



◎ 尹太举 张昌民 尹艳树 著

高分辨率 层序地层学 在油田开发中的应用

——以濮城油田为例



石油工业出版社

剩余资源研究组 (3RG) 系列研究成果之一

国家自然科学基金 (40602013、40572078)、油气资源与勘探技术
教育部重点实验室联合资助

高分辨率层序地层学 在油田开发中的应用

——以濮城油田为例

尹太举 张昌民 尹艳树 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以濮城油田沙三中 6~10 油组为例,系统论述了利用高分辨率层序地层学原理进行开发地质表征的思路和方法。在对层序地层学原理回顾的基础上,提出油田开发阶段高分辨率层序地层学的应用主要体现在建立等时地层格架、进行格架内的储层预测和表征及对格架内的油气分布和开发响应进行分析等方面。在濮城沙三中 6~10 油组的研究中,以沉积相研究为基础,建立了高分辨率层序格架,分析了格架内储层沉积演化和非均质性特征,弄清了高分辨率层序地层格架内的原始油气分布特点、开发响应特征和剩余油气分布特点,为该区的开发调整提供了地质依据。

本书可供从事油气田开发的科研人员以及相关专业大专院校师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

高分辨率层序地层学在油田开发中的应用/尹太举,张昌民,
尹艳树著. —北京:石油工业出版社,2007.7

ISBN 978-7-5021-5648-0

I. 高…

II. 尹…

III. 地层层序-地层学-应用-油田开发

IV. TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 088226 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.cn

总 机:(010) 64262233 发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:9.5

字数:245 千字 印数:1—1000 册

定价:30.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

无论是新油区,还是老油田,要想对其进行合理而有效的开发,首要的是弄清油气的空间展布规律及其在开发过程中的运动规律。而控制油气的空间展布及其开发中的运动规律则正是储层的非均质性。因而建立起精细的储层地质模型,正确地评价储层的非均质性已成为油田开发及调整方案成功与否、开发效果好坏的决定因素,开发地质人员对储层进行尽可能细的描述,以满足生产的需要。

建立储层地质模型的关键是建立骨架模型,建立骨架模型的基础则是正确的地层对比。建立在测井曲线相似性基础上的传统“旋回控制,分级对比”原则在进行高含水期精细对比时明显表现出地层学理论依据不足,在解释小层段的砂体对比方面,在解释不同层位砂体规模、形态、砂体连续性、连通性和储层物性的变化规律方面缺乏有力的理论支撑。寻找新的理论来指导储层的精细划分和对比,已成为储层表征面临的一大任务和难题。

源于被动大陆边缘的层序地层学,依据地层沉积时的海(湖)平面变化,综合地层内部的相关关系,对地层进行等时划分和对比,自然成为建立储层地层格架的首选技术。作为石油勘探开发中的一种新技术,被认为是 21 世纪地质学中的一场革命,在地质学中产生了深远而广泛的影响。它以其科学性、综合性、预测性、定量性特征,在分析地层发育、储层展布,评价生储盖组合,预测油气藏方面发挥了极大的作用。然而就其应用领域来说,还主要局限于油田的勘探过程,主要用于预测有利的油气聚集区和发现隐蔽油气藏,尽管提出了高分辨率的要求,它的精度还是不能够满足油田在开发中后期的剩余油预测分析。

基于非海相地层沉积的控制因素及跨相带的储层对比,Cross 提出了基于基准面的高分辨率层序地层学,在国内外产生了广泛的影响,已被认为是储层表征的发展方向。该理论依据基准面变化中的过程—沉积响应,分析沉积过程中的沉积物体积分配及与其相伴生的相差异,为预测储层的空间展布及其非均质性提供了新思路。由于基准面的分析不必知道海(湖)平面的相对位置,从而使得这一理论在应用中更易掌握和操作。地层是在不同级次的基准面旋回过程中沉积下来的,对不同级次基准面旋回进行分析研究,便可以解决相应级次的储层非均质性。而在现有的钻井和测井资料情况下,完全可以实现对单砂体的基准面划分和对比,建立起以单砂体为单位的储层地质模型,这已经可以满足油田开发调整的需要。

正是基于这一理论,通过对储层的精细划分和对比,建立起储层精细地层格架,在基准面旋回格架内,探讨储层的非均质性特征,以期能够建立起储层非均质性与基准面旋回的相关关系,在此基础上建立了精细地质模型,分析了剩余油分布。

濮城沙三中油藏位于东濮凹陷中央隆起带北缘,东起兰聊大断层,西至中央隆起带西缘濮 63 断层,北以濮 128—濮 7—127 井为界,南至濮 127—濮 126 井一线,面积约 15km²。油藏埋深在 3050~3800m,是一个典型的深层特低渗油气藏。由于砂体平面变化快,砂体连续性差,该油藏一直处于低效开发中,目前采出程度不到十个百分点。地质上存在着层系划分较粗、沉积环境认识不清、砂体展布和连通性不明确、动态上存在注采对应性较差、产量递减较快等问题,急需开发调整,改善开发效果。要稳定该油田的产量,提高开采效益,首要的问题是细分砂体、弄清储层砂体特征及展布状况,从而预测剩余油分布,依据此制定相

应的调整方案。通过该研究将解决油田开发中面临的这些问题，提高油田的采收率。同时这一探讨也将为其他油田的开发调整提供一个全新的思路和方法。

全书共分八章，第一章在对高分辨率层序地层学原理进行回顾的基础上，提出了适用于油田开发阶段的研究方法和具体思路，第二章对濮城油田沙三中 6~10 油藏的基本地质特征进行了简要的介绍，第三章主要介绍了该区的沉积相特征，并着重分析了水下扇形成的水动力学特征，第四章介绍了依据地震、钻井和测井资料建立储层高分辨率层序地层格架的方法，第五章分析了层序格架内的沉积演化和砂体发育特点，第六章主要介绍了储层格架内的非均质性特点，第七章总结了储层格架内的油气分布、开发响应和剩余油分布特点，第八章对依据高分辨率层序地层学原理进行储层沉积模拟、精细预测储层分布进行了简要介绍。

