

文章编号: 1001-6112(2008)03-0217-04

从层序地层学到地震沉积学

——全国第5届油气层序地层学大会综述

吴因业¹, 顾家裕¹, 施和生², 侯宇安¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中海油深圳分公司, 广州 510240)

摘要:层序地层学的发展及其在油气勘探开发中的应用, 表现出以下新进展: 1) 地震沉积学是继地震地层学、层序地层学之后的又一门新的边缘交叉学科, 但它是层序地层学和沉积学的发展而不是替代, 体系域表征、90°相位转换、地层切片和分频解释是目前地震沉积学中的几种常用技术。2) 层序地层学和地震沉积学在非构造圈闭精细勘探中得以广泛应用, 用于预测与层序及体系域演化密切相关的油气藏。3) 在湖盆沉积中, 发现了与强制海退体系域相似的强制湖退体系域。4) 海相碳酸盐岩的油气层序地层学研究得到了加强。5) 高频层序地层学、天文地层学及其古海洋事件—生物礁储层形成演化相关关系研究的成果对于油气勘探发现具有重要意义。

关键词:沉积体系; 体系域; 岩性油气藏; 非构造圈闭; 地震沉积学; 层序地层学

中图分类号: TE121.34

文献标识码: A

FROM SEQUENCE STRATIGRAPHY TO SEISMIC SEDIMENTOLOGY

—SUMMARIZED FROM THE 5TH CONGRESS OF OIL AND GAS SEQUENCE STRATIGRAPHY

Wu Yinye¹, Gu Jiayu¹, Shi Hesheng², Hou Yu'an¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

2. Shenzhen Oil Company, CNOOC, Guangzhou, Guangdong 510240, China)

Abstract: The advantage of sequence stratigraphy and its application in oil and gas exploration and development appeared in these aspects as follows: (1) Seismic sedimentology is a new marginal and cross subject after seismic stratigraphy and sequence stratigraphy. It is a development of sequence stratigraphy and sedimentology, but not a substitute. There are several common techniques named characterization of systems tract, 90° phase transformation, strata slice and the seismic spectral decomposition technology. (2) Application of sequence stratigraphy and seismic sedimentology in fine exploration of non-structural traps mainly shows prediction of oil and gas pools related with evolution of sequence and systems tract. (3) The forced regressed systems tract were discovered in lacustrine basin, similar to marine basin. (4) Study on oil and gas sequence stratigraphy in marine carbonate rocks were strengthened. (5) Results of high-frequency sequence stratigraphy, astronomical stratigraphy and palaeo-oceanography events as well as formation and evolution of biological reef reservoirs play an important roles in oil and gas exploration discovery.

Key words: depositional system; systems tract; lithological oil pools; non-structural trap; seismic sedimentology; sequence stratigraphy

层序地层学和地震沉积学在非构造圈闭精细勘探中的应用越来越广泛深入, 在中国成熟盆地及全球油气资源的勘探开发中已经显示出它的重要

性。以拥有丰富油气资源的南美洲为例, 委内瑞拉的东委内瑞拉盆地和马拉开波盆地是世界上重要的含油气盆地之一, 目前探明的储量和产量均位于

收稿日期: 2008-02-03; 修订日期: 2008-04-10。

作者简介: 吴因业(1964—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事油气层序地层学和沉积储层研究。E-mail: wyy@petrochina.com.cn。

南美洲各个盆地的前列;勘探的成熟度相对较高,产油已有百年的历史,但是根据石油地质特征分析,它们仍具有相当的勘探和开发的潜力^[1];岩性对圈闭的形成起着重要作用,今后在层序地层学和地震沉积学研究以及三维地震部署和储层预测的基础上,开展非构造圈闭的勘探,必然会有新的发现。

