

世界石油工业 关键技术专题研究

2003



CNPC

中国石油集团经济技术研究中心

目 录

层序地层学分析应用技术	1
油藏管理的关键技术——四维地震监测技术	13
新型决策系统——虚拟现实可视化技术	25
过套管电阻率测井技术	35
套管钻井技术	55
高温高压井及复杂深井钻井技术	81
分支井开采技术	90
水平井开采技术	106
胶态分散凝胶调驱技术	131
高含水期生产油水分离工艺及处理技术	150
柴油深度脱硫技术	169
催化裂化汽油深度脱硫技术	196

层序地层学分析应用技术

层序地层学是 20 世纪后期出现的沉积学和地层学的重大进展,被誉为地层学的一次革命,它是沉积学、地层学与地球物理学科交叉、渗透的结果。层序地层学把地质学和沉积学完美地结合在一起,从时空四维空间动态地解释了沉积地层的发生、发展过程,为寻找与沉积有关的矿藏提供了科学的指导思想和技术手段,尤其在油气勘探开发中发挥了重要的作用。

一、层序地层学研究现状

1. 回顾

1948 年 Sloss 提出层序作为一种以不整合为边界的地层单位。克拉通层序为层序地层学奠定了基础,但 Sloss 的观点在 20 世纪 50~70 年代初已被少数人所接受。

当 P. R. Vail、R. M. Mitchum、J. B. Sangree 等人的地震地层学理论在美国石油地质学家协会专刊第 26 号(1977 年)上发表后,层序地层学便进入了一个重要发展时期。Jervay(1988 年)提出的新的实用模型扩展了地震地层学的应用范围,并且用它来解释地震可分辨的地层模型。1980 年以后,识别出 I 类层序低水位体系中的盆底扇、斜坡扇、低水位前积三角洲、深切谷充填。

1983 年,美国 Exxon 公司的地层分析超出了对准层序的研究,并进一步发展到对测井、岩心和露头中硅质碎屑岩层序和体系域的分析。这代表了超越地震地层学的一个重要阶段。随着硅质碎屑岩层序、碳酸盐岩相和以层序为标志的生物地层学等的积累以及与地震地层学方法的结合,产生了现在被称为“层序地层学”的地层学和沉积相分析的系统及方法论。

20 世纪 90 年代,层序地层学的概念和方法逐渐形成完整体系并已成为油气勘探中广泛应用、被国际上许多著名油公司作为一种权威性的技术。以最大的跨国石油公司 Exxon 为例,从盆地分析到圈闭的成因解释,从油藏描述、数值模拟到后续动态模拟,从勘探开发各个阶段的软件开发到油藏管理,都直接或间接地应用到层序地层学的理论、方法或研究成果,甚至还以已知油气藏与层序地层的关系为基础研制层序地层与成藏模式,指导新区的勘探开发。

2. 层序地层学国外研究应用现状

(1) 高精度层序地层学在油气勘探开发中得到广泛应用

随着全球油气资源勘探的逐渐深入,世界寻找油气田的勘探难度逐渐增大,勘探复杂性日趋增加。在长期勘探与开发的盆地中,构造油气藏的寻找日趋困难,隐蔽油气藏

的勘探已逐渐提到议事日程上来。在这种形势下,石油地质学家迫切需要新的理论与技术提高地层划分与对比的精度,掌握地层分布特征,增加地层预测的精确性和准确性,为储层预测和隐蔽油气藏勘探提供科学依据。油藏工程师则要求建立高精度的地质模型,开展精细油藏描述,搞清油气水层和剩余油分布规律以提高油藏采收率。由此,测井处理与分析技术、三维地震勘探技术、高分辨率地震勘探等地球物理勘探的新技术与新方法不断涌现,借助于这些新技术,高分辨率层序地层学分析的理论和技术不断发展,在地层记录中可识别出的层序的分辨率也越来越高。

这就是以美国科罗拉多矿业学院 T. A. Cross 教授为代表的、以地层过程—响应动力学原理为指导、以基准面旋回为参照格架的高分辨率层序地层学理论与分析技术。高分辨率层序地层学是以露头、测井、岩心和三维高分辨率地震反射资料为基础,以高分辨率层序地层理论为指导,运用精细地层划分和对比技术,建立区域、油田乃至油藏级高精度地层对比格架,在成因地层格架内对地层,包括生油层、储层和隔层进行评价和预测的一项理论和技术。该项理论与研究方法不仅可用于盆地地层格架的建立,同时由于它将层序地层学与沉积学理论和分析方法紧密结合起来,对于高分辨率层序地层格架的建立更有其明显的适用性和可操作性。其表现在:①基准面是控制地层形成的不同地质过程的综合反映,不需要以海平面为参照面,因此可以同时运用于海相盆地和陆相盆地;②该项技术将层序地层学与沉积学相结合,以相互标定的岩心、测井与高分辨率地震资料为基础,依据可容纳空间和 A/S 值的变化趋势识别基准面旋回界面,因而各级次、不同性质的基准面旋回均具有可识别性,在缺乏不整合发育的地层中,根据沉积作用的转换即可识别高频时间界面,因此可以进行高分辨率层序地层划分;③基准面旋回内部相域构成的二分特征在不同沉积环境,不同级次的层序中是客观存在的,基准面变化过程中相域的构成是由特定的沉积背景与沉积环境所决定的,不一定符合被动大陆边缘受海平面控制的三分(低位、海进、高位)地层模式。

高分辨率层序地层学的发展就是层序地层学面向精细化、精确化和定量化发展的体现。当前,层序地层学的研究不断从盆地规模的层序地层和体系域分析向储层规模的高分辨率层序地层学的方向深化,层序地层学的概念和方法可应用于从盆地到储层的各种规模的沉积充填分析,以满足减小日益增长的隐蔽油气藏的勘探风险、优选开发方案及剩余油分布预测等的需要。

