

美国层序地层研究中的新学派 ——高分辨率层序地层学

邓宏文

(中国地质大学, 北京 100083)

以科罗拉多 T. A. Cross 成因地层研究组为代表的高分辨率层序地层学问世后, 立即得到学术及实业界有识人士的高度重视, 实际应用效果显著, 这标志着层序地层学的新发展。高分辨率层序地层学着眼于沉积矿产, 特别是油气勘探中具体目标的精确预测。以地层过程-响应沉积动力学为理论基础, 具体有四, 即: 地层基准面原理、体积划分原理、相分异原理与旋回等时对比法则。油气勘探开发实践证明, 该方法对相分布、储层三维预测、流体流动数值模拟物理模式的建立有着重要意义。

关键词 高分辨率 层序地层学 基准面 体积划分 相分异 等时对比

作者简介 邓宏文 女 48岁 教授 沉积学与储层预测

层序地层学原理和实践已被大多数地质学家所接受。理论上, 层序地层学特别重视海平面升降周期对地层层序形成的重要影响; 实践上, 层序地层学通过年代地层格架的建立, 对地层分布模式作出的解释和对同时代成因地层内体系域的划分, 为含油气盆地地层分析和盆地规模的储层预测提供了坚实的理论基础和油气勘探的有效手段, 有力地推动了地质学, 特别是石油地质学的发展。但是, 理论研究与实际应用证明层序的形成与分析还应有更全面、更合乎逻辑的依据。同时随着盆地油气勘探与开发向更复杂和更深入的方向发展, 石油地质学家需要更精确的技术, 提高层序地层分析的分辨率和储层预测的准确性。正因为如此, 高分辨率层序地层分析理论和技术便应运而生。其中, 以 Cross^[1] 领导的科罗拉多矿业学院成因地层研究组为代表的高分辨率层序地层学派的崛起, 及其在美国和其它一些国家石油公司油气勘探、开发中发挥的显著作用和重要影响, 突出地反映了高分辨率层序地层学的新概念、新方法、新进展, 如: 运用过程-响应沉积学原理进行高分辨率层序划分与对比技术、正演与反演数值地层模拟技术、地层对储层中流体流动速度与流体单元控制的研究等。本文着重介绍高分辨率层序地层分析与对比技术。

1 高分辨率层序地层学的理论基础

与盆地或区域规模的层序分析不同, 高分辨率层序地层分析以岩芯、三维露头、测井和

* Cross TA. High-resolution stratigraphic correlation from the perspective of base-level cycles and sediment accommodation. 西北欧层序地层会议材料, 1994

收稿日期: 1995-01-05

高分辨率地震反射剖面资料为基础,运用精细层序划分和对比技术将钻井的一维信息变为三维地层关系预测的基础,建立区域、油田乃至油藏级储层的成因地层对比骨架,对储层、隔层及生油层分布进行评价及预测。由于时间分辨率增加,大大提高了地层预测的准确性,并能为地层内流体流动最佳模拟提供可靠的岩石物理模型。

1.1 地层基准面原理

层序的确定是层序地层分析的基础。科罗拉多学派之前,在美国层序地层学派中大致有三种层序划分方法。其一以 EXXON 公司为代表,以地表不整合或与该不整合可以对比的整合界面为层序的边界^[2];其二继 Frazier 之后,以 Galloway^[3]为代表,采用最大洪泛面作为层序确定的边界;其三则为 Johnson 等^[4]所强调的层序即为以地表不整合或海进冲刷不整合为界面的海进-海退旋回^[5]。上述三种层序类型尽管划分方法不同,但均强调海平面的变化是控制层序成因和相分布的内在机制。与上述层序地层学派不同,科罗拉多矿业学院 Cross 领导的成因地层组则认为,受海平面、构造沉降、沉积负荷补偿、沉积物补给、沉积地形等综合因素制约的地层基准面,是理解地层层序成因并进行层序划分的主要格架。Cross 等引用并发展了 Wheeler^[6]提出的基准面的概念,分析了基准面旋回与成因层序形成的过程-响应原理。他们认为地层基准面并非海平面,也不是相当于海平面的一个向陆方向延伸的水平面,而是一个相对于地球表面波状升降的、连续的、略向盆地方向下倾的抽象面(非物理面),其位置、运动方向及升降幅度不断随时间而变化(图1)。基准面在变化中总是向其幅度的最大值或最小值单向移动的趋势,构成一个完整的上升与下降旋回。基准面的一个上升与下降旋回称为一个基准面旋回。基准面可以完全在地表之上,或地表之下摆动,也可以穿越地表之上摆动到地表之下再返回,后者称基准面穿越旋回(base level transit cycle)。一个基准面旋回是等时的,在一个基准面旋回变化过程中(可理解为时间域)保存下来的岩石为一个成因地层单元,即成因层序,其以时间面为界面,因而为一个时间地层单元。