1 从层序地层学到地震沉积学

地震沉积学是应用地震信息研究沉积岩及其形成过程的学科,它是继地震地层学、层序地层学之后的又一门新的边缘交叉学科。其理论基础在于对地震同相轴穿时性的重新认识,但它是层序地层学和沉积学的发展而不是替代,地震沉积学研究要以地质研究为基础,在沉积学规律的指导下进行。体系域表征、90°相位转换、地层切片和分频解释是目前地震沉积学中的几种常用的技术^[2~5]。

2005年2月,在美国休斯敦召开了地震沉积学国际会议,说明地震沉积学作为一门新的学科越来越受到人们的关注。但是,由于地震分辨率和研究手段的限制,地震沉积学还没有形成一套系统的理论体系,国内近几年虽然广泛开展利用地震进行沉积相、地层岩性识别的研究,但还没有出现有关地震沉积学的系统研究。因此,地震沉积学研究一方面显示出了它的优势和广阔前景,同时也正需要我们去不断发展它的理论和关键技术。在目前技术条件下,地震沉积学的研究只局限于地震岩石学、地震地貌学、沉积结构和沉积史研究。

Brown等^[6]首先阐明,通过三维地震的水平地震成像可以产生高分辨率的沉积相图像。自20世纪90年代起,大量研究证实地震地貌学是沉积成像研究的有力工具。地震地貌成像是沿沉积界面(地质时间界面)提取振幅,反映地震工区内沉积体系的展布范围。这样的地震切片称为地层切片,这与1996年Posamentier提出的等比例切片比较类似。例如在Tiger沿岸地区做的地层切片,利用研究区内3口井的井点位置的沉积相与地震振幅的关系建立起沉积相与地震相的对应关系,通过这种标定可以在切片中清楚地识别出中新统上部三角洲沉积体系的平面展布。

地震沉积学与地震地层学的最大不同在于,它认识到地震同相轴既不简单的反映等时界面也不单纯反映岩性界面,而是受到地震资料频率的控制,不同频段的地震数据反映的地质信息是不同的。低频资料中反射同相轴更多的反映岩性界面

信息,而高频资料中反射同相轴更多的反映等时沉积界面信息。

2 层序地层学和地震沉积学的应用

对于非构造圈闭,早期以隐蔽圈闭(subtle trap)的术语出现,它的含义人们有2种理解:一是认为隐蔽圈闭油气藏指的是非构造类型的,在沉积过程中形成的岩性油气藏、地层不整合或地层超覆油气藏以及古地貌油气藏等。就是说在一个含油气盆地受古构造条件、古地貌条件以及盆地地质历史演化所控制的岩性变化和某些地层接触关系所形成的圈闭油气藏。这一说法给予了地质科学上的某种含义。二是认为隐蔽圈闭油气藏是指采用目前通用的勘探技术和方法找不到的油气藏,将各种岩性、地层超覆、地层不整合、古地貌油气藏,以及深层构造油气藏、逆掩断层下盘油气藏统统包括在内。这种说法偏向于勘探技术水平或勘探达到的程度。表现为2点共识:一是非构造因素的主导作用;二是识别和描述上的难度。

吴因业等^[7]给出了非构造圈闭油气藏定义:通过沉积作用、成岩作用等形成的非构造圈闭,在一定构造背景和成藏条件下形成的与层序演化密切相关的油气藏,它包括岩性油气藏、地层油气藏和构造—岩性地层的复合油气藏。层序地层学与非构造油气藏圈闭之间具有密切关系。层序地层学通过不同规模层序的划分、体系域的识别,使油气与各体系域中的沉积体在时间序列上的演化和空间配置有规律地联系起来。通过层序地层学和地震沉积学的详细研究,可以使非构造圈闭的油气预测更为有效。