(2) 层序地层学在发展的过程中形成了多种学派

以 Cross 为首的科罗拉多学派出现以前,美国经典层序地层学派中大致有 3 种层序划分方法。其一是以 Vail 为代表,以地层不整合或可与该不整合对比的整合界面为层序的边界;主要利用地震资料来解释地震地层,通过地震反射确定界面(沉积面或侵蚀面)的形态和分布,再根据在层序内与层序不整合界面的关系来解释沉积体系与沉积体系域;特别强调全球海平面变化是层序发育的主控因素。其二是以 Galloway 为代表,采用最大洪泛面及其对应的沉积间断面作为层序的边界;主要利用井的资料来进行沉积体系分析,在确定的三维相格架内分析寻找层序界面,特别强调层序是在相对基准面或构造稳定时期沿盆地边缘沉积的一套沉积物组合,考虑了沉积旋回产生的 3 个变量,而且认为陆架边缘和斜坡上的侵蚀作用是一个不断发生的过程,受多种因素控制。其三是 Johnson 为代表,采用地层不整合或海进冲刷不整合为界面的海进—海退旋回,即从一个(海水)加深

事件到另一个具同等规模的加深事件开始之前的一段时间内沉积下来的岩层。上述3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沉积相分布的内在机制。

高分辨率层序地层学是美国科罗拉多矿业学院T.A. Cross教授1994年创导的一个新的层序地层学派。该理论体系以地层过程——相应沉积动力学为理论基础,其研究的核心内容为基准面旋回变化过程中,由可容纳空间与沉积物补给量比值(A/S)的变化所控制的相同沉积体系域或相域中发生沉积物体积分配作用、沉积物的保存程度、地层配置关系和堆积样式、相构型组合和岩石类型及其沉积—成岩组构的变化过程。其技术关键为识别地层记录中不同成因类型的界面和不同级次的地层基准面旋回,确定二分时间单元分界面,即基准面旋回相转换面为时间—地层对比的优选位置,以及建立高分辨率等时地层对比方案和以等时界面为框架的层序地层格架。

(3) 层序地层学在碳酸盐岩中得到应用

由地震地层学发展而来的层序地层学,其基本概念已广泛地用于硅质碎屑岩沉积体系。碳酸盐层序地层研究在很大程度上借鉴硅质碎屑岩的层序模式。目前碳酸盐岩沉积层序已作为研究碳酸盐岩的应用技术和预测工具。利用Exxon硅质碎屑沉积层序地层模式有助于解释碳酸盐沉积层序的发育与演化。然而必须看到Exxon模式是以沉积物来源盆地之外,物质的输入是由河流及三角洲体系排水入盆的。因此,碳酸盐岩层序地层不能仅仅沿袭Exxon的碎屑岩层序模式,应该从成因的角度、从海水的进退、从台地的淹没与暴露、从物源与扩散方式、从台地的发育、演化及消亡等方面进行分析。

3. 我国层序地层学研究应用现状

层序地层学自20世纪80年代中后期引入我国,层序地层学的发展在我国曾经几度沧桑。20世纪80年代,层序地层学曾被当作最先进的找油理论广泛应用,一段时间之后便逐渐被冷落了。经过十多年的认识与实践,其理论和研究方法已逐渐被我国大多数地质学家所接受。从概念和含义上讲,层序地层学隶属于现代地层学的范畴。现代地层学包括许多分支学科,这些学科的理论基础和研究内容不尽相同,但有一个共同点,即力图提取地层记录中能反映其沉积环境的物理、化学和生物等方面的信息,以便开展年代或时间地层划分与对比,因此现代地层学又可称为时间地层学或年代地层学。层序地层学也正是通过年代地层格架的建立来研究和解释地层的展布样式的。但从学科所依据的理论基础和其研究内容来看,层序地层学已远远超过了地层学所涉及的范畴。层序地层学将年代地层学与现代沉积学、全球海平面升降结合起来,通过等时地层格架的建立,在时间地层单元内进行地层充填结构和展布样式的研究,在盆地油气勘探和开发领域,包括盆地沉积演化史分析、地层与储层预测、隐蔽油气藏的勘探以及油气藏描述等方面均取得了成功。因而,层序地层学不仅变革了传统地层学和沉积学的理论,而且已成为一门能够指导油气勘探的应用学科。在石油和天然气工业强大生产力的推动下,层序地层学作为地层学的新的分支学科正在不断发展、完善。在认识与实践的反复过程中,层序地层学的不同学派也正在逐渐形成。

目前我国石油地质界广泛接受并运用的多是以Exxon公司Vail等人为代表的、以

地震地层学为基础、以海平面升降旋回为主控因素的经典层序地层学理论及其分析方法。已出版的关于层序地层研究方面的著作或论文也多涉及的是该学派的理论与应用。经典层序地层学强调以三级“层序”，即以不整合面或与其可对比的整合面为界的、相对整合的、彼此成因上有联系的一套地层为基本研究对象。因而特别强调不整合面在层序划分中的作用。在层序地层构成分析中也多参照在海相被动大陆边缘建立的低水位体系域、海进体系域、高水位体系域三分的层序地层模式。在不整合发育的盆地区域的地层格架的建立中，Vail 等人的层序地层学理论与研究方法有其显著的适用性和可操作性，其层序地层模式也有可对比性。

4. 层序地层学研究新进展

当前，层序地层学已经成为国际地质科学研究的热门话题，1989 年以来的历届 AAPG 年会上它都成为重要的研究内容，这充分展示了它在理论上、实际上以及在研究的深度和广度上所取得的长足进展。在石油勘探领域，这一新理论体系及方法的应用取得重要的成就，并为储集砂体的预测带来挑战性的变化。特别是低水位体系域底界面上的深切谷充填砂体的预测和发现，如阿莫科石油公司根据层序地层学研究成果，在波弗特海和阿拉斯加发现了新的靶区。在尼日尔三角洲地区应用墨西哥湾盆地的模式和经验，在新的钻井、测井资料的基础上完成了一系列层序地层大剖面，从而发现了丰富的有经济价值的油气圈闭。因此，前 AAPG 主席 P. Weimer 指出，层序地层学应用以来最重要的找油新领域之一是层序界面上的谷地充填砂体。此外，我国部分研究者已经开始把这一理论用于沉积和层控矿床的研究和预测上，并取得一定效果。