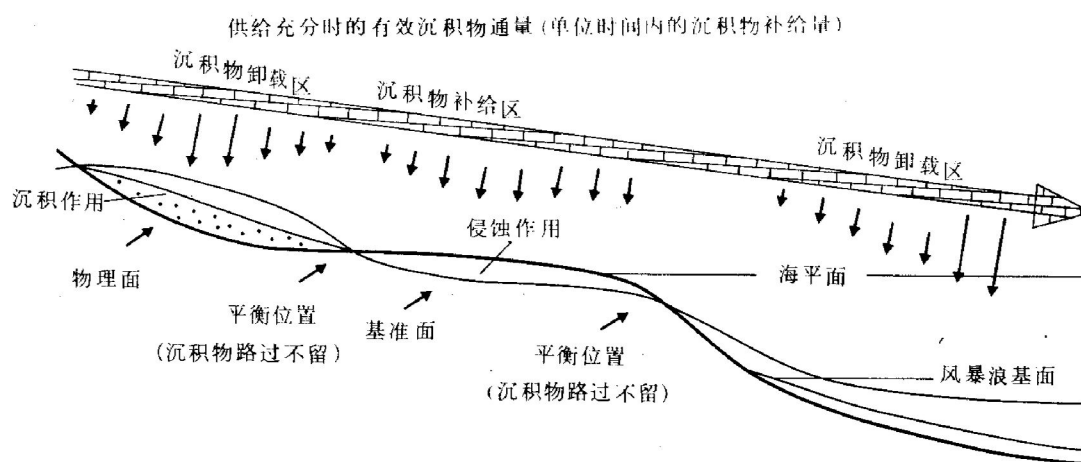


图1 基准面、可容纳空间和反映可容纳空间与沉积物供给之间平衡时的地貌状态

(据 Cross, 1994 修改)*

* Cross T A. high-resolution stratigraphic correlation from the perspective of base-level cycles and sediment accommodation. 西北欧层序地层会议材料, 1994

基准面相对于地表的波状升降,伴随着沉积物可堆积空间(可容纳空间)的变化(图1)。当基准面位于地表之上时,提供了沉积物的空间,沉积作用发生,任何侵蚀作用均是局部的或暂时的。当基准面位于地表之下时,可容纳空间消失,任何沉积作用均是暂时的和局部的。当基准面与地表一致(重合)时,既无沉积作用又无侵蚀作用发生,沉积物仅仅路过(sediment bypass)而已。因而在基准面变化的时间域内(注意:时间是连续的),在地表的不同地理位置上表现为四种地质作用状态,即沉积作用、侵蚀作用、沉积物路过时产生的非沉积作用及沉积物非补偿(可容纳空间、沉积物供给量比值即 $dA/dS \rightarrow \infty$)产生的饥饿性沉积作用乃至非沉积作用。在地层记录中代表基准面旋回变化的时间-空间事件表现为岩石+界面(间断面)(图2)。因此,一个成因层序可以由基准面上升半旋回和基准面下降半旋回所形成的岩石组成,也可由岩石+界面组成。其深刻含义绝非一般层序地层学中的“准层序”所能正确反映的。