例如,在本次大会上,张忠涛等对珠江口盆地番禺低隆起高精度层序地层及非构造圈闭进行了研究,通过对研究区第三系中新统地层高精度层序地层学的系统分析,将该区珠海组—粤海组地层分为15个三级层序,在此基础上,在珠江组至韩江组各三级层序内追踪海泛面划分出高精度的四级层序地层单元(准层序组或体系域)共27个。详细描述了主要三级层序界面结构特征和识别标志,重点分析了层序—体系域的模式及控制因素,认为该区具有良好的非构造圈闭勘探潜力,层序地层边界和坡折带是控制该区非构造圈闭形成的重要因素。另外,概括出6种潜在的非构造的发育模式,分析了其在体系域中可能的发育位置,为非构造圈闭的勘探指明了方向。

3 强制湖退体系域和强制海退体系域的应用和发展

在 Van Wagoner 等^[8]的早期层序地层学概念中,体系域被定义为一连串同期的沉积体系。他们将层序划分为 I 型层序(包括低位、海侵和高位体系域)和 II 型层序(包括陆架边缘、海侵和高位体系域)。但随着层序地层学的应用推广到被动边缘以外的地区,这些概念术语和地层模式都有了变化,如 II 型层序的概念已基本被废弃,而强制海退的沉积模式被提出来了。根据以往的概念及对现代和古代沉积物的研究,可识别出 2 种海退,即正常海退和强制海退。海平面的相对变化受到可容空间及沉积物供给量的影响,有足够多的沉积物进入海岸体系占据整个现有的容存空间,它可发生于相对海平面静止或上升期,为正常海退。在加速下降时期,可能没有沉积于斜坡上的滨面准层序而只发生河道下切,这种相对海平面下降期的海退称为强制海退。

在强制海退情况下的缓坡边缘上,相对海平面下降期间没有过路沉积物被输送到盆底。相反,沉积物可能被沉积为一组逐级下降的前积楔,这就是所谓的强制海退楔体系域(forced regressive wedge systems tract),简称强制海退体系域。这些海退楔常富含砂,可形成有吸引力的被页岩封隔的地层圈闭。Posamentier 等^[9]提供了强迫海退即缓坡边缘上相对海平面下降的许多例子;国内也在塔里木盆地满西区块发现了强制海退体系域,并在油气勘探中得到了应用^[10]。

在湖盆沉积中,也发现了与强制海退体系域相似的强制湖退体系域。例如在辽东湾盆地南部东营组二段,发育一套具有明显斜交前积结构,通过对其钻井资料的精细沉积作用研究、三维地震的综合解释、特别是高分辨率层序地层格架建立和分析,发现是由强制湖退沉积引起。区域内发育 3 个三角洲沉积体,具有典型的斜交前积反射结构而与正常湖退三角洲的 S 形前积反射有明显的差异。三维地震的精细解释可以看到 6 个三角洲前积体的叠覆,其沉积体的顶积层不发育,还可以发现一系列的下切谷,这与典型的强制海退沉积过程和表现特征可以对比。强制湖退沉积体具有良好的油气成藏条件。

4 海相碳酸盐岩层序地层学研究

由于碳酸盐岩沉积作用对海平面变化具特有的敏感性,台地类型存在多样性,因此碳酸盐岩沉

积背景下的三级层序界面识别应在考虑海平面变化阶段、海平面下降幅度和台地暴露程度等基础上,综合利用露头、地震、测井、岩心、成岩等标志来正确识别划分层序界面。

尽管碳酸盐岩沉积作用机理明显不同于硅质碎屑岩,但起源于被动大陆边缘硅质碎屑岩沉积的层序地层学原理仍适用于碳酸盐岩的层序地层分析,即碳酸盐岩层序地层样式和岩相分布受构造沉降、全球海平面升降变化、沉积物的供给和气候等 4 个主要变量控制。