这些进展主要表现在以下几个方面：

(1) 在层序地层学的基本理论研究方面主要有：对北美—西欧及其它典型露头地区进行细致的层序地层分析，对碳酸盐岩层序地层以及混积岩的层序地层的深入研究，对于高频旋回的地面及地下分析(高分辨率层序地层学研究)，对海平面的认识和精确计算(全球性海平面变化曲线)，以及湖相盆地的层序地层学研究等方面，都有长足的进展。在被动大陆边缘条件下，沉积层序的计算机模拟也取得了很大的进展。层序地层学的思路和方法，也正在不同类型的盆地中加以应用，并证明其有效性。这些盆地既包括被动大陆边缘盆地，也包括活动大陆边缘盆地，既有伸展盆地，也有挠曲盆地。

(2) 一些新的研究方法正被引入到层序地层学的研究中来。Kauffman(1991年)等人提出的包括物理事件、化学事件、生物事件和复合事件的高分辨率事件地层学的概念和方法，为层序地层学分析的年代及地层学研究提供了新的思路。与之相近的 Moutanri 的综合地层学方法，以及古生态学和埋藏学也被引入。Kominz 及 Boud 利用伽马方法较准确地测定了更新统及白垩系旋回沉积中的米兰科维奇旋回，进一步证实了旋回沉积中时间的相对性和旋回的周期性这一假说。Edwards (1986年) 提出，用高精度的 TIMS 铀系统(^{230}Th — ^{234}U)年龄测定方法来研究海平面的变化。另外，还有运用地球化学进行地层及层序研究，应用层序地层学方法研究生油岩，应用层序地层学进行泥质岩层序地层分析，使用计算机沉积模拟层序进行层序地层学分析，成岩作用与层序地层研究相结合等等，这些方法的引入进一步充实和完善了层序地层学的理论系统。

(3) 促进了相应学科发展，形成一些新学科分支。这方面表现最为突出的是在沉积相

的研究方面, James 和 Walker 在其《沉积相模式》的第三版中(1992 年), 按照海平面变化控制沉积相及相模式的思路, 重新改写了这一名著。1993 年, 由 Posamentier 等人主编的《层序地层学与相分析》也是在这一思想的影响下完成的。此外, 以层序地层学为生长点, 一些新的学科分支正在出现, 如 Akihiro Kano 的《成岩层序地层学》、Braithwaite(1993 年)的《胶结物层序地层学》等。

二、层序地层学的技术原理和基本应用

层序地层学具有两个重要的研究内容, 一是建立了全球海平面变化的对比框架; 二是在等时的层序地层格架中进行沉积体系域的分析 and 预测。尽管关于全球海平面变化问题在国际上引起了多年的广泛争议。但通过建立层序地层格架进而在等时的地层格架中进行沉积体系分析的方法得到了空前的应用和发展, 对盆地沉积充填分析和油气勘探产生了深刻的影响。

从本质上说, 层序地层学分析提供了划分层序和体系域等时间地层单位及生物地层单位组成的地层格架, 这些层序和体系域与特定的沉积体系、岩相和油气分布有密切关系, 并形成于与海平面相对变化有关的基准面变化(图 1)。而这些变化表现为地震资料上的反射不连续性和测井、岩心及露头剖面上相带叠置方式的变化(图 2)。

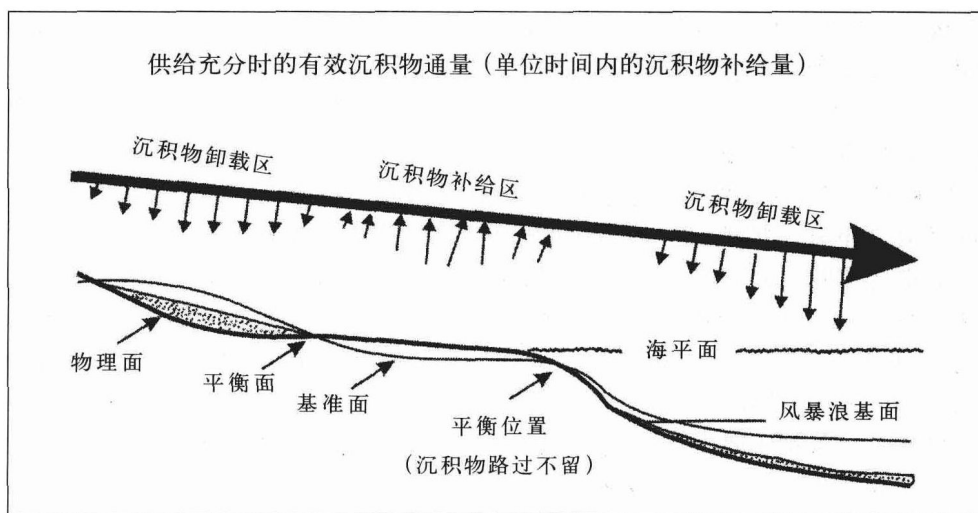


图1 基准面、可容纳空间和反映可容纳空间与沉积物供给之间平衡的地貌状态

总的来说, 层序地层学是一种划分、对比和分析沉积地层的方法。当与生物地层及构造沉降分析相结合时, 它提供了一种更精确的地质视点对比、古地理恢复和在钻井前预测油气储集岩、烃源岩和盖层的方法。层序地层学的概念在沉积地层上的应用有可能提供一个完整统一的地层概念, 就像板块构造曾经提供了一个完整统一的构造概念一样。层序地层学改变了分析世界地层记录的基本原则, 打开了了解地球历史的一个新阶段, 因此它可以说是地质学中的一次革命。