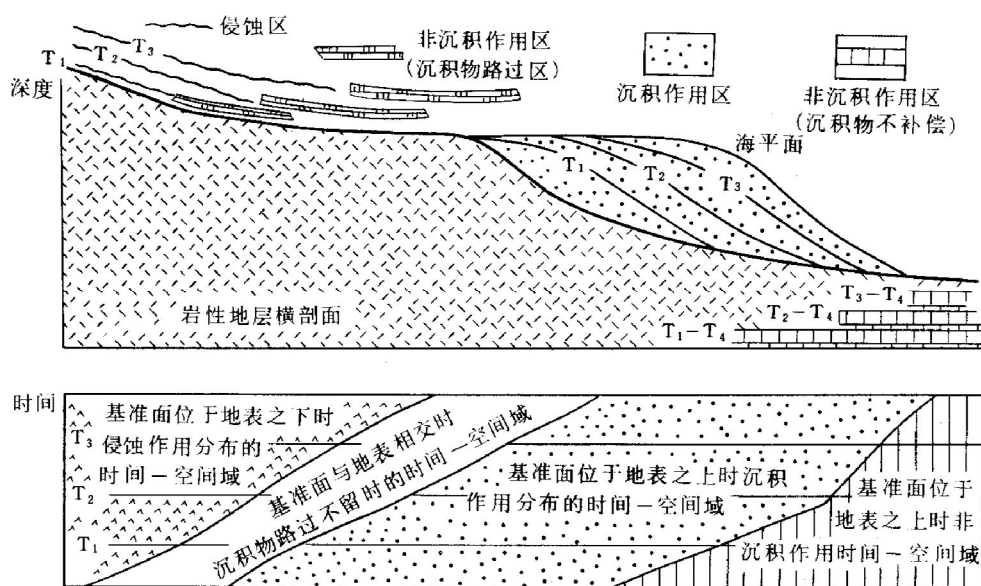
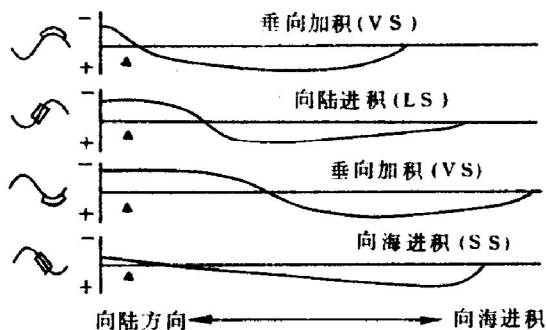


图2 岩性地层剖面及侵蚀作用、沉积物的路过、沉积作用和非补偿沉积作用的时空迁移对比图解
(据 Wheeler 图解法)

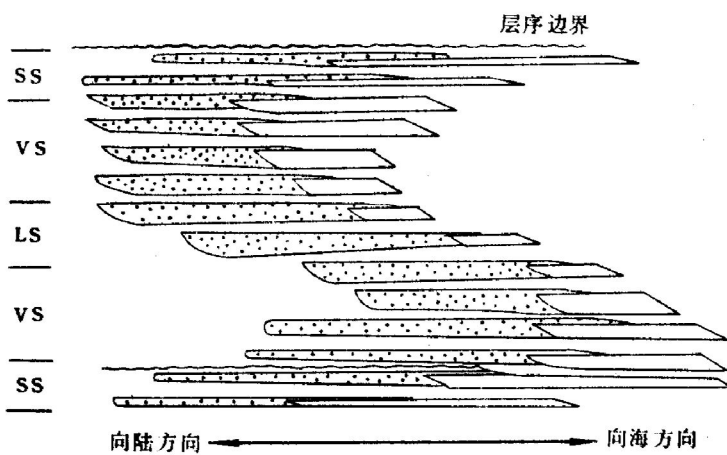
基准面处于不断的运动中,当其位于地表之上并相对于地表进一步上升时,可容纳空间增大、沉积物在该可容纳空间内堆积的潜在速度增加,但沉积物堆积的实际速度,还受控于物质搬运的地质过程所限制。也就是说,可容纳空间控制了某一时间内,在某一地理位置沉积物堆积的最大值。在沉积物质供给速度不变的情况下,可容纳空间与沉积物供给量比值(A/S 值),决定了可容纳空间沉积物(有效可容纳空间)的堆积速度、保存程度及内部结构特征。当基准面位于地表之下并进一步下降时,侵蚀作用的潜在速度将增加,但实际侵蚀速度也受沉积物搬离地表的地质过程所限制。因此基准面描述了可容纳空间的建立或消失,与沉积作用间的作用变化过程。可将基准面看作一个势能面,它反映了地球表面与力求其平衡的地表过程间的不平衡程度。要达到平衡,地表要不断地通过沉积或侵蚀作用,改变其形态向靠近基准面的方向运动。