书中尽量对操作流程给予详细的介绍，使得该项研究工作的流程清晰、操作简易，以便于工作中掌握和使用。

本研究得到了中原油田领导和地质研究院领导的支持和关怀，研究院濮城室为研究提供了必要的资料基础，并做了部分基础研究工作，长江大学“剩余资源研究组”的老师 and 研究生也做了部分研究工作，在此对他们的关怀、支持和辛勤劳动一并表示衷心的感谢！

本书是国家自然科学基金项目的部分研究成果，同时受到了油气资源与勘探技术教育部重点实验室的资助。

由于时间仓促，加之作者水平有限，书中错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正，不胜感激。

目 录

第一章 高分辨率层序地层学的基本原理和工作方法	(1)
第一节 从层序地层学到高分辨率层序地层学	(1)
第二节 高分辨率层序地层学的基本概念	(3)
第三节 适用于油田开发阶段的高分辨率层序地层研究方法	(11)
第四节 高分辨率层序地层学研究现状与发展方向	(14)
第二章 濮城油田概况	(22)
第一节 东濮凹陷地质背景	(22)
第二节 濮城油田基本地质特征	(25)
第三章 沉积相与相模式	(27)
第一节 岩石结构特征	(27)
第二节 沉积构造和岩石相	(30)
第三节 沉积微相特征	(33)
第四节 岩—电响应研究	(37)
第五节 相模式	(41)
第六节 水下扇沉积的水动力学特征	(42)
第四章 高分辨率层序地层格架的建立	(47)
第一节 适用于湖泊水下扇的高分辨率层序划分方法	(47)
第二节 高分辨率层序地层格架建立方法	(50)
第三节 地震层位标定	(52)
第四节 钻井基准面旋回的识别	(54)
第五节 层序对比及地层格架的建立	(63)
第五章 高分辨率层序格架内储层沉积演化	(66)
第一节 沉积微相图的编制	(66)
第二节 不同基准面旋回及其开发响应	(68)
第六章 高分辨率层序格架内储层非均质性研究	(86)
第一节 储层物性解释模型的建立	(87)
第二节 储层层内非均质性	(92)
第三节 储层层间非均质性	(97)
第四节 储层平面非均质性	(101)
第五节 储层孔隙非均质性	(108)
第六节 高分辨率层序格架内储层非均质性	(112)
第七章 高分辨率格架内油田开发响应与剩余油分布	(117)
第一节 砂体非均质性对开发的影响	(117)
第二节 基准面旋回格架内的砂体开发响应	(120)
第八章 高分辨率层序地层样式模拟	(128)

第一节 盆地充填模拟研究回顾.....	(128)
第二节 地层叠加样式的模拟.....	(131)
参考文献.....	(137)
图版.....	(141)

第一章 高分辨率层序地层学的基本原理和工作方法

第一节 从层序地层学到高分辨率层序地层学

兴起于 20 世纪 70 年代的层序（地震）地层学，在过去的 30 年中受到了极大的关注，得到了极高的评价，被看作是地质学和油气勘探中的一场革命，已成为一种研究地层分布、降低勘探风险的重要技术和方法。层序地层学的创始人 P. R. Vail (1991) 认为层序地层学“改变了分析地层记录的基本原则。因此，它可能是地质学中的一次革命，它开创了了解地球历史的一个新阶段”。T. A. Cross 等 (1986) 将其视为“地层分析中的一场革命，其意义之深远不亚于板块构造引起的革命……它是把科学由定性领域转到定量领域的推动力……使地层学这一学科将更有预测性和定量性”。原苏联科学院一些院士 (1988) 则认为其“是油气勘探最精确的一种方法，它能够使油气普查勘探成本降低 $1/3 \sim 1/2$ ……“可以大大提高油气普查勘探工作效率，预计可以得到数十亿卢布的新的经济效益”。J. B. Sangree 等 (1990) 认为：“层序地层学主要用于识别和详细研究地层圈闭的含油气远景。在应用层序地层学以后，一些颇具特色的勘探前景已经出现。” AAPG、SEPM 和 IAS 等国际学术组织一致认为层序地层学是 90 年代石油地质学、地球物理学、沉积学和地层学发展的重大方向，ESGC (1988) 已经将“层序地层学和全球海平面变化”正式列入“全球沉积地质计划”(GSGP)，此项国际性研究已通过联合国在各国实施。1995 年在美国召开的 AAPG 年会上，高分辨率层序地层和储层地质研究成为最重要的议题。

层序地层学分析最根本的是提供了一种划分地层、预测地层分布的方法。经典层序地层学基于全球海平面变化，提出了在海平面变化过程中，地层的分布样式及其内部的成因联系，将海平面变化周期内的地层划分为低位体系域、海进体系域和高位体系域，建立了被动大陆边缘的层序地层模式。依据建立的层序模式，通过对体系域的空间配置、内部成因分析，可以预测地层的分布，进而对储层分布和生储盖组合进行评价，优选勘探有利区块，降低勘探风险。

与传统地层学分析相比，层序地层学有着明显的优点，集中表现在它的预测性、定量性、综合性三个方面。

预测性：层序地层学的预测性是其得以全面发展的主要原因。基于建立的层序地层模式，在层序格架内预测地层的分布、寻找高效勘探目标，成为进行层序地层分析的主要目标之一。根据海平面相对变化规律，可以预测沉积体系域的展布方向、范围、所含的沉积体系及其赋存位置以及未钻地层的时代，结合油藏描述，进一步预测沉积矿产的有利聚集带、油气生储盖组合规律，达到减少成本、有的放矢、提高采收率的良好效果。

