变化的重要因素。这种周期性的气候变化引起极地冰盖层的

消长,从而导致海水体积和海平面的周期性变化。许多海或湖盆沉积中识别出的四级(0.08~0.5 Ma)、五级(0.03~0.08 Ma)高频的沉积旋回或层序,广泛被解释为米兰科维奇天文气候周期引起的海或湖平面变化的结果^[33,34]。深海沉积物中碳、氧同位素等的研究广泛证实了最近 2 Ma 以来米兰科维奇周期的存在,并表明米兰科维奇周期对大陆冰川的消长和海平面变化产生重要的影响。

对塔里木盆地库车坳陷古近系库姆格列木组中上部的高频的四、五级层序进行密集采样分析表明,从一个四级或五级的水进到水退的沉积旋回,稀土元素、微量元素等的含量作有序变化,如稀土元素铈、铈、钕、钇、钇和微量元素钒、铋、铬一般在湖(海)侵时含量变低,而在水退时含量变高。对侏罗系三级层序的采样分析也反映出同样的变化趋势。这可能主要与物源区的风化作用、氧化还原条件及湖水的盐度的变化有关,而气候的变化应是直接的控制因素。

4 结语

层序地层学的理论发展已经历 30 多年的历程。现代层序地层学理论的发展,与生物地层学、沉积学、盆地分析等学科交叉,高分辨率地震资料和高精密测试分析数据的获取,使这一领域的研究不断取得新的进展和突破,推进了形成统一沉积地质学理论体系的发展。层序地层学理论的发展一直紧密结合沉积矿产资源、特别是油气资源的预测勘探实践,已成为含油气盆地分析和油气勘探不可缺少的权威性工具。

现代层序地层学的发展,把沉积旋回纳入到盆地演化的时空框架中加以研究,把沉积演化与地球节律变化结合起来,在地球系统的时空格架上研究古构造和古地理演化,促进了人们对地质或盆地旋回性演化及其成因的系统探索,带来了地质认识观和思维方法上的一次革命。

沉积盆地的层序地层格架和沉积充填结构的形成演化及其控制因素的研究是层序地层学不断探索的基本科学问题。构造作用是对盆地升降变化起决定性的控制作用的因素,与此有关的盆地几何形态、沉积与剥蚀地貌以及物源区分布和供给量的变化也受到构造作用的明显控制。把层序地层与构造作用结合分析的构造地层学的研究是近一、二十年来国际上极其活跃的研究领域。全球海平面变化对层序发育控制机制的提出引发了多年的争论,但当前仍然是一个受到人们关注的热点问题。气候变化是另一对

盆地沉积充填具有最重要控制作用的因素之一。气候变化被认为是海、湖平面波动的主要控制因素, 控制着高频的层序发育。控制因素的研究有助于揭示层序的形成过程和沉积构成的变化在盆地范围内或区域上的同步或同时性的演化规律, 因而有助于建立盆地规模的具有预测意义的层序地层模式。

参考文献 (References)