1.2 体积划分原理

基准面旋回及其伴随的可容纳空间变化的动力学系统,控制着地层的结构与沉积特征。为了进一步理解这一过程-响应关系,Cross*提出了沉积物体积划分(volumetric partitioning)的概念。



a. 可容纳空间地理位置的迁移



b. 沉积物体积划分与堆积样式的变化

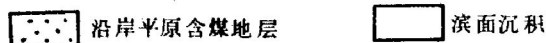


图3 有效可容纳空间迁移导致沉积物的体积划分和成因地层堆积样式的变化

(Cross, 1994)*

沉积物体积划分即在成因地层内沉积物被划分成不同的相域过程。它是基准面变化过程中,不同沉积环境内可容纳空间的四维(空间+时间)动力学变化的产物。沉积物体积划分是一个重要的概念,因为体积划分直接伴随着原始地貌形态的保存程度、沉积物厚度、内部结构等,诸多的沉积学和地层学的响应。图3说明了伴随着有效可容纳空间位置的迁移(图3a),海岸平原-滨海砂岩体系域的体积划分及沉积物堆积样式的变化(图3b)。在基准面下降期间,有效可容纳空间位置向海方向迁移,空间向海增大,向陆减小,因而滨海砂岩沉积体逐渐增大,海岸平原沉积体减小。基准面上升期间,有效可容纳空间位置向陆方向迁移,空间向陆增大,因而堆积在陆地相域的海岸平原沉积体逐渐增大。在较长期的基准面穿越旋回形成的成因层序内,地层的堆积样式(stacking pattern)以及其地理位置的迁移,也与其在基准面旋回中的位置有关(图3b)。向盆地方向迁移的进积(seaward-stepping)堆积样式,形成于长期基准面旋回的下降

期间,随之产生的垂向加积(vertical-stepping)地层,形成于基准面旋回上升的开始阶段。向陆方向迁移的退积(landward-stepping)堆积样式,出现在基准面上升时期,随之产生的加积地层则出现在基准面上升的末期和下降的早期。

1.3 相分异原理

伴随着可容纳空间的变化和沉积物的体积划分,保存在相同沉积环境中的相序、相组合、

* Cross TA. High-resolution stratigraphic correlation from the perspective of base-level cycles and sediment accommodation. 西北欧层序地层会议材料, 1994

相类型和相的多样性,也有显著区别,统称为相分异(facies differentiation),因而也直接影响着储层的物理特征,如储层相在三维空间的连续性、几何形态、岩性及岩相类型乃至岩石物理性质(非均质性)。如高可容纳空间与低可容纳空间形成的河道砂体,其几何形态(宽度与厚度之比)、砂体的连接性、侧向连续性、相互截切程度、底形类别、保存程度、底滞沉积厚度与类型均有明显差异。又如,与进积成因层序(低可容纳空间)中的滨面砂岩比较,退积成因层序(高可容纳空间)中的滨面砂岩体积减小、侧向连续性变差、相类型和相序趋向简单化,砂岩含泥量减小、分选变好、砂岩均质性较高。这些相分异特征直接影响储层物性,乃至油、气、水的流路及抽排系统。

从基准面和可容纳空间的动力学观点出发,相同沉积体系域或相域(沉积体系的地层记录)的体积划分(各沉积环境中沉积物的体积比)、沉积物的保存程度、地层堆积样式、相序特征及相类型不是固定不变的,而是其在基准面旋回中所处的位置和可容纳空间的函数,即时间和空间的函数。因而用沉积动力学的观点,分析沉积物堆积期间基准面变化导致的可容纳空间的变化,解释地层结构及沉积学特征,在根本上不同于传统的静止的相模式类比法。

1.4 旋回等时对比法则

高分辨率层序地层划分与对比,正是依据基准面旋回、可容纳空间的变化,导致岩石记录的地层学和沉积学特征的过程-响应原理进行的。而成因层序对比是通过相序的变化识别层序(垂向剖面上即旋回)的位置及边界,进而分析连续的层序空间上的排列或沉积样式,划分不同级次的基准面旋回来实现的。