定量性：层序地层学的研究范围是地球发展史上的时间域和空间域，它吸收了多门类学科的先进成果，以现代化的计算机技术及测试分析技术为手段，能够利用地震反射波的运动学和多种动力学参数作定量分析。层序地层学的发展将提供一个由层序地层划分、相带展布、砂体预测、构造发育、地热史、沉降史、埋藏史、成藏史、油气藏及其质量预测到开发效果监测的定量化系统工程程序（徐怀大，1990）。

层序地层学研究已经应用于建立和研究各种资料库,除了利用地震反射参数之外,各种不同沉积环境的露头、测井和岩心等资料也被用来建立高分辨率的层序地层数据库(H. W. Posamentier 等, 1991)。在油储地球物理方面,通过高分辨率的采样和处理、三维地震成像、层析成像、反射地震波的波形和属性分析、正演模型和反演模型检验及开发系统监测,能够研究储集岩的孔隙度和渗透率条件、含油性及采油过程中所发生的定量变化。

综合性:层序地层学是一门跨越多门学科(地球物理学、地层学、地球化学、古生物学、矿物学、沉积学、构造地质学、盆地分析、计算机技术、现代测试分析技术等)的一门综合性学科,它不仅囊括了地震地层学的全部理论和方法,而且结合了测井信息、露头资料、钻井取心和岩屑资料的沉积学研究成果,吸收了油气勘探地层学、地球物理学等学科的最新成果,集百家所长,避免了单学科中的某些局限性,能够获得更多的信息,为油气资源开发提供科学的依据。

回顾层序地层学 30 多年所走过的历程,大体可将其划分为三个阶段(钱凯, 1997):

萌芽阶段:20 世纪 70 年代以前,在生物地层学、岩石地层学、年代地层学及动力地貌学发展的基础上,形成了一些层序、旋回及均衡剖面等认识,为层序地层学的形成打下了地质基础。

地震地层学阶段:20 世纪 70 年代,EXXON 公司的专家 P. R. Vail、R. M. Mitchum 等提出了海平面升降的概念以及相应的应用于由地震反射记录的以不整合面为边界的地层型式。依据地震资料,展开了盆地范围内的地层分析,而一般不单独用测井、岩心和露头资料来分析层序,层序研究的精度还不能达到在储层范围内进行沉积地层分析的精度。

综合发展阶段:20 世纪 80 年代至今,随着研究的深入,形成了完整的可容空间概念。依据可容空间的分析,以及地震、测井、岩心和地面露头等资料深入、详尽、综合地使用,其层序模式三维空间的立体预测性越来越强,其应用范围深入到油气勘探开发的各个阶段。同时由于对不同沉积背景下的层序研究的分析,形成了不同的沉积层序模式,进而形成了百花齐放、百家争鸣的局面。它不仅提供了一种解释地层层序的方法,而且还提供了一个具体的可操作流程。实践证明,该方法对于解决石油勘探中的地质问题确实有它独特的优越性(Posamentier, 1992, 1993)。

在 30 多年的发展历程中,层序地层学得到了长足的进展,早已从被动大陆边缘发展到多种地质背景下的层序模式,尤其是陆相层序地层研究,建立了许多不同于经典的层序地层模式。而且随着油气勘探和开发向更复杂更深入的层次发展,以往地层分析结果的精度及其详细程度已不能完全满足生产的需要,必须向更精确、更详细的方向发展。可以说,高分辨率层序地层的产生,正是顺应了油气勘探开发生产对层序地层研究的需要。由海相到陆相、再由层序地层学到高分辨率层序地层学,正是研究进一步的深入和学科发展的必然结果。

基于海平面变化分析的海相层序地层学派强调,海平面变化是控制层序成因和相分布的内在机制,可用于全球范围内的地层对比。按层序边界选取的差异分为三个学派:①以地表不整合或与此不整合可以对比的整合面为边界的,以 Vail 为代表的经典层序地层学派;②采用最大洪泛面作为层序边界的以继 Frazier 之后的 Galloway 成因层序地层学派;③采用地表不整合面或海进冲刷不整合面为界的以 Johnson 为代表的 T—R 旋回(海进海退旋回)学派。

海相层序地层学将层序控制因素归结为构造运动、全球海平面变化、沉积物供给、气候变化四大因素。由于过多地强调了海平面变化对层序形成的控制作用,而陆相层序受到海平

面的变化影响较小,或不受其影响,因而该方法对于陆相层序适用性较差,针对陆相层序,还必须探讨新的研究方法和思路,我国的地质工作者在这一方面做了大量的工作,取得了一系列的成果。

基于对陆相盆地形成因素认识的差异,可将陆相层序地层研究划归为以下几个方面:“类海相”学派、“构造”派、综合学派。

“类海相”学派认为湖泊和海洋可以相类比,湖平面的变化可与海平面的变化相类比,直接套用海相层序地层研究的方法。这显然过于简化了陆相沉积,其局限性不言而喻。

“构造”派将构造作为层序形成的主控因素,认为进行层序分析时,先要分析其构造层序,在构造层序分析的基础上,划分其体系域和沉积建造。该学派认为层序分析的本质是把相、沉积体系放于盆地整体地层格架中进行研究,这种格架主要根据等时地层意义的界面划分(李思田,1992;解习农,1996)。层序分析的核心是建立等时地层格架,在此基础上将盆地充填序列解析为不同级别建造块。它突破经典层序地层的束缚,全面考虑了盆地构造发展史和沉积演化史,强调构造作用和沉积作用的影响,从旋回角度对体系域进行了划分,使陆相层序地层研究向前迈出了一大步。然而控制陆相层序因素是多变的,如气候作用、物源供给速率等因素对层序的形成有着明显的影响,其作用不容忽视。