随着海平面相对升降周期性变化,形成了具有特定地层叠置样式的碳酸盐岩地层组合序列。由于碳酸盐岩的沉积过程和沉积方式除了受海平面升降变化、构造沉降速率以及气候等因素影响外,还受盆地水体性质、生物种属类型和数量以及盆外沉积物供给多少的影响,因此,碳酸盐岩层序地层叠置样式就表现出多样性和复杂性的特点。加之碳酸盐岩成岩后生变化比碎屑岩的成岩后生变化更复杂,从而增加了人们确定或预测有利碳酸盐岩储集层及寻找有利勘探区带的难度。为了更好地将碳酸盐岩层序地层学的研究成果用于指导油气勘探,就应该根据碳酸盐岩层序地层概念性模型,结合含油气盆地勘探现状和资料特点,采用适宜的工作思路和勘探方法,才能明确有利的油气勘探目标^[11]。

本次会议中,徐中波等基于层序地层学理论,综合利用露头、地震、测井、岩心、成岩等多方面的资料识别了普光气田研究区的层序界面,并据此建立普光气田精细层序格架,预测储层分布规律,指导了研究区的油气勘探。何莹等运用海相碳酸盐岩层序地层学及沉积学原理,结合野外露头层序调查和覆盖区钻井、测井及地震等资料的分析,根据层序界面组成、特征、识别标志及形成机理等因素,将四川盆地通南巴地区的上二叠统一下三叠统地层划分为 8 个三级层序、2 个二级层序。在建立等时地层格架的基础上,对该区上二叠统一下三叠统台盆的沉积充填结构和有利储层发育层位进行了刻画,为该区下一步勘探部署指明了有利方向。

另外对于海相碳酸盐岩不同的学者从不同的角度给予了研究,这都将对海相碳酸盐岩的油气勘探起到重要的推动作用。许建华等根据羌塘盆地的勘探现状,综合使用定量和定性数据,使用“权重”储层分析方法对羌塘盆地侏罗系碳酸盐岩储集层进行分析和评价。选择影响储层性质的 8 种参数,包括定性参数(如岩石类型、成岩相类型、储集空间类型)和定量参数(如厚度、孔隙结构、孔隙度

和渗透率),对其进行单因素评价。在此基础上,根据各单因素对储层贡献的大小,确定各单因素的加权系数。最后,利用“权重”分析方法,计算各剖面的“权重”指数,从而对储层进行综合评价。评价结果表明,有利储层主要发育于中侏罗统布曲组,分布于北羌塘坳陷盆地东北部和中央隆起带北缘。陈永权等对塔里木盆地发育的厚层寒武系—奥陶系白云岩进行了系统划分,并对不同类型白云岩碳、氧同位素特征进行了初步研究。

5 高频旋回层序和天文地层学

高频层序地层学及其古海洋事件—生物礁储层形成演化相关关系研究的成果对于油气勘探发现具有重要意义。许红对南沙北康盆地新近系碳酸盐岩—生物礁进行了高分辨率层序地层学研究,建立了生物礁高精度层序地层格架,提出了高频层序—体系域演化模式;通过南海—地中海新近纪古海洋事件—生物礁储层演化对比研究,指出南海海域自早中新世成礁以来,生物礁储层系列孔渗性能发生巨大变化。通过 L 礁阿吉普 AL-1X 井中中新统生物礁井段研究,Andrew 等(1985)引用 Vail^[12]全球海平面变化曲线确定了 5 个海平面升降旋回。1996 年,秦国权根据珠江口盆地百余口油气钻井微体古生物分析结果,确定其间存在 7 个这样的旋回;同时指出并证实南海北部早中新世至中中新世末有过 10 次这样的过程,该结果与 Haq^[13]全球层序旋回曲线揭示早中新世至中中新世末存在 9 次海平面升降旋回接近。

在旋回地层学基础上,提出了天文地层学的术语。天文地层学把地质时间和天文因素相联系,应用连续沉积物的特性,求出由于响应天文轨道周期因素的地层变化规律,进行高分辨率的地层划分与对比^[14]。国际上,也已经提出了天文年代表(astronomical time)的概念^[15]。