基准面旋回在地层记录中留下了能够反映其所经历时间的高分辨率的“痕迹”。地层记录中不同级次的基准面旋回,记录了相应级次的基准面旋回。如何据一维钻井或露头剖面上的这些“痕迹”识别基准面旋回,是高分辨率层序划分与对比的基础。

地层的旋回性是基准面相对于地表位置的变化,产生的沉积作用、侵蚀作用、沉积物路过,形成的非沉积作用和沉积不补偿造成的饥饿性,乃至非沉积作用随时间发生空间迁移的地层响应(图2)。一个完整的基准面穿越旋回及与其伴生的可容纳空间的增加与减小,在地层记录中由代表二分时间单元(每部分分别代表基准面上升与下降)的完整的地层旋回组成,有时仅由不对称的半旋回和代表侵蚀作用或非沉积作用的界面构成。旋回是在相序分析的基础上识别出来的。因为相序及在纵向上的相分异,直接与基准面旋回中可容纳空间的变化密切相关。通过能指示沉积物保存程度、堆积速度的相序、地层界面及相分异性,就可识别出地层旋回的对称程度、旋回加厚或变薄的样式,以及在跨越成因地层边界位置上相错位的幅度与方向,由此推断在时间上与基准面旋回同步的可容纳空间单向增加或减少的趋势。

如:在海岸平原-浅海沉积环境中,代表基准面下降半旋回的地层旋回,以反映沉积环境逐渐变浅的相序为代表;基准面上升半旋回,则以反映沉积环境逐渐变深的相序为代表;较长期基准面旋回中代表基准面下降半旋回的地层,由多个呈进积样式的短期旋回组成,而基准面上升半旋回则是退积结构。在钻井、露头及电测曲线上,地层堆积样式可以通过比较组成相序(短期地层旋回)的相组分识别出来。

高分辨率地层对比是同时代地层与界面的对比,不是旋回幅度和岩石类型的对比。Cross认为,在成因层序的对比中,基准面旋回的转换点(turnround point),即基准面由下降到上升或由上升到下降的转变位置,可作为时间地层对比的优选位置。因为转换点为可容纳空间

增加到最大值或减少到最小值的单向变化的极限位置,即基准面旋回的二分时间单元的划分界线。转换点在地层记录中某些位置表现为地层不连续面,某些地理位置则表现为连续的岩石序列。岩石与界面出现的位置和比例,是可容纳空间和沉积物供给的函数。因而在对比中,要通过地层过程的分析掌握什么时候岩石与岩石对比、岩石与界面或面与面对比。时间-空间图解^[6]是对地层剖面进行时间空间反演的最有效的方法(图2),极有助于对地质过程(时间+空间)的地层响应(岩石+界面)的理解,并有助于确定什么时候岩石对比岩石、岩石对比界面或面面相对以检验层序对比的可靠性。

由于基准面变化的地层记录是以多级次频率(多级次旋回)出现在区域范围内,可跨越各种沉积环境,因而以地层基准面识别为基础的地层对比不依赖于沉积环境,也不需要了解海平面的位置与运动方向。

2 应用举例

下面两个例子说明高分辨率层序地层分析既适用于海相沉积也适用于陆相沉积

2.1 海相地层分析

Cross 成因地层组建立的海岸平原-浅海相硅质碎屑岩的对比模式,说明体系域的体积划分及对比方法(图4)。由图4可以看出,伴随长期和短期基准面旋回发生的可容纳空间地理位置的迁移,在海岸平原-浅海相的不同地理位置沉积了不同的地层剖面。地层的加厚与减薄