在陆相层序及其成因复杂性认识的基础上,综合学派综合分析了海平面变化、湖平面变化、沉积物供给、构造运动和气候等各种因素的影响,在陆相湖盆分类的基础(敞流湖盆、闭流湖盆)上,讨论了沉积基准面和可容空间,认为地层展布样式受控于可容空间和新增可容空间的形成速率。在对陆相层序控制因素(构造、气候、沉积物供应、湖平面变化等)分析的基础上,认为构造和气候是主因,将层序划分为构造和气候层序两种类型。构造层序又分为简单断拗层序:同生断拗层序和多期断拗层序:同生断拗层序由低位体系域、湖扩体系域、湖缩体系域和非湖泊体系域;简单断拗层序只发育厚的湖缩体系域;多期断拗层序由多期进积式准层序构成。气候层序由低位、高位和湖扩、湖缩体系域组成(纪友亮,1996)。

尽管陆相层序研究对层序控制因素的认识有了进一步的深入了解,然而基于常规的层序研究概念和方法,研究不可能达到更为精确的程度,还难以满足油田开发,尤其是开发后期对地层分析的要求,形成一种高精度的、高预测性的层序地层分析方法,提高层序地层分析的分辨率和储层预测的准确性,已成为层序地层研究面临的一个难题。

高分辨率层序地层学依据 A/S 值 (Accommodation/ Sediment Supply) 和基准面旋回进行地层对比 (Cross, 1991, 1993, 1994, 1997, 1998), 比传统的层序地层学分辨率要高得多, 为进行地层精细对比及更好地应用于油田开发中提供了一种新的思路。高分辨率层序地层研究表明在基准面旋回变化过程中, 由于可容空间与沉积物供给通量比值 (A/S) 的变化, 相同沉积体系域或相域中发生沉积物的体积分配作用和相分异作用, 导致沉积物的保存程度、地层堆积样式、相序、相类型及岩石结构发生变化, 从而使得储层的展布及其物性也发生相应的变化, 而这些变化是其在基准面旋回中所处的位置和可容空间的函数。通过对基准面旋回的分析, 在等时对比的基础上, 可以预测等时地层单元的地层分布样式、空间展布和储层的非均质特性。

第二节 高分辨率层序地层学的基本概念

高分辨率层序地层学理论的核心是: 在基准面变化旋回中, 随可容空间在不同基准面位

置(地理位置)迁移,在时间域和空间域内 A/S 值(可容空间/沉积物供给)发生相应的变化,同时伴随时空中的体积分配,进而形成了相分异,储层的物性随之产生相应的变化。通过对地层记录中体积分配和相分异观察描述,则有可能恢复基准面变化旋回,据基准面旋回进行储层精细对比和储层物性预测。

一、基准面概念

基准面的提出已有较长的时间,但是对于它的理解则一直存在争议,目前比较一致的看法是把基准面作为一种抽象平衡面,该面将地表侵蚀作用区与沉积作用区分开。大致来说,对于基准面的含义有以下四种理解:

(1) 局部的平衡面。Barrell 早在 1917 年就提出了基准面作为一种平衡面的思想。他认为“外力促使(地球表面)向其靠近的、在其上既不发生沉积作用、也不发生剥蚀作用的一个面”。Barrell 认为基准面是一个受构造活动、气候变化、全球海平面变化而变化的局部平衡面。当基准面上某处的高程发生变化时,沉积体系的平衡便被打破,该体系便通过自动的自恢复“外力”——沉积物的供给(决定沉积作用)或沉积环境的物理活动(将导致剥蚀作用)进行相关调整。若该处的基准面被抬升到地表之上时,被搬运到该处的沉积物中便有更多的沉积物沉积下来,从而使得地表上升到新的基准面处;若某处和基准面下降到地表之下时,该处动力将增强,将沉积物带出,从而发生剥蚀直到地表下降到新的基准面位置。

(2) 描述性的平衡面。Barrell 关于基准面的理解被地层学家广泛接受,直到 1964 年 Wheeler 对这一概念提出挑战。Wheeler 对基准面的理解与 Barrell 的不同主要体现在三个方面:首先 Wheeler 认为基准面是一个描述性的界面,而不是一个控制面“……(基准面)什么也控制不了”;其次他认为基准面是一个不规则和不稳定的面,“就基准面的精确形态来讲,可以把它看作是一个极为活跃的面,在不同的地表位置处,其振幅在不断地波动”;再次,他将基准面与静态平衡视为同义词:基准面外的任一点都不可能出现静态平衡,基准面上的任一点都不可能发生沉积作用或剥蚀作用,哪怕是最轻微的。“当基准面降于地表之下时,沉积物被冲走,不管其颗粒有多小;基准面上升到地表之上时,沉积物便沉积下来,然而只是暂时的”。

(3) 长期平衡面或平均时间基准面。与 Barrell 的基准面概念在以下两点存在差异:第一,该平衡面并不是一种真正意义上的平衡面,它只是沉积体系长期平衡的一个量度(Chorley & Kennrdy, 1971);第二,它并不把真正的沉积区和剥蚀区分开(而 Barrell 的概念则把两者分开),事实上它是将经常发生沉积的区域和经常发生剥蚀的区域分开。在平均时间基准面之下也发生剥蚀作用,但剥蚀作用没有沉积作用常见;在平均时间基准面之上也发生沉积作用,但它的发生没有剥蚀常见。当地层学家谈及“在基准面之下的暂时性沉积”时,其基准面便是指平均时间基准面。

(4) 动态平衡面。指时间段内瞬时地球表面的平均位置,也就是瞬时地球表面围绕其上下波动的中心位置。大多数地层工作者把平均地球表面看作只不过是长期平衡的一种标志,然而也有一些却走的更远一些。首先,他们假定瞬时地球表面是沉积体系状态的一种度量,而且这种假定也是合理的;其次,他们指出,沉积体系的这种状态总是一直围绕某个缓慢变化的中心值上下波动;最后,他们认为沉积体系处于所谓的“动态平衡”状态下(Swift & Thone, 1991)。