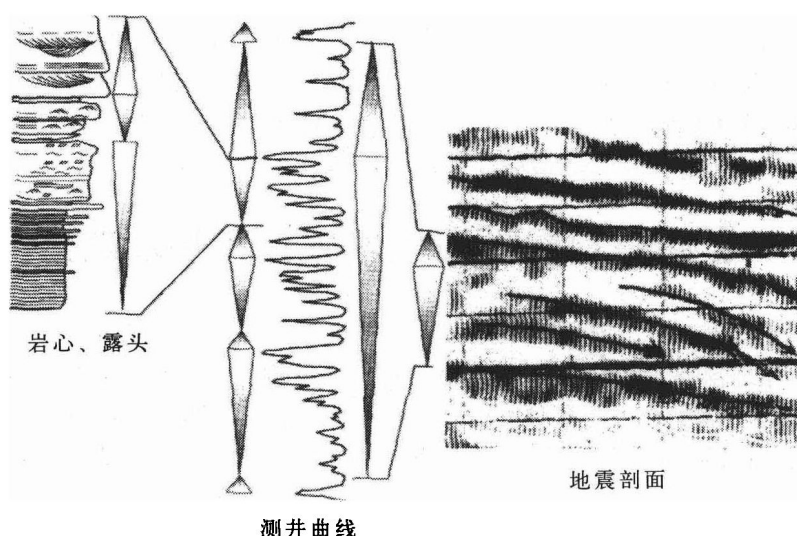


图2 多种资料综合的层序地层学分析方法

层序地层学在世界范围内得到了广泛的应用，主要有以下几方面：

(1) 消除了地层学中长期存在的年代地层与岩石地层单位及生物地层单位三重命名的混乱现象。像板块构造学说提供了全球统一的构造概念一样，层序地层学也提供一个全球统一的地层学格架和沉积作用格架。

(2) 第一次提出了全球统一的成因地层划分方案(成因地层年表)。层序地层学通过对控制地层形成的四个要素(构造沉降、全球海平面升降、气候、沉积物供应)的综合分析，得出相对海平面(或基准面)控制层序形成与发育的概念。将层序内部和层序之间的成因联系确立下来，把地层学从描述性提高到有完整体系的理性阶段。

(3) 建立了地层分布模式。层序地层学是研究地层分布模式的一门科学，它把层序定义为“顶、底以不整合或与这些不整合相应的整合为界的、成因上有联系的一套地层”。层序地层学定义中所说的“地层分布模式”就是这里所指的“成因上有联系的一套地层”。即每个层序都可包括三个体系域：低水位体系域、海侵体系域和高水位体系域(I类层序)，或者陆架边缘体系域、海侵体系域和高水位体系域(II类层序)。这些概念是层序地层学的核心，是许多理论和实际工作的依托。

(4) 提高了地质学家的预测能力，包括理论预测和实际预测两个方面。从理论预测上讲，通过海平面相对变化的研究，可以预测尚未钻探地层的年代，预测某些应有的体系域的展布方向、范围、可能的岩相及其分布，从而对地质发展史、古地理状况作出科学的预见。可以通过体系域和沉积相的分布规律，预测有利于形成油气藏以及其它沉积矿产的有利分布带。再进一步，通过高精度高分辨率的地震勘探(尤其是三维地震)、油藏描述、烃类检测等手段，可以进行钻前油藏、油层质量预测，以至于开发油田的开发方案部署、调整、提高采收率预测。

(5) 把地球科学的研究从定性推向定量。近年来，由于计算机技术和地震勘探以及其它有关学科的发展，已经在盆地模拟、构造史恢复、油气运移、资源评价、储量计算、

储层质量预测等方面积累了不少经验,提出了一些定量研究的方法。然而,由于对地层及其所代表的岩相在三维空间和时间上的分布不够了解,影响了上述评估的确定性,并造成不同评估值之间的重大差异。层序地层学的出现,基本上解决了这个问题。可以相信,随着地震勘探和计算机技术的进一步提高,将有可能以层序地层及地震地层学为主线,把地质研究和(或者)油气勘探的各项主要工作从头到尾贯穿起来,构成一个系统工程。在和其它一切与沉积学有关的科学和技术密切配合的基础上,构成一个从地层划分、相带分布、古地理环境恢复、构造发育史、油藏形成史、油藏预测、油藏质量预测到油藏开发效果监测的一套完整的、比现在精确得多的定量化研究全过程。

三、研究实例分析

——湖相沉积地层层序划分与储层预测

湖相盆地层序形成的控制因素与海相盆地有较大的差异,层序的发育特征与海相盆地也存在着一定的区别。但湖相地层由于其构造运动的旋回性、边界断层的间歇性、气候变化的周期性等,必然产生地层基准面的周期性升降、湖水面规律性的扩张与收缩、沉积物供给速率的变化以及最终的可供沉积物堆积的空间变化,由此形成湖相地层成因上有联系、时空演化上有规律可循的地层分布型式。这是湖相层序地层分析的基础。在湖相沉积地层中,地层层序的划分也是首先识别地层记录中的反映多级次基准面旋回的地层旋回。

1. 美国中西部尤英塔盆地始新世河湖相沉积高分辨率层序地层划分与对比

尤英塔盆地位于美国中西部落基山脉,为早第三纪东西向延伸的大型山间凹陷盆地。盆地可划分为两个构造—地层旋回。下部白垩系为受 Sevier 逆冲带和海平面升降双重控制的前陆盆地沉积,以白垩系 Moncos 组厚层海相页岩和 Mesaverde 组海岸平原沉积为特征。白垩纪末期基准面上升,海水退出,不整合面之上沉积了代表山间盆地构造旋回的巨厚的下第三系陆源碎屑地层,以古新世—早始新世的 Wasatch 组上部和 Green River 组的河湖相沉积为特征;中—晚始新世湖盆开始收缩,盆地呈北陡南缓的不对称状。研究区位于盆地南部缓翼的 Bruin Point 地区的 Sunnyside Carbon 县。地层向东北方向呈 $3^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 平缓倾斜。研究层序主要为早始新世沉积的 Wasatch 组上部和早—中始新世沉积的 Green River 组,它们为盆地的主要含油层系,由源自东南科罗拉多高原的河流体系形成的河流三角洲—湖相沉积组成。

研究层段下部地表冲刷不整合发育,表明盆地发育早中期普遍存在的基准面穿越旋回。此时,盆地基底下降显著,地形坡度大,基准面上升时提供了足够的可容纳空间。加之沉积物堆积速率高($A/S \approx 1$),因而保存了大厚度的冲积三角洲平原河道沉积。至中期,基准面持续下沉,但构造运动减弱,古地形趋于平缓,沉积物补给速率也明显降低,湖盆范围广但水体浅。此时湖水大面积扩张与收缩明显改变着(增加或减少)盆地提供可容纳空间,形成研究区广泛发育的三角洲相、湖泊边缘相与开阔湖相指状交