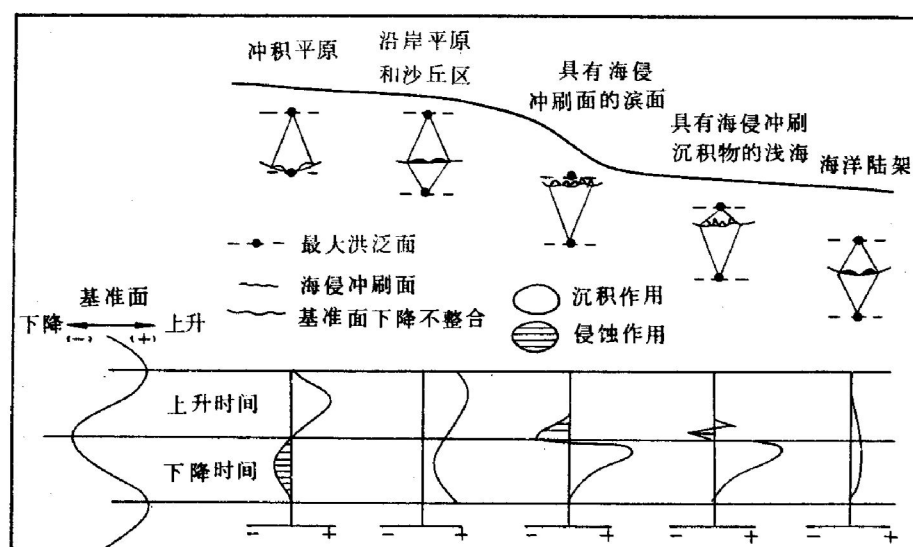


图4 基准面穿越旋回沿岸平原-浅海相域体积划分与旋回对称性的变化 (Cross, 1994)*

以及相序对称性是有规律可寻的。海岸平原沉积的垂向旋回在基准面上升时期加厚,在基准面下降时期减薄。厚度变化反映了可容纳空间与充填此空间的沉积物比值(A/S)的变化。就

* Cross T A. High-resolution stratigraphic correlation from the perspective of base-level cycles and sediment accommodation. 西北欧层序地层会议材料, 1994

旋回对称性而言,基准面上升期间冲积平原具“向上变深”的非对称旋回,基准面下降旋回通常表现为不整合。海岸平原位置同时发育基准面上升与下降组成的对称旋回,具有由“向上变浅”和“向上变深”相序组成的对称旋回。浅海滨面通常仅发育基准面下降时沉积的非对称的“向上变浅”的相序,而基准面上升时期以海侵冲刷面为代表。向海方向旋回的对称性增加。相序的对称性反映了基准面上升与下降旋回中,沉积物比值和沉积物所代表的时间与“面”所代表的时间比值的变化,与古地形关系较为密切。

图5为海岸平原-浅海沉积环境地层层序的堆积模式、厚度的时空变化以及层序地层对

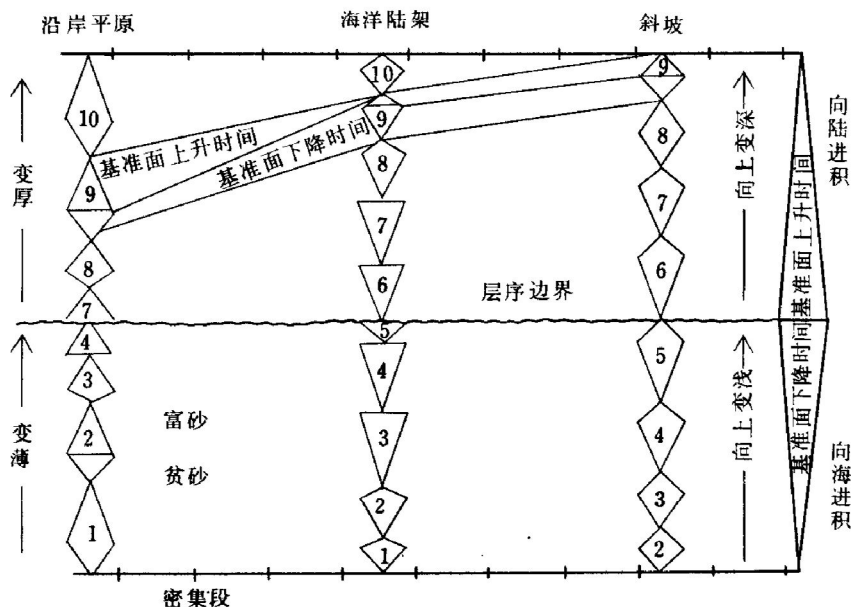


图5 浅海沉积环境成因地层动态对比概略图

(根据地层堆积样式及旋回对称性的对比)