动态平衡面是用于表征开放体系平衡的概念:该体系允许能量和物质以任意方向穿过该

面，而基准面则围绕平衡或缓慢变化的中心值波动（Chorley & Kennedy, 1971）。所有的沉积体系都是开放体系，因而认为其处于动态平衡状态是合理的。如果在沉积体系中某点处于动态平衡状态，该点必然存在短期的沉积和剥蚀速率的波动，而瞬时地球表面高度便会围绕某个稳定的或缓慢变化的中心位置波动。然而事实上并不能得出这一结论。某点瞬时地球表面围绕稳定的或缓慢变化的中心位置波动并不能得出在这一位置处于动态平衡，在大多数沉积体系中存在的短期波动也并不说明沉积体系处于动态平衡状态。当然可能某些沉积体系是“锁定”在某个动态平衡体系中，例如在滨岸沉积体系中，但并不能因此而忽视大多数沉积体系并不处于动态平衡中。而地貌学者和水动力学学者早在 20 世纪 60 年代和 70 年代就发现在开放体系中存在无数个偏离平衡的体系（Ferguson, 1977; Karcz, 1980; Thorn, 1988）。

Cross 认为基准面为一个势能面，是“一个围绕地球表面上下波动的、抽象的等势面，在该面上沉积物通量的改变量为零”，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。它描述了迫使地表上下移动到某一个位置的能量，在这个位置上地形梯度、沉积物供应和可容空间是平衡的（Cross 等, 1993）。在此概念中体现了三点：其一该面是一个想象的面，并非一个实实在在的面；其二该面是以地表为中心而上下波动的；其三是该面上沉积物通量的变化为零，也就是说该面是区分沉积作用与剥蚀作用的分界面，地表处于该面之上则发生剥蚀作用，而使得沉积物通量增大，低于该界面则发生沉积作用，使得沉积物通量降低，只有在地面与该界面重合时，该处的能量平衡，只发生沉积物的路过作用（图 1-1）。这一思路同 Wheeler 的理解相同，其发展体现在对于基准面与沉积作用关系的讨论上，而对于基准面概念本身的理解，似乎没有明显的发展。

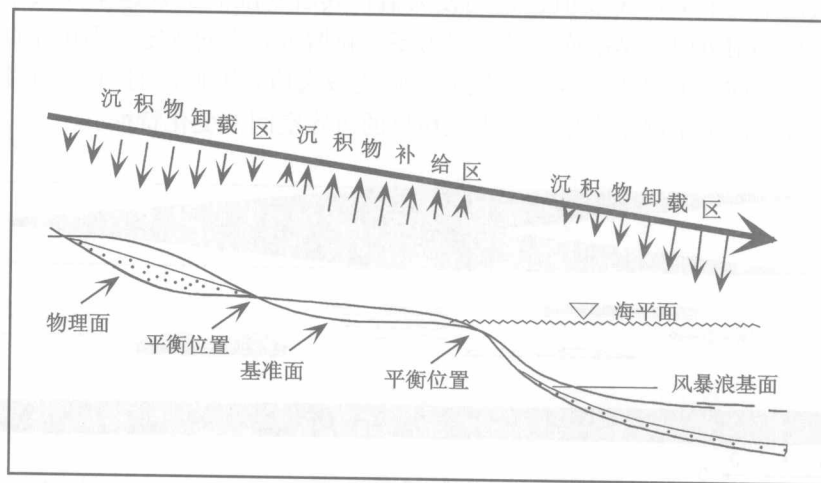


图 1-1 基准面概念

由于控制基准面波动的因素如构造沉降、海平面变化、气候等的周期性变化，使得地表各处的平衡不断地被打破和恢复，产生了基准面的波动。控制因素的周期性，使得基准面的波动也具有周期性。基准面在其波动过程中总是具有朝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旋回与下降旋回，称为基准面旋回（base-level cycles）。基准面可以完全在地表之上，或地表之下摆动，也可以穿越地表摆动到地表之下再返回，后者称为

基准面穿越旋回 (base-level transit cycle)。在一个基准面旋回期内, 在有效可容空间范围内, 沉积物堆积, 形成一个地层单元。一般的在分析中常用“正三角”(▲)来表示基准面上升半旋回, 而用“反三角”(▼)来表示基准面下降半旋回。

二、基准面旋回内的可容空间

可容空间是在时间进程中产生或消失的供沉积物堆积的累计空间, 它限定了某一地理位置处可能沉积下来的最大的沉积物体积, 更确切地说, 高分辨率层序地层学中的可容空间是有效可容空间。在高分辨率层序地层学中, 可容空间相当于基准面与沉积表面之间的高程差, 当其值为正时, 说明该处具有供沉积物堆积的可容空间; 若为负值, 则表明此处不仅没有供沉积物堆积的空间, 相反地还具有将沉积物从该处移走的趋势。

事实上影响沉积物堆积的, 除了可容空间之外, 还有沉积物供给。把沉积供应和可容空间增减直接联系起来, 通常用 A/S 值来衡量两者对沉积的综合效果。可通过分析 A/S 值变化 (A : 可容空间, S : 沉积物通量), 分析沉积过程中的地层样式的变化。 A/S 值增加, 沉积剖面特定位置处可供沉积物堆积的空间相对大于沉积物供给体积, 则特定位置处单位时间内保存下来的沉积物体积增大, 除非沉积物不足以填充新增空间。 A/S 值降低, 沉积剖面处特定位置处可容空间相对沉积物供给减小, 沉积物保存下来的能力和数量较前期为小。

在基准面旋回内, 随着基准面的升降波动, 新增可容空间的产生及其累积可容空间也是有规律可循的。在基准面处于上升半支的最低位置附近时, 基准面上升速度较慢, 新增可容空间的增加较慢, 同时前期的累积可容空间较小, 一般表现为低可容空间和小的 A/S 值特征; 随着基准面上升速度的增大, 在基准面上升半支的中部, 其上升速度达到最大值, 新增可容空间增大速率达最大, A/S 值也达到较大值; 其后基准面上升速率又减小, 在基准面位于上升半支顶部附近时, 基准面上升速率为零, 新增可容空间为零, 但由于前期累积可容空间的作用, 使得此时的累积可容空间较大, 常达最大值, 因而此时 A/S 值较大, 形成最深水的沉积; 在基准面下降半支中, 则出现相反的可容空间的变化特征。