- Vail P R, Mitchum R M, Thompson S. Global cycles of relative changes of sea level [C] // Payton C E, ed. Seismic Stratigraphy application to hydrocarbon exploration. AAPG Memoir 1977, 26: 99-116
- Van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M, et al. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies [M]. AAPG Methods in Exploration Series, 1991, (1): 1-55
- Aitken J F, Howell J A. High resolution sequence stratigraphy: innovations, applications and future prospects [C] // Howell J A, Aitken J F, eds. High Resolution Sequence Stratigraphy: Innovations and Applications. Geological Society Special Publication, 1996, 104: 1-9
- Emery D, Myers K J. Sequence Stratigraphy [M]. Oxford: Blackwell, 1996: 1-297
- Catuneanu. Principles of Sequence Stratigraphy [M]. Elsevier, 2006: 1-374
- 李思田, 程守田, 杨士恭, 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: 1-176
- 王鸿祯, 史晓颖, 王训练, 等. 中国层序地层研究 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2000: 1-317
- 潘元林, 李思田, 等. 大型陆相盆地层序地层与隐蔽油气藏研究——以济阳拗陷为例 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 1-213
- 林畅松. 沉积盆地的构造地层分析——以中国构造活动盆地研究为例 [J]. 现代地质, 2006, 20(2): 185-194
- 顾家裕. 塔里木盆地沉积层序特征及其演化 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 274-276
- 林畅松, 刘景彦, 张英志, 等. 构造活动盆地的层序地层与构造地层分析——以中国中、新生代构造活动湖盆分析为例 [J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 365-374
- 林畅松, 刘景彦, 刘丽军, 等. 高精度层序地层分析: 建立沉积相和储层规模的等时地层格架 [J]. 现代地质, 2002, 16(3): 276-281
- Lin Changsong, Li Si Tian, Li Zhen. Chapter 5. Facies Architecture, Stratigraphic Sequences and Coal Occurrence in the Late Carboniferous and Early Permian Delta Complexes of the North Huabei Basin, China [C] // Oti N, Postma G, eds. Geology of Deltas. Netherlands, 1995: 97-125
- 陈建强, 史晓颖, 张国仁, 等. 华北地台中寒武统张夏组上部高频层序研究 [J]. 地层学杂志, 1998, 22(2): 110-115
- Galloway W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis. I. Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73: 125-142
- Embry A F, Johannessen E P. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic-Lower Jurassic succession Western Sverdrup Basin, Arctic Canada [C] // Voren T O, Bergsager E, Dahl-Stannes O A, et al. eds. Arctic Geology and Petroleum Potential. Special Publication 2, Norwegian Petroleum Society, 1992: 121-146
- Cross T A, Lessenger M A. Sediment volume partitioning: rationale for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation [C] // Gradstein F M, Sandvik K O, Milton N J, eds. Sequence Stratigraphy—Concepts and Applications. Special Publication 8, Norwegian Petroleum Society (NPF), 1998: 171-195
- Brown J F, Fisher W L. Seismic stratigraphic interpretation of depositional systems: examples from Brazilian rift and pull-apart basins [C] // Payton C E, ed. Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir 1977, 26: 213-248
- Posamentier H W, Allen G P, James D P, et al. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples and exploration significance [J]. AAPG Bulletin, 1992, 76: 1687-1709
- 林畅松, 解习农, 张燕梅, 等. 二维沉积层序模拟研究 [J]. 沉积学报, 1998, 2: 68-73
- Vail P R, Audenard F, Bowman S A, et al. The Stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology—an overview [C] // Einsele G, Ricken W, Seilacher A, eds. Cycles and Events in Stratigraphy [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991: 617-659
- Miall A D, Miall C E. Sequence stratigraphy as a scientific enterprise: the evolution and persistence of conflicting paradigms [J]. Earth-Science Reviews, 2001(54): 321-348
- 朱夏. 论中国含油气盆地构造 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1986: 1-110
- Lin Changsong, Yang Haijun, Liu Jingyan, et al. Paleogeomorphology of the Paleozoic central uplift belt and its constraint on the development of depositional facies in the Tarim Basin [J]. Science in China Series D, 2009, 52(6): 823-834
- Devlin W J, Rudolph K W, Shaw C A, et al. The effect of tectonic and eustatic cycles on accommodation and sequence-stratigraphic framework in the Upper Cretaceous foreland basin of southwestern Wyoming [C] // Posamentier H W, Summerhayes C P, Haq B U, et al. eds. Sequence Stratigraphy and Facies Associations. Special Publication of the International Association of Sedimentologists. Blackwell Oxford, International, 1993, 18: 501-520
- Lin Changsong, Liu Jingyan, Zhang Yanmei, et al. Depositional architecture of the Tertiary tectonic sequences and their response to foreland tectonism in the Kuqa Depression, the Tarim Basin [J]. Science in China Series D, 2002, 45(3): 251-259
- Lin Changsong, Zheng Herong, Ren Jianye, et al. The control of syn-depositional faulting on the Eocene sedimentary basin fills of the Dongying and Zhanhua sags, Bohai Bay Basin [J]. Science in China Series D, 2004, 47(9): 769-782
- Ravnas R, Steel R J. Architecture of marine rift-basin successions [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(1): 110-146
- 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等. 构造坡折带—断陷盆地层序分析和