比。由海岸平原经浅海陆架至斜坡位置,成因层序及组成该层序的相序随时间发生迁移。在基准面长期下降期间,尽管短期旋回具周期性变化特征,可容纳空间总的趋势是逐渐减小。随可容纳空间逐渐减小,浅海陆架旋回逐渐加厚,更多的基准面下降非对称旋回出现。当可容纳空间减小到接近或处于可容纳空间极小值时,旋回厚度减小,顶部为基准面下降不整合或沉积物路过时形成的非沉积作用面。海岸平原沉积则相反,旋回厚度逐渐变薄,并以非对称的基准面的上升旋回为主。从长期基准面下降到上升的转变,标志着另一时间幕的开始,但可容纳空间总的趋势是增加。随可容纳空间的增加,浅海陆架旋回由不对称到对称旋回,厚度逐渐减薄。而海岸平原旋回,对称性增加,厚度逐渐变大,基准面旋回上升与下降期间渐有更多的沉积物沉积和保存。

2.2 陆相地层分析

作者对美国中西部尤塔盆地南部始新统绿河组河流三角洲-湖泊相进行了高分辨率地层研究。特点很清楚,在地层基准面旋回中,伴随着可容纳空间与沉积物供应比的变化,相同的沉积环境,如三角洲、边缘湖泊及开阔湖泊,可发育不同的岩石类型、相序与相组合。在同一成因层序内,旋回特征也有明显规律可循。三角洲平原相主要为基准面上升时期形成的分支河道相和河道间沉积组成的不对称旋回;三角洲发育的湖泊边缘相,为基准面上升时期

堆积的分支河道相和下降时期的滨湖相或河口坝相构成的对称旋回。三角洲向浅水湖泊相方向,则表现为基准面上升期间形成的碳酸盐滩坝相和基准面下降期形成的泥坪相组成的对称旋回,向盆地方向主要由基准面下降时期浅水湖泊相非对称旋回组成(图6)。在盆地的不同

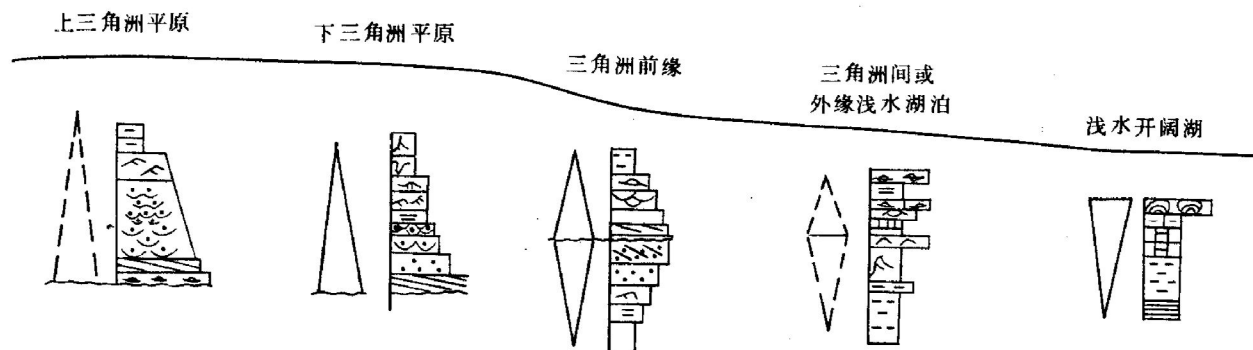


图6 尤塔盆地南部始新世河流三角洲-湖泊相域体积划分与旋回对称性变化

演化阶段,长期基准面旋回的地层结构、沉积模式、短期旋回的对称性、沉积相域的体积划分均有显著差异。进一步研究还证明,分支河道砂岩的孔隙度与渗透率的变化,也与其所属成因地层单元在长期基准面旋回中的位置有关(详文作者将陆续发表)。尤塔盆地始新统河湖相研究说明,可以根据成因地层的体积划分、堆积模式、旋回对称性及相分异原理,对湖相地层进行高分辨层序划分与对比。