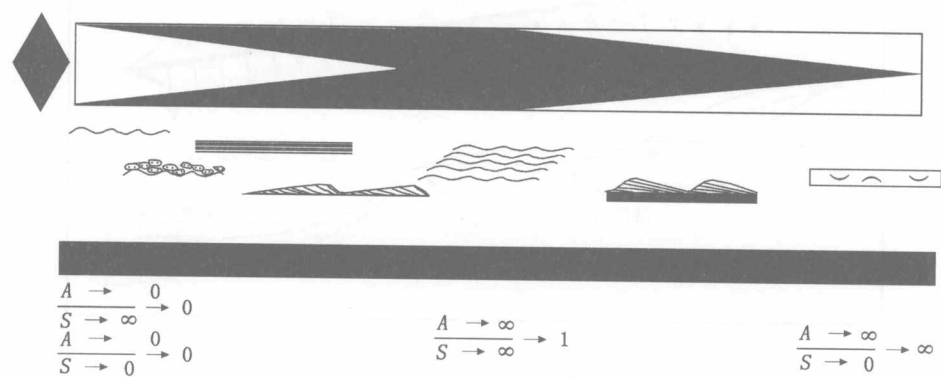


图 1-2 A/S 值与沉积物保存能力

三、地层叠加样式

地层叠加样式是由于可容空间规律地在地理和时间位置上的变化而产生的一种可以识别的地层堆积叠置方式。可按几何形态分为三种型式: 向海阶进 (Seaward Stepping, 简称

SS)，向陆阶进（Landward Stepping，简称 LS），垂向加积（Vertical Stepping，简称 VS）。向海阶进地层叠加样式是后一个旋回与前一旋回相比，其沉积位置更靠近湖心位置，或者说，沉积物向湖方向推进了；向陆阶进地层叠加样式中后期沉积物与前期沉积物相比，其沉积位置更靠近湖岸方向，或者说，沉积物向岸方向退积了；垂向加积地层叠加样式中后期沉积物与前期沉积物相比，其沉积位置没有明显的变化。

叠加样式是基准面升降旋回内 A/S 值变化的产物。在 A/S 值增大时，可容空间向陆方向增大，形成 LS 型地层叠加样式，在 A/S 值减小时，可容空间向陆减少，沉积物向海迁移距离增大，形成 SS 型地层叠加样式，而在 A/S 值处于稳定时则形成 VS 型地层叠加样式。

地层叠加样式的形成与基准面旋回的位置相关。一般地在基准面上升初期，新增可容空间增加较小且速率较小，一般形成垂向加积的地层叠加样式，随基准面加速上升，可容空间增大加快，形成向岸加积的地层叠加样式，在基准面达到最高时，新增可容空间较小，沉积物向岸推进减小，形成以垂向加积为主的叠加样式；随后，基准面下降，可容空间减小，沉积物向湖推进，形成以向湖进积为主的地层叠加样式（图 1-3）。

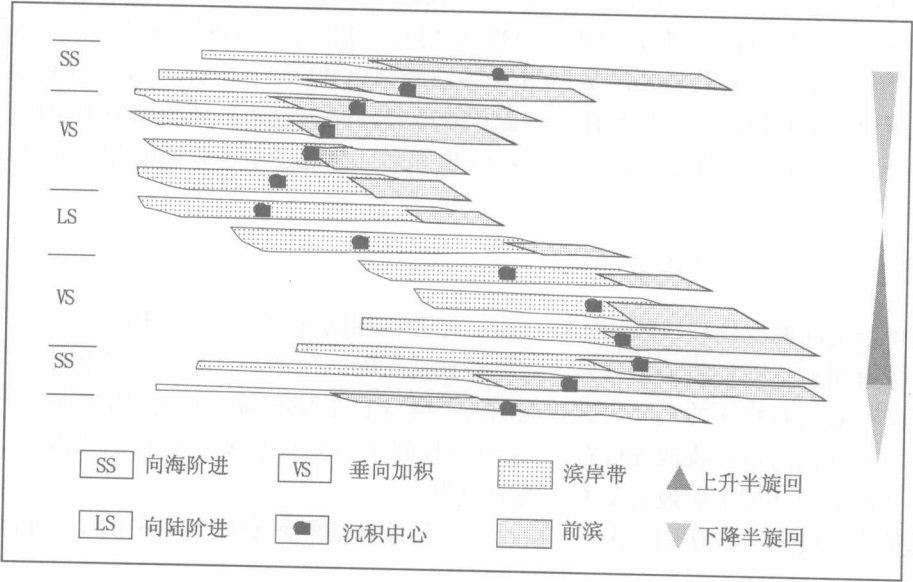


图 1-3 基准面旋回内地层叠加样式特征

四、沉积物体积分配

假定沉积物供应量为一常量，即沉积体系内的物质质量守恒，在基准面旋回过程中，随着基准面的波动，不同地理位置处的可容空间也发生变化，其所能保存的沉积物量也在变化，相应地各地理位置处实际所保存的沉积物体积也在发生变化。而在整个沉积体系内，某一位置沉积物量的增多或减少正是以其他位置处沉积物量的减少或增大为基础的，像这种沉积物在基准面旋回内的不同时期内在沉积体系内不同地理位置处分配的沉积物体积的差异就是沉积物体积分配。基准面上升期，地表和基准面的交点向上坡方向移动，扩大了可容空间的范围，增加了向盆地边缘方向沉积物储存的能力，引起堆积在盆地边缘相域内的沉积物体积的增加。盆地边缘相域内沉积物储存空间的增加必然减少了向下坡方向搬运的有效沉积物