互沉积。

建立在沉积模式类比法基础上的传统的相分析认为,沉积相仅是该沉积环境中沉积作用的产物,并不考虑由于在基准面旋回中所处位置的不同,可供沉积物堆积的可容纳空间的变化会导致同一沉积体系、相同环境沉积的沉积物在地层和沉积特征方面的差异。

建立在基准面和可容纳空间动力学观点上的相分析则认为,相同沉积体系中沉积物的体积分配、沉积物的保存程度、地层堆积样式和相序、相组合特征不是固定不变的,而是其在基准面旋回中所处的位置和可容纳空间的函数。因而用沉积动力学的观点分析沉积物堆积期间基准面的变化导致可容纳空间的变化来解释地层结构和沉积学特征,从根本上不同于传统的静止的相模式类比与相分析法。

研究层段 Washtch 组上部和 Green River 组河湖相沉积由成因上相关的、侧向上彼此相邻的三个相域组成,即河流三角洲相域、湖泊边缘相域和开阔湖相域。

2. 地层旋回

研究层段可以识别出 3 种空间和时间规模的地层旋回,即短期、中期和长期旋回。不论规模大小,均反映了不同级次的完整的基准面上升—下降旋回。

(1) 短期地层旋回

短期地层旋回为形成于成因上相关的环境中的岩相组合,记录了一个短期基准面旋回可容纳空间由增加到减少的过程。

(2) 中期地层旋回

可以识别出四个由短期地层旋回组成的中期地层旋回,自下而上分别命名为 MSC1、MSC2、MSC3、MSC4。

3. 成因地层单元与高分辨率层序地层对比

在识别出研究层段 MSC2 和 MSC3 短期、中期、长期旋回的基础上,以顶部首次出现湖泛油页岩沉积为区域标志层,建立了研究区的高分辨率地层对比格架。成因地层单元的识别是描述中期、长期基准面旋回并进行高分辨率等时地层对比的基础。研究区成因单元的边界为反映短期基准面旋回的地层边界,侧向上同一成因单元内沉积物的体积分配、旋回对称性变化、相分异特征十分明显。如前所述,研究层段处于湖盆演化长期基准面上升时期。在长期基准面旋回下部,即低可容纳空间时期,上三角洲平原相域(图 3)主要为基准面上升时期形成的分支河道相(具低可容纳空间相组合特征)和河道间沉积组成的不对称旋回,基准面下降期表现为侵蚀不整合。向湖盆方向则变为基准面上升时期形成的分支河道相和基准面下降时期形成的湖泊边缘相或河口坝构成的对称旋回。在长期基准面旋回中下部,由于可容纳空间增加,成因单元的下三角洲平原相域(图 4)由基准面上升时期的分支河道相(具高可容纳空间相组合特征)和扩张湖泊边缘相组成。基准面下降时期表现为侵蚀不整合,向湖盆方向则为厚度较大、反映基准面上升的具退积叠加样式的碳酸盐滩坝组合与厚度较薄的基准面下降时期的湖泊边缘相组合。处于基准面旋回中上部的成因单元,由于可容纳空间进一步增