- 油气预测的重要概念[J]. 地球科学, 2000, 25(3): 260-265
- 30 Butler R W H, Grasso M. Tectonic controls on base level variations and depositional sequences with thrust-top and foredeep basins: examples from the Neogene thrust belt of central Sicily[J]. Basin Research, 1993, 5: 137-151
- 31 Yu Bingsong, Chen Jianqiang, Lin Changsong. Cambrian-Ordovician sequence stratigraphy on the northern Tarim Platform and its correlation with Yangtze Platform and North China Platform[J]. Science in China Series D, 2001, 44(4): 373-384
- 32 Lin Changsong, Wang Qinghua, Xiao Jianxin, *et al*. Depositional sequence architecture and filling response model of the Cretaceous in the Kuqa depression, the Tarim Basin[J]. Science in China Series D, 2004, 47(2): 86-96
- 33 Chappell J, Shackleton N J. Oxygen isotopes and sea level[J]. Nature, 1986, 324: 137-140
- 34 Plint A G. High-frequency relative sea level fluctuations in Upper Cretaceous shelf clastics of the Alberta Foreland Basin: possible evidence for a glacio-eustatic control[C]// MacDonald D IM, ed. Sedimentation, tectonics and eustasy. International Association of Sedimentologists Special Publication 12, 1991: 409-428

Sequence and Depositional Architecture of Sedimentary Basin and Process Responses

LIN Chang-song

(China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract The development of modern sequence stratigraphic theories, integrating the study of depositional process in the time- and space configuration and the cyclic or rhythmic evolution of the Earth, has formed an innovative theory for the investigation of depositional facies in chronostratigraphic framework, and became an important prospecting tool for petroleum exploration. Basin fills can be usually divided into different sequence stratigraphic units consistent with different cycles. The regional sequence stratigraphic framework established by collating high-order sequence stratigraphic units confined by major unconformities is very important for the reconstruction of tectono-paleogeography and the strategic evaluation of petroleum exploration, and the high resolution sequence stratigraphic framework erected by tracing the low-order, such as the fourth or fifth order sequence stratigraphic units, may provide accurate stratigraphic correlation for the investigation of depositional facies and reservoir distribution along selected districts within a basin. Depositional cycle of a sequence stratigraphic unit can be usually classified into several types of genetic deposits, that is the normal regressive, forced regressive, transgressive and aggradational deposits. Depositional cycle of a third order sequence stratigraphic unit can be easily divided into lowstand, transgressive, highstand and falling systems tracts in marine or nonmarine basins.

The control of tectonism, climatic and sea or lake level change on the development of depositional sequences has long been one of the major research themes in sequence stratigraphy or sedimentological geology. The evolution of basin filling sequence is the response to the basin dynamic processes. The combination study of sequence stratigraphy with basin dynamic or regional evolution of the Earth has formed an important research area, integrating the study of paleotectonics and paleogeography into the unique time and space system of the Earth evolution. The multiple reformation of the polycyclic or superimposed basins underwent resulted in the stacking of a series of tectonic sequences confined by regional unconformities and it is the key to establish the relationship of the tectonic evolution and the basin filling sequence in order to reveal the sedimentary geological history and petroleum accumulation within a basin. The formation of major unconformities and regional depositional cycles or sequences are commonly attributed to the tectonism, such as the multiple thrust flexural subsidence and rebounding uplift due to denudation, multiple rifting and tectonic reversion, whereas the development of high frequency depositional sequences related to sea or lake level change have been usually interpreted to be controlled by climatic change. In the tectonically active basins, the structural step-break zones have great influence on the development of depositional systems tracts and facies associations.

Key words sequence architecture; genetic depositional types; controlling factors; sedimentary basins