体积，从而使得堆积在靠近盆地中心位置相域内的沉积物体积减少。基准面下降期，基准面与地表的交点向湖心方向移动，盆地边缘相域的可容空间减小，储存沉积物的能力减小，使得更多的沉积物被搬运到近盆地中心位置。这种在基准面旋回期间，在不同相域内保存不同沉积物体积的过程即为“沉积物体积分配”。如图 1-3 所示，在基准面旋回内不同时期，沉积物的沉积中心位置发生规律性的变化，这就是沉积物体积分配的结果。

沉积物体积分配有三种表现形式：(1) 地层旋回的对称性；(2) 反映原始地貌要素保存程度的相分异作用；(3) 进积/加积地层单元的叠加样式。沉积物体积分配是物质守恒为前提，形成的关键在于可容空间。在不同的基准面旋回位置、不同地理位置的可容空间不同，对可容空间的响应也不同，便产生了沉积物的体积分配。在一个基准面旋回过程中，由于所处的位置不同，其上升期与下降期的可容空间的差异，导致其旋回的对称性的差异；而旋回不同位置处的可容空间的不同，直接决定了沉积地貌的保存程度；进积/加积地层样式则是在较长期地层旋回内，次级基准面旋回位置处可容空间的反映。

体积分配改变了地层旋回在时间和空间上的对称性。旋回对称性记录的是以岩石的形式保存下来的基准面上升和下降的时间比例。可识别出对称性的三种极端形式：不对称的基准面下降旋回（ABCDABCD 型或 CDWXCDWX 型），对称型（ABCDCBA 或 CDWXWDC）和不对称的基准面上升旋回（ZYXWZYXW 或 XWDCXWDC），这里，ABCD 和 WXYZ 分别表示海相和陆相的相序。旋回对称性的变化伴随着不同位置处各种相域中地层厚度随可容空间的变化。单位时间内地层厚度（沉积物沉积速率）与地层不连续面的频率成反比，与相的非均质性成正比。

五、相分异和储层非均质性

伴随可容空间的变化和沉积物体积分配，保存在相同沉积环境中的相序、相类型以及相的分异性也有明显不同，称为相分异，具体包括地层的几何形态、相组合和相序、岩石多样性、层理类型和岩石物性的差异，这些地层的差异存在于基准面旋回过程中相同的相域内不同的位置（基准面内位置或地理位置）。相分异反映了原始地貌要素保存的程度，以及存在于不同时间的沉积环境中的地貌要素类型的变化。

有两种主要的相分异作用（图 1-4）。第一种是在基准面变化周期中的单个相属性的改

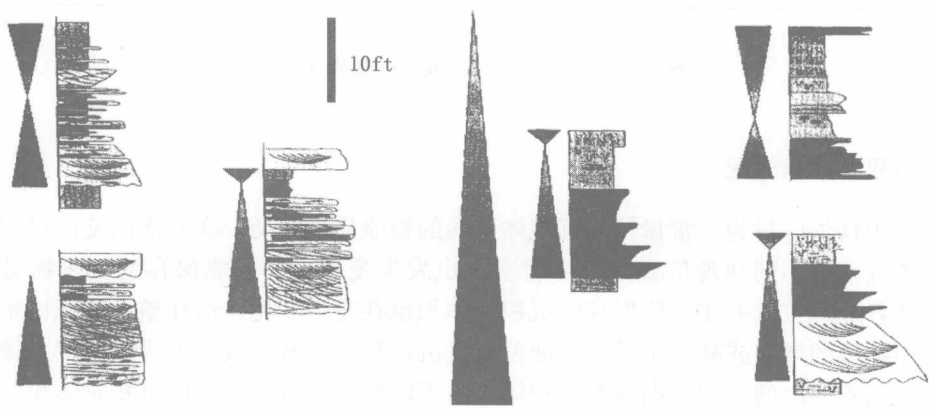


图 1-4 两种形式的相分异
左侧为相内属性的变化，右侧为相序的变化

变，这种变化正是形成储层层内非均质性的根源。在高可容空间背景下，沉积物较为容易保存下来，多为较完整的沉积相序，而且由于可容空间较大，砂体相互切割较少，因而多形成内部夹层较发育的、侧向连续性较差的、孤立状的砂体；在低可容空间背景下，则产生相反的情况。例如，高可容空间与低可容空间形成的河道砂体，其几何形态（宽度与厚度比）、侧向连续性、相互截切程度、底形类别与保存程度、底部滞留沉积厚度与类型等均有明显差异（图 1-5）。又如，同是辫状河流沉积，尽管原始地貌要素相同，但由于受沉积物沉积时可容空间的限制，在低可容空间时期辫状河流的沉积物相的多样性有限，与其相对照，在高可容空间时辫状河流的沉积物相的多样性增加（图 1-6），表明其原始地貌要素以更多种类和更大比例地被保存。