加, 三角洲向浅水湖泊方向则表现为由基准面上升期形成的碳酸盐滩坝相和基准面下降期形成的泥坪相的对称性较强的旋回组成。

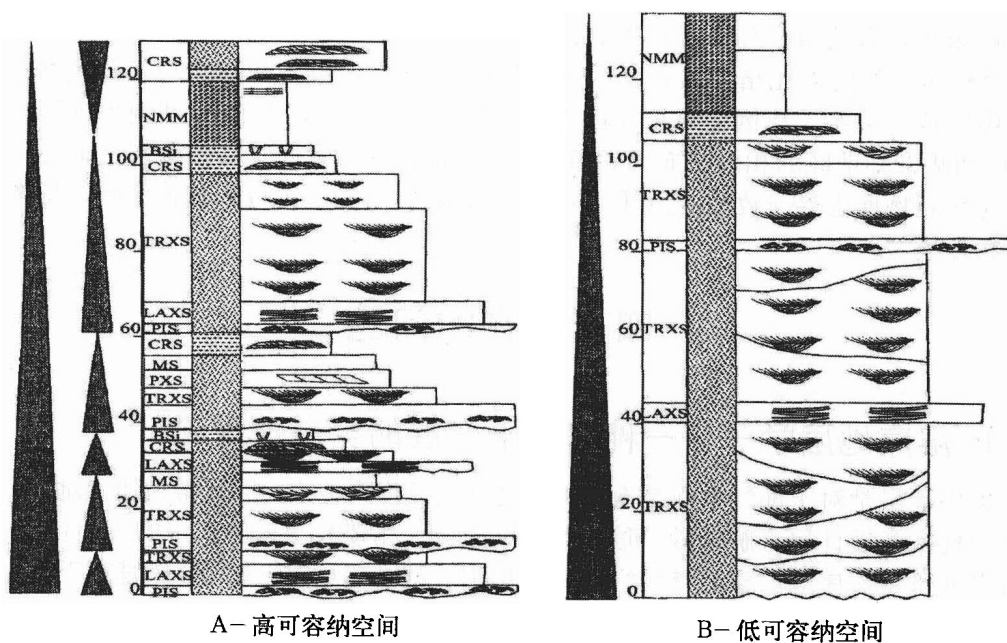


图3 上三角洲平原相序特征

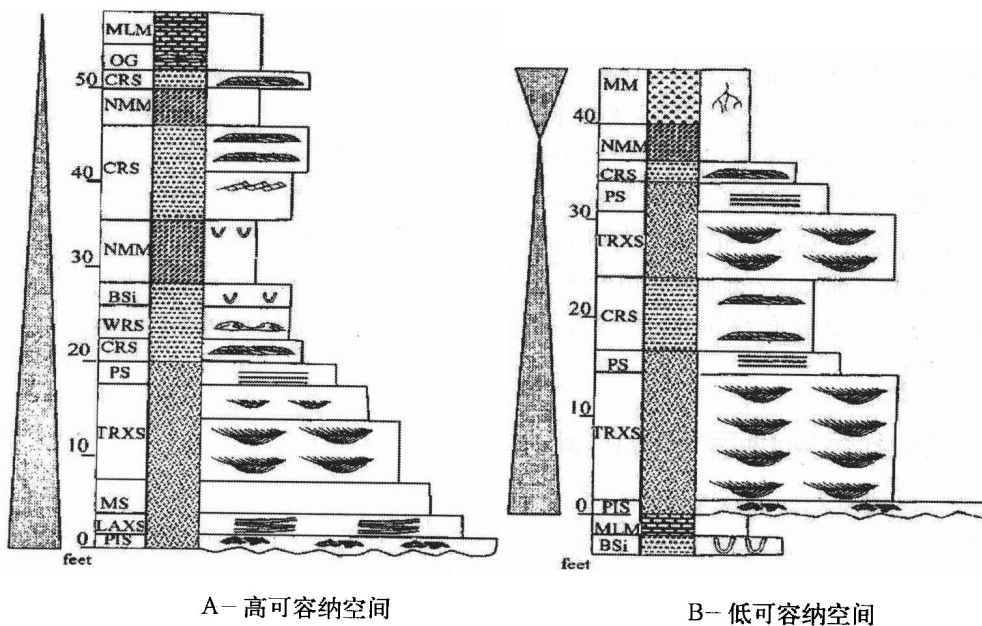


图4 下三角洲平原相序特征

纵向上,在盆地的不同演化阶段,成因单元的对称性、各沉积相域所占体积比、中期基准面旋回的地层结构也有显著差异。在研究层段,其特点自下而上表现为,由反映基准面上升的非对称旋回到基准面上升与下降均保存下来的对称旋回,再过渡到仅具基准面下降期间形成的非对称旋回为主。

高分辨率等时对比格架建立以后,根据成因层序之间的堆积样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分配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。同时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,该高分辨率对比格架还可成为流体流动数值模拟的岩石物理模型。

四、存在的问题

1. 层序地层学——一种有待于发展的全球性理论

层序地层学对于油气勘探是有用的,这点已经得到证实,但通常被错误地应用。由于这项技术是设计用来解释砂-页岩体系的,因此,在碳酸盐岩体系中的应用仍在探索。某些专家坚持层序地层学能够较容易地应用于碳酸盐岩中,因为碳酸盐岩对于海平面变化极为敏感。但是,公众普遍认为低沉积速率常常会产生特殊的问题。在沉积速率为中等到高时,层序内的地层厚度为数十到数百米,毫无疑问,其处于一个典型地震波的分辨率范围之内。但是在沉积速率较低时,就不能够自信地应用层序地层学。

考虑到这些问题,Vail及其合作者依据海平面变化的时期及次数提出了一系列地层旋回。与Vail一起工作过的TOTAL勘探公司的Duval及Cramez提供了地下实例并扩展了在油气勘探方面的应用。这种序列赋予了Fairbridge从板块构造的角度所列举的全球海平面变化机制以频率意义。

高分辨率层序地层学以比地震波长更高的分辨率进行研究,并且通常利用了测井资料及露头研究。ARCO、TOTAL及ESSO的科学家对路边的水沟体系进行了非常高的分辨率的层序地层学研究,这种水沟体系可作为下切河谷及三角洲体系的相似体系。该体系从底到顶仅50cm,但它遵从与数百米厚的系统一样的自然法则。层序地层学存在争论,无论其专业领域如何,地层学家都认为层序地层学的主要问题是扩展模式以适合每一种研究区,即在层序地层学适用的情况下,使用它;如果不适用,问题出在应用上,而不是理论上。

2. 陆相层序地层学中的问题

对于中国石油地质学家来说,更重要的是研究陆相地层,因为中国的石油基本上是从陆相地层中产生的。严格地讲,陆相地层除了湖泊沉积物、河流沉积物和沼泽沉积物外,还包括沙漠沉积物、冰川沉积物、洞穴沉积物和火山沉积物。其中火山沉积与油气成藏有重要的关系。

(1) 基准面

陆相层序地层学中存在的最大问题是基准面的问题。所谓基准面指的是一个侵蚀和

沉积作用达到平衡的面。值得注意的是：在基准剖面上升的情况下，引起的冲积层段的变化可以有三种情况，一种是海平面上升引起的上超；一种是陆地上的卸载能力降低，粗粒沉积物的增加，或者内陆地区沉降引起的下超，并非如 Vail 等所说的全是上超。因此，在二、三和四级层序的划分和对比上，除了要考虑 Cross 的原则外，还必须利用高质量和高分辨率的地震资料加以约束和校核。

（2）绝对年龄

陆相层序研究中第二大问题是绝对年龄的确定。由于陆相地层缺乏可以断代和推定其绝对年龄的化石证据，因此必须依靠同位素或者其他的化学方法确定地层的绝对年龄，并以此为基础，对盆地的地层发育史、构造发育史，以及油气藏形成史做出推断。目前已知有大约 70 多种方法可以用来确定地层年龄，应结合需要，选择适于本地区的方法，确定陆相地层的年龄格架。

（3）强连续同向轴

第三个问题是如何看待连续同相轴。多年来人们往往把地震反射中的强连续同相轴作为地层分界来对待，并且常常认为它们就是不整合面。实际上，强的连续反射往往是层序内部的最大洪泛面（也就是下超面），真正的不整合面在它的下面。如果在盆地范围内，不整合面和强连续同相轴之间，还会有低水位体系域发育；如果是在湖盆边缘，这个强反射和不整合面非常贴近，几乎重合，但它的下面常常发现下切河道。不是每个盆地都存在一些连续的遍布整个盆地的强反射，而且随着地震分辨率的提高，原来的连续性反射分解成一个以上的反射，降低了原来的振幅和连续性，并可能揭示出一些假的上超和下超。

（4）生油层

第四个大问题是如何处理生油层的问题。过去人们在进行生油量计算以及研究成藏系统时，总是把生油岩看作是个单一的地层——生油层。但是从层序地层学角度来看，生油岩只是跨越最大洪泛面上下的密集段的同义词，它并没有固定的顶底界面，因此它不是成层的岩层。密集段的岩性，一般是富含有机质的泥岩，厚度通常很薄，时间跨度通常很大，沉积速度很低。在海水或者湖水与泥质和有机质长期作用下，加上温度的催化作用，产生了石油、天然气，以及其他一系列金属与非金属矿产，由此引发了一系列地球化学、有机地球化学以及物理化学的问题，有待于解决。