6 精细层序地层对比及其应用

我国的油气勘探开发中,陆相盆地层序地层学分析占有举足轻重的位置。有关陆相盆地层序地层学特征,国内外众多地质专家做了大量的工作,发表了一系列研究成果^[12,13,16,17]。国外的 Shanley 和 McCabe, Van Vagoner 等^[8]对加拿大近海、犹他州等内陆盆地的陆相冲积层进行了详细研究;国内则出现了百家争鸣的局面,大致分为“类海相派”、“单一派”、“构造派”和“综合派”等。在已有的研究成果中,各学派对陆相盆地层序地层的控

制因素、层序界面的识别和层序级次的划分等进行详尽细致的研究。运用 Cross^[18]倡导的高分辨率层序地层学理论和方法,以陆相层序地层中较为常见的冲积扇、河流、三角洲及湖泊等 4 种沉积体系为例,通过对基准面和洪泛面的识别和研究来指导油气田的勘探和开发^[19~21]。

基准面旋回观点不但广泛应用于油气勘探阶段,在油藏开发阶段乃至开发中后期的小层调整、井网完善等方面也发挥着越来越重要的作用。但地质学家对基准面概念的理解不尽相同,目前主要有 2 种观点。部分人认为基准面为地貌学上的平衡剖面,如 Bates 和 Jackson 认为基准面为理论上的最低面。而另一部分人则认为基准面为分隔沉积作用和侵蚀作用的理论均衡面,在该面之上沉积物不能停留,该面之下可能发生沉积和埋藏作用。Wheeler 第一次明确地从地层保存作用出发来认识基准面,并赋予其时间意义。他提出在基准面变化的时间域内,可供沉积物堆积的可容纳空间也在不断变化,并由此导致沉积物的保存、剥蚀、过路不留和非补偿等地质作用的发生。Cross 发展了 Wheeler 关于基准面的含义,明确提出:基准面是一个势能面,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,地表则需要不断地通过沉积或侵蚀作用改变其形态,并向靠近基准面的方向运动。在这个位置上,地形梯度、沉积物供应和可容纳空间是平衡的。海平面、构造沉降、沉积物补给、沉积负荷补偿、沉积压实、沉积地形等地质过程变量的变化均会导致基准面的变化,进而控制层序发育特征。因此,基准面处于不断的运动中。当基准面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搬运沉积物质的地质过程。

大多数油田处于开发中后期,油田地质的研究程度、生产资料的掌握程度、油田开发生产的合理性、习惯性等诸多因素都决定了应用科学的研究方式、手段和规范。以基准面旋回为基础的高分辨率层序地层学在如何与油田开发生产相结合,尤其是如何解决层序划分与开发层系之间的矛盾方面有所创新。

致谢:感谢在全国第 5 届油气层序地层学大会上提交论文进行交流的徐道一、徐强、许红、贾达吉、董春梅、许建华和张忠涛等广大专家、学者,他们的学术思想为本文奠定了基础。也感谢石油实验地质主编叶德燎先生和编辑部同志们的大力支持。

(下转第 226 页)

- 石油,2003,23(增刊):13~20
- 2 顾惠荣,贾健谊,叶加仁. 东海西湖凹陷含油气系统特征[J]. 石油与天然气地质,2002,23(3):295~306
 - 3 赵艳秋. 东海西湖凹陷油气成藏地质认识[J]. 海洋地质动态,2003,19(5):20~24
 - 4 朱 夏,陈焕疆. 中国大陆边缘构造和盆地演化[A]. 见:朱夏编. 朱夏论中国含油气盆地构造[M]. 北京:石油工业出版社,1986. 87~93
 - 5 江兴歌,何将启,陈拥锋. 东海西湖凹陷平湖组油气运移特征模拟分析[J]. 石油实验地质,2003,25(增刊):614~620
 - 6 张忠民,周 瑾,邬兴威. 东海盆地西湖凹陷中央背斜带油气运移期次及成藏[J]. 石油实验地质,2006,28(1):30~33