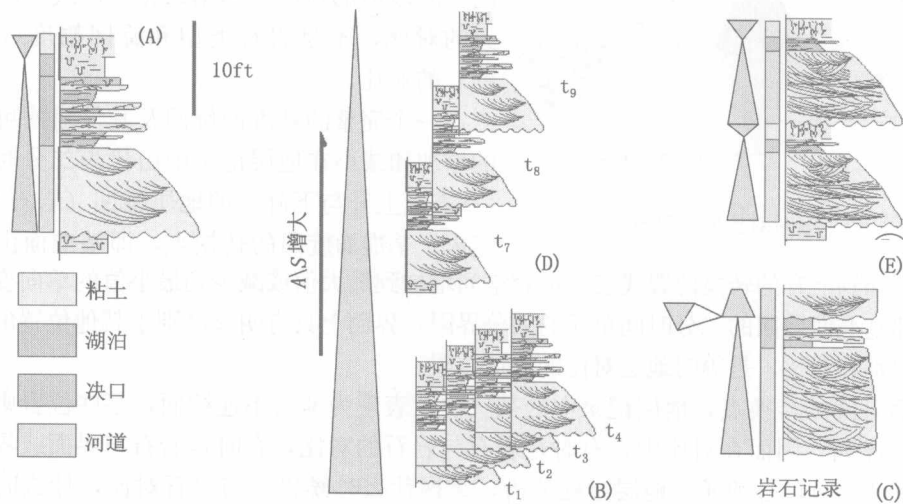


图 1-5 相内属性变化形成机理

A 为一个完整相序；C、E 为不同基准面旋回位置处由于 A/S 比不同而形成的不同河道沉积；B、D 为其形成过程

第二种相分异作用表现为相序或相组合的变化。这些相组合的变化反映了沉积环境的地貌组成的变化，而这则决定了储层砂体平面非均质特性，而不同时期的地层叠置方式又最终形成了砂体的层间非均质差异。例如在泛滥平原沉积中（图 1-4），在不同的可容空间背景下，其沉积相序是不同的。在低可容空间背景下，多沉积以河道为主的相序，相序内部河道多相互切割叠置，顶部则发育溢岸沉积；在中等可容空间的背景下，发育溢岸和决口扇相序，极少有河道发育，且决口扇的规模较低可容空间下要大；在高可容空间背景下，由于沉积物不足，多以泛滥平面中的沼泽相、湖相泥为主。另一个常见的例子是基准面下降期波浪为主的开阔海相临滨沉积环境与基准面上升期开阔海湾、河口湾环境潮汐流为主的沉积环境的交替。地貌要素交替出现在沿地形沉积剖面的相同位置和相同的水深范围。实际上，面向开阔海、以波

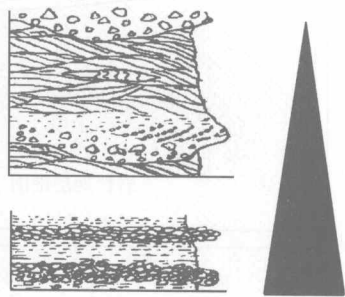


图 1-6 辫状河不同基准面位置处形成的层内属性变化

浪为主的平直海岸在基准面上升、可容空间增大期间暂时被海湾化了的海岸取代，在那波浪能量被减弱，潮流作用增强。

六、基准面旋回对比原则

地层旋回性的形成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、沉积物路过的非沉积作用和沉积非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。高分辨率层序地层对比正是依据基准面旋回及其可容空间的变化导致岩石记录的这些地

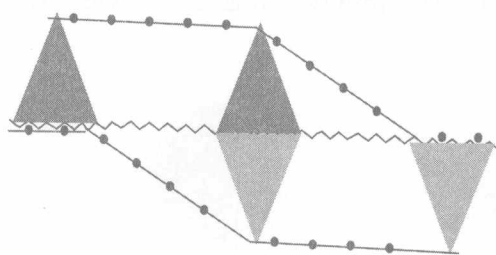


图 1-7 等时对比的三种样式

层学和沉积学响应的过程——响应动力学原理进行的。高分辨率层序地层对比是等时对比，是将同一时段内的地质作用结果相对比或时间地层单元的对比，不是岩石类型和旋回幅度（地层厚度）的对比。

一个完整的基准面旋回及其伴随的可容空间的增加和减小在地层记录中由代表二分时间单元（基准面上升与下降）的地层旋回（岩石与界面）组成。基准面旋回的转换点，即基准面由上升到下降或由下降到上升的转换位置代表了可容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限，界面上具有明显区别于其他位置的沉积特征，容易识别和对比，是等时地层对比的优选位置。

基准面升降的转换点在地层记录中的某些位置表现为地层不连续面，某些位置则表现为连续的岩石序列。因而在对比中，有时是岩石与岩石的对比，有时是岩石与界面或界面与界面对比（图 1-7），必须通过地层过程分析，掌握什么时候岩石与岩石对比，什么时候岩石与界面或界面与界面对比。Wheeler (1964) 提出的时间—空间图解法是对地层剖面形成时的地质过程进行分析的有效方法（图 1-8），有利于对地质过程（时间 + 空间）的地层响应

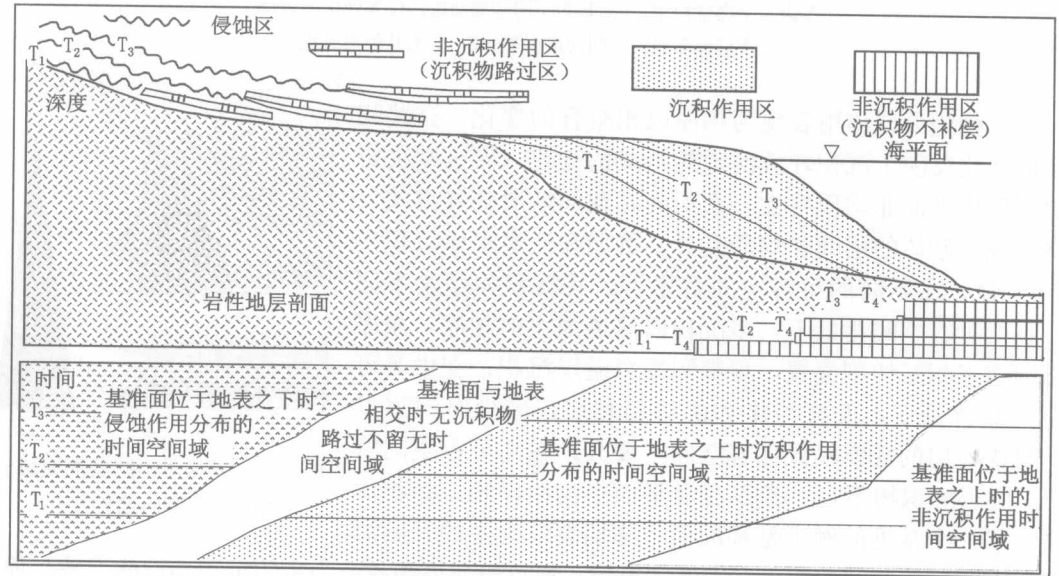


图 1-8 地质作用的 Wheeler 图解