层序地层学的出现，吹响了地层学革命的号角，但存在的问题还很多，应当把层序地层学当作一种查看和整理地质资料的途径，而不是它的终结。

五、层序地层学在石油工业中的发展前景

层序地层学的发展已超出了全球海平面变化曲线意义范畴，并已成为强有力的岩石地层分析和相分析工具。

随着油气勘探难度的不断增加，相应地对层序地层学的研究也提出了更高的要求，层序地层学正朝着以下几个方面发展：

- 标准化

虽然层序地层学的理论已经较为完善，但是由于学派的不同，以及引进理论时翻译

的区别。造成许多概念的混淆和错误理解,同一个内容往往被赋予许多不同的定义和名称。同时,对于层序的级别,界面的识别还缺乏一个统一认可的标准。所以将层序地层学进行标准化,有利于其发展和应用。

● 精细化

大范围、高级别的层序研究已难以适应油气后期勘探和开发的需要,小范围、精细层序的研究成为发展的必然。

● 精确化

在层序地层研究中,层序界面的识别是极其重要的一环,牵涉到层序对比和储层预测的准确性。目前层序地层的研究最后落脚于沉积体系的识别、划分和预测。不同沉积体系、相带界线的准确性影响勘探目标的选择和井位的部署。所以如何将界面和界线精确化,增进研究成果的可信度和可利用性,是面临的一个重大挑战。

● 量化

层序地层模拟技术以及层序地层分析与地震反演相结合的技术是实现层序地层量化研究的重要途径。通过三维空间的层序对比和研究,准确定义不同沉积体系的空间边界,可以对储层厚度、体积、延展范围做出计算。

随着层序地层学研究的不断深入和发展,其理论体系将不断得到完善,其在实践上的应用也会更加广泛。它开创了了解地球历史的一个新阶段。其强大的生命力必将在 21 世纪进一步推动地球科学的发展,并在油气和矿产资源勘探等方面发挥积极作用。

六、对 CNPC 应用层序地层学的对策研究

为进一步提高高分辨率层序地层学在我国石油工业中隐蔽油气藏勘探开发实践中的应用效果,提高地层岩性圈闭预测的准确性,还需要加强以下问题的研究:

- 利用年代确定精细层序很难,需要加强生物化石研究与控制因素结合,来保证层序细化的准确性,当然这种细化要遵从可对比的原则,从而提高地层岩性圈闭识别的精度和可靠性。

- 陆相层序形成具有多种控制因素,需要对精细层序的成因主控机制加强研究,以确定影响地层岩性圈闭发育的控制因素。

- 目前层序研究仅局限于二维定性预测,需要进行计算机三维模拟研究,建立空间三维层序格架,具体描述地层岩性圈闭的形态。

- 将层序地层模式与储层反演结合,可以明确储集砂体在层序格架中的发育规律。在确定层序界面和等时格架后,利用钻井标定进行储层反演,是实现量化研究的有效手段。

- 不同成因的陆相盆地具有不同的地层结构和相带模式,对其层序格架模式应区别研究,总结出各自地层岩性圈闭发育的规律。

油藏管理的关键技术——四维地震监测技术

在油气勘探开发领域,解决剩余油分布和开采问题是一个世界性难题。长期以来,虽然检测技术不断进步,但始终没有在解决剩余油问题上获得突破性进展,致使半数以上的剩余油气储量滞留在地下未能有效地开采。80年代初期,石油勘探地球物理专家在三维地震检测方法的基础上,提出了四维地震监测技术,亦称延时地震监测技术,希望利用这种方法能够提高人们解决剩余油问题的能力。此后,专家们在石油公司的大力支持下,对这项技术的理论和方法进行了深入研究,并在现场试验的基础上不断完善,取得了显著的应用效果。到80年代后期,这项技术陆续在一些油气田投入实际应用,尤其是在北海和墨西哥湾地区,在解决海上油气藏勘探开发问题方面发挥了重要作用。进入90年代后,国外四维地震监测项目逐年增加并出现良好的发展前景,截止到2000年,国外已开展了100多个四维地震监测项目,其中大部分项目至今仍在进行之中。目前,四维地震监测技术已经成为石油公司解决剩余油问题的主要技术之一,一些著名的地球物理勘探服务公司也提供四维地震监测作业的专项服务。

一、四维地震监测技术的基本原理和效益

经过10多年的应用和发展,三维地震已经成为油气勘探开发领域最成功的诊断方法之一,在特征检测、优化布井和提高产能等诸多方面发挥了重要作用。然而,随着勘探开发工作的深入,如何有效地开采探明资源,解决剩余油问题,成为石油公司关注的焦点问题。在解决这些问题上,三维地震单一的静态描述功能显得力不从心,只有加强动态描述功能,才能通过三维地震的成像结果,描述油藏特征参数随生产活动发生的变化,从而有效地确定剩余油分布。因此,物探专家在三维地震基础上提出了四维地震监测油藏的原理。

从理论上讲,四维地震是在三维地震空间检测的原理上增加了时间概念而形成的。这项技术通过收集不同时间采集、描述相同地质体的三维地震成像结果,经与其它地球物理、地质、地球化学和油藏工程等学科的可视化三维数据体综合,共同组成四维数据体 (x, y, z, t) ,配合流体流动史的有限元模拟模型,进行多次迭代的综合性分析与解释,确认油藏特征参数的分布,并结合生产措施预测油藏特征参数分布的未来走势,提出调整生产措施和新井布井的方案,从而有效地解决剩余油问题。应该指出,在实际生产应用中,四维地震监测的实施将涉及许多内容,是相当复杂的一项工程,因此需要各专业学科和经济分析等方面的专家密切配合,更需要从管理角度的协调和支持,以及技术和装备的保障。目前,国外石油公司主要采用多学科研究方式支持的四维油藏监测管理体系完成四维地震监测项目的实施。