(编辑 韩 或)

(上接第220页)

参考文献:

- 1 叶德燎,徐文明,陈荣林. 南美洲油气资源与勘探开发潜力[J]. 中国石油勘探,2007,12(2):70~75
- 2 吴因业,宋 岩,贾承造等. 柴北缘地区层序格架下的沉积特征[J]. 地学前缘,2005,12(3):195~203
- 3 Zeng Hongliu, Tucker F Hentz. High-frequency sequence stratigraphy from seismic sedimentology: applied to Miocene, Vermilion Block 50, Tiger Shoal area, offshore Louisiana [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(2): 153~174
- 4 董春梅,张宪国,林承焰. 地震沉积学的概念、方法和技术[J]. 沉积学报,2006,24(5):698~704
- 5 陆永潮,杜学斌,陈 平等. 油气精细勘探的主要方法体系:地震沉积学研究[J]. 石油实验地质,2008,30(1):1~5
- 6 Brown A R, Dahm C G, Graebner R J. A stratigraphic case history using three-dimensional seismic data in the Gulf of Thailand [J]. Geophysical Prospecting, 1981, 29(3): 327~349
- 7 吴因业,顾家裕. 油气层序地层学[M]. 北京:石油工业出版社,2002. 33~152
- 8 Van Wagoner J C, Posamentier H W, Mitchum R M, et al. An overview of the fundamentals sequence stratigraphy and key definitions[A]. In: Sea-Level Changes: An Integrated Approach [C]. SEPM Spec Pub 42, 1988. 39~46
- 9 Posamentier F L W, Allen G P, Jamses D P. High resolution sequence stratigraphy: the East Coulee Delta, Alberta [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1992, 62 (2): 310~317
- 10 吴因业,孙龙德,顾家裕等. 塔里木盆地满西地区石炭系东河砂岩沉积层序分析与储集层评价[J]. 古地理学报,2008,10(1):13~24
- 11 朱筱敏. 层序地层学原理及应用[M]. 北京:石油工业出版社,1998. 48~69
- 12 Vail P R, Mitchum R M Jr, Todd R G, et al. Seismic stratigraphy and global changes of sea level[A]. Payton C E, ed. Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration, AAPG Memory 26[C]. Tulsa: AAPG, 1977. 49~21
- 13 Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea-levels since the Triassic[J]. Science, 1987, 235: 1153~1165
- 14 徐道一,韩延本,李国辉等. 天文地层学的兴起[J]. 地层学杂志,2006,30(4):323~326
- 15 Rio D, Silva I P, Capraro L. The geological time scale and the Italian stratigraphic record[J]. Episodes, 2003, 26(3): 259~263
- 16 庄 丽. 东营凹陷永安镇三角洲层序地层与沉积体系[J]. 石油实验地质,2006,28(6):544~548
- 17 陶维祥,何仕斌,赵志刚. 琼东南盆地深水区储层分布规律[J]. 石油实验地质,2006,28(6):554~559
- 18 Cross T A. High-resolution stratigraphic correlation from the perspective of base-level cycles and sediment accommodation [A]. In: Proceedings of Northwestern European Sequence Stratigraphy Congress, 1994. 105~123
- 19 邓宏文. 美国层序地层研究中的新学派:高分辨率层序地层学[J]. 石油与天然气地质,1995,16(2):89~97
- 20 李凤杰,王多云,王 峰. 坳陷湖盆三角洲前缘储层砂体成因研究[J]. 石油实验地质,2007,29(1):63~68
- 21 Wu Yinze, Hou Yu'an, Guo Bincheng, et al. Sequence Stratigraphy of Palaeogene in the HGZ Area of Qaidam Basin[J]. Petroleum Science, 2007, 4(3): 14~21

(编辑 徐文明)