3 结束语

海陆相地层的研究和实践都说明,Cross等在地层基准面、体积划分、相分异等基本原理基础上建立的高分辨率层序地层划分与对比技术,能有效地提高储层描述与储层模拟的合理性,因而提高储层预测的精度,指导油气勘探与开发。特别是:

(1) 根据成因层序之间的堆积模式与其在长期基准面旋回中的位置关系、成因地层单元内体积划分及其在相互叠置的短期地层旋回内的关系,可预测未知地区的相域分布与相特征。

(2) 根据具有时间意义的地层界面与流体流动单元岩石物理边界一致性的原理,高分辨率对比骨架可成为流体流动数值模拟的岩石物理模式,代替导致储层描述错误的相模式法。层序在基准面旋回中所处的位置与岩石物性具体的研究表明,成因层序岩石物理性质的时间变化也是可以预测的。

(3) 高分辨层序地层划分与对比,是变一维信息为三维信息,进行地层定量预测的基础。以海平面升降、构造运动、沉积物补给、沉积地形、岩石圈强度为基本参数,通过正演模拟建立地层数值模拟模型,并以正演模拟为基础,建立可以从有限地质资料(钻井、测井、露头)提取地层形成过程参数的反演地层模型,用以预测地层结构、储层分布,掌握地层的过程-响应动力学系统,并通过对油气田中流体运动规律的预测指导开发。

致谢:作者在尤塔盆地陆相地层高分辨率层序地层学研究中,得到曾在该盆地进行沉积相与石油地质研究的教授级高工钱凯老师的帮助,并承钱老师指出中国学者60年代起就在海岸动力学研究中对平衡剖面(可视为基准面特例)塑造理论有关重要贡献的事实,由此我想到,希望读者也能从中国学者的贡献中加深对高分辨率层序地层学的理解和运用。

参 考 文 献

- 1 Cross T A. Controls on coal distribution in transgressive - regressive cycles, Upper Cretaceous, Western Interior, U. S. A. In: Wilgaus C K, *et al.* Sea - level changes; An integrated approach. SEPM Special Publication, 42, 1988. 371~380
- 2 Vail P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy. Part 1; seismic stratigraphy interpretation procedure. In: Bally A W, ed. Atlas of seismic stratigraphy. American Association of Petroleum Geologists, Studies in Geology, 1987, 27: 1~10
- 3 Galloway W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I; architecture and genesis of flooding - surface bounded depositional units. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geologists*, 1989, 73: 125~142
- 4 Johnson J G, Klapper G, Sandberg C A. Devonian eustatic fluctuations in Euramerica, *Bull. Geol. Soc. America*, 1985, 99: 567~587
- 5 Embry A F. Transgressive - regressive (T - R) sequence analysis of the Jurassic succession of the Sverdrup Basin, Canadian Arctic Archipelago, *Can. J. Earth. Sci.* 1993, 30: 301~320
- 6 Wheeler H E. Baselevel, lithosphere surface and time - stratigraphy. *Bull. Geol. Soc. America*, 1964, 75: 599~610

A NEW SCHOOL OF THOUGHT IN SEQUENCE STRATIGRAPHIC STUDIES IN U. S. : HIGH-RESOLUTION SEQUENCE STRATIGRAPHY

Deng Hongwen

(China University of Geosciences, Beijing)

Abstract

When high-resolution sequence stratigraphy represented by T. A. Cross Genetic Stratigraphy Group of Colorado School of Mines was introduced to the public, it immediately drew the attention of academic circles. The practical effect in application is remarkable. This marks a new development in sequence stratigraphy. The high-resolution sequence stratigraphy introduced in this paper focuses on more accurate prediction of sedimentary mineral deposit, especially concrete objective of oil and gas exploration. The high-resolution sequence stratigraphy takes the stratigraphic and sedimentary process-response dynamic principles, including the principles of stratigraphic base level, volumetric partition, facies differentiation and rule for chronostratigraphic cycle correlation as its theoretical bases. The practice of hydrocarbon exploration and development has proved that the high-resolution sequence stratigraphy has significant importance in facies analysis, 3-D prediction of reservoir and the establishment of petrophysical model for fluid-flow numerical simulation.