目前,通过使用三维地震技术可使世界平均油藏采收率达到35%左右,这意味着仍

然存在大量的剩余油。据统计,使用三维地震技术后使投资回报率增加了25%~30%,主要体现在改善了生产能力,并通过减少干井数量提高了发现率。相比之下,使用四维地震监测技术会在三维地震的基础上增加软件和处理方面的投资,但它提供的随时间变化的信息可以产生地震差值,这种差值经测井资料和生产史数据的标定,可以确定流体流动模式和剩余油分布位置,这对于改善开发钻井部署与把握实施时机、尽快修改油藏模拟模型以及调整加密井和注入井部署方案有很好的帮助。有很多实例表明,使用四维地震监测技术,可以在原有采收率基础上再增加30%。例如,BP-壳牌公司的Foenhaven油田在使用四维地震监测技术后,原油采收率达到了60%~75%,而原来使用三维地震时为40%~50%,如图1所示。据阿莫科和埃克森等公司的评价报告指出,使用四维地震监测技术可以明显改善整个油田的经济效益,其中在已经进行了三维地震的油田可提高50%,在未进行三维地震的油田也将提高35%。Amoco公司的报告还指出,四维地震监测技术可使勘探成功率增长到60%以上,并通过监测流体流动模式修改生产方案,延长生产井开采寿命,使递减曲线的斜率从25%/a降至12%/a,也使贴现率从10%降至8%。Exxon的报告也指出,三维地震使用后,使公司的钻井成功率提高了27%,使公司在墨西哥湾和印尼的油田的财政收入分别增加了22%和33%,而使用四维地震监测技术后,预计将在此基础上再提高15%。

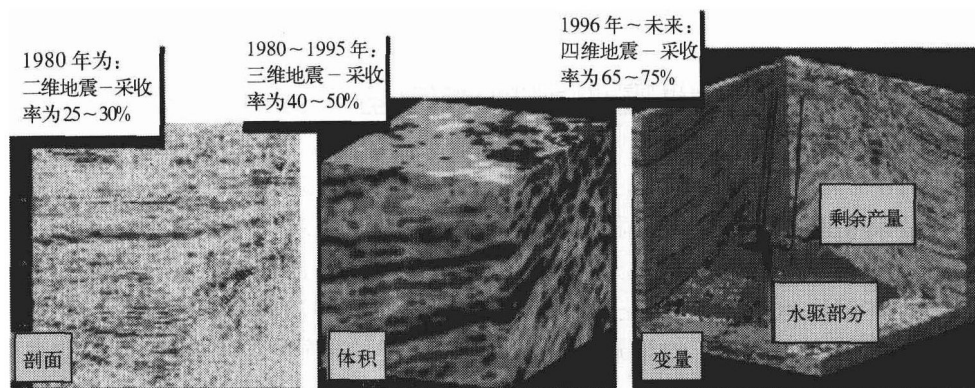


图1 Foehaven油田使用四维地震监测技术前后的原油采收率

除了为石油公司提高产量和增加收入外,四维地震监测技术还可以为地球物理服务公司增加收入和扩展市场。早在1995年就有分析家预测,四维地震监测技术投入使用后,将在今后5年里给石油地震勘探市场每年带来10~30亿美元的资金,同时四维地震监测技术的使用会给大量老三维地震数据带来新生,这些资料的再利用和重新处理都会给服务公司带来大量的工作量和可观的收入,并在地震勘探市场上增添了一个新的服务内容。

二、四维地震监测方法

象常规地震勘探技术一样,四维地震也包含数据采集、数据处理和资料解释与分析等过程。

1. 数据采集中应注意的问题

四维地震数据采集需要按计划安排时间分多次进行。第一次采集的数据称为基础数据,将用来对比后续采集的数据,发现之间存在的变化,后续采集的数据统称为监测数据。由于四维地震由多次三维地震组成,所以数据采集按三维地震数据采集方式实施。然而,如果需要用老资料作为基础资料进行对比的话,则需要在监测数据采集时认真分析新老资料的采集方案,力求消除数据采集带来的差异对后续处理与解释产生的不利影响。目前,有些石油公司已经开始在新开发油田使用永久性地震数据采集排列,以求在以后的监测数据采集中避免出现类似的问题。

在数据采集过程中,野外地震设备要将对地震波至的地层速度或压力变量转换成电信号,并经过放大、滤波记录到磁带上,这些转换和设备都有自己的脉冲响应并对记录的地震数据产生影响。如果是不同的记录系统、不同参数的检波器或拖缆记录下具有不同烙印的数据,就应该考虑用滤波器对它们进行均一化处理。此外,相位响应差异可能是非常严重的现象,特别是记录系统间的零相差异。记录仪启动与激发时间之间的时差会在记录数据上留下一段延迟。对于炸药震源来说,必须掌握激发与记录的相对时间。对于可控震源来说,需要追踪对应控制扫描的零相互相关子波的峰值和设备对控制扫描与记录数据的滤波效果,此外还要注意新老SEG标准关于“底板速度”与“触力”的定义。对于空气枪组合震源来说,输出脉冲特性与组合参数和激发参数有密切的关系,需要逐一校正进行补偿,如果数据本身是零相位且与测井资料匹配,这些问题会在匹配触力中自动加以考虑。

采集参数对地震数据描述结果的影响是非常严重的,有时会使这些数据无法用于延时分析。因此,要在数据采集时予以特别注意,需要考虑的采集参数包括:

- 定位系统与精度标准;
- 震源排列(长度、宽度和采样点);
- 空气枪和炸药的激发深度;
- 可控震源参数一起始与终止频率、变化率、锥形结构、相位控制,以及炸药震源的药量;
- 陆上勘探的接收排列,检测器数量、长度与宽度、道间距;
- 海上三维地震勘探的拖缆数量;
- 三维地震勘探的激发间距、激发测线间距;
- 三维地震勘探中激发与接收测线取向和模式;
- 覆盖参数;
- 方位分布变量;
- 偏移距分布变量。

在相同记录设备情况下,有些影响通过延时地震数据集与井的匹配可以修正,但有些影响会保留下来,并在数据上留下明显的痕迹。

2. 监测与分析流程

四维地震监测数据的处理与分析解释是这项技术的核心内容,与传统三维地震明显