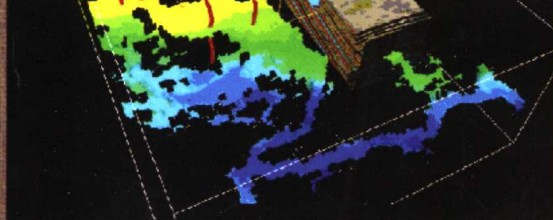


国家重点基础研究发展规划
项目(G19990225)资助



现代油藏描述新方法

● 沈平平 宋新民 曹宏 著

石油工业出版社

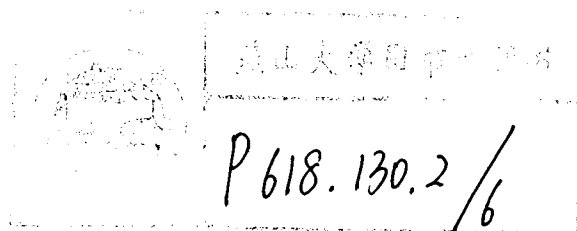
0.2

NEW

国家重点基础研究发展规划项目 (G19990225) 资助

现代油藏描述新方法

沈平平 宋新民 曹 宏 著



石油工业出版社



0351174

内 容 提 要

本书以现代油藏描述的主导思想为基础框架,提供了一套力求在思路更加明确、在方法上更加综合、在手段上更加有针对性的技术。全书共分四章,包括高分辨率层序地层、储层流体流动单元、油藏地球物理技术和定量储层模拟四个方面。每一部分在充分了解国内外研究现状的基础上,吸收国外的先进思路和方法,又创新性地发展适合我国陆相储层的研究方法,并在勘探开发中具体实践,取得比较满意的效果。

本书可供从事油藏描述的科研人员及石油院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代油藏描述新方法/沈平平,宋新民,曹宏著.

北京:石油工业出版社,2003.1

ISBN 7-5021-3874-9

I. 现…

II. ①沈…②宋…③曹…

III. 油藏描述-方法

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 056406 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

河北省地勘局测绘院印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 14 印张 354 千字 印 1—1000

2003 年 1 月北京第 1 版 2003 年 1 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3874-9/TE·2806

定价: 60.00 元

前言

随着油气田勘探开发工作的不断深入,油气田的发现和成熟油田的开发难度也日趋复杂。早些年多发现整装构造油气藏,现在逐步转向发现构造岩性和断块岩性为主的隐蔽性油气藏;成熟油区的开发表现为从部分高含水向全面进入高含水、高采出程度,从储采基本平衡向严重不平衡过渡的严峻形势以及我国陆相储层的强非均质性。这些无法回避的现实,对我国复杂的陆相储层来说,无论新油气田的发现还是成熟油田以提高水驱波及效率和采收率为目的的深度开发,对技术的依赖性日益增强,而现代油藏描述正是适应新的开发形势而产生的综合性油藏描述技术和方法,会极大程度地提高储层非均质性的表征水平,从而较大幅度地改善水驱开发效果。

油藏描述技术经历了自 20 世纪 70 年代以测井为主体的评价,到 20 世纪 80 年代多学科协同油藏描述和 20 世纪 90 年代多学科一体化的现代油藏描述阶段。现代油藏描述是对油藏特征进行多信息综合、多手段协同工作、多学科一体化的描述工作,最终成果能建立反映油藏圈闭几何形态及其边界条件、储集特征、流体性质分布特征的三维或四维油藏地质模型。现代油藏描述具有组织方式向多学科协同的集约化方向发展、地质建模向集成化多功能可视化方向发展、研究向理论化和定量化方向发展、应用新技术新方法的节奏速度加快等特点。

本书正是以现代油藏描述的主导思想为基础框架,提供了一套力求在思路更加明确、在方法上更加综合、在手段上更加有针对性的技术。全书共分四章,包括高分辨率层序地层、储层流体流动单元,油藏地球物理技术和定量储层模拟四个方面。每一部分在充分了解国内外研究现状的基础上,吸收国外的先进思路和方法,又创新性地发展适合我国陆相储层的研究方法,并在勘探开发中具体实践,取得比较满意的效果。

第一章主要介绍高分辨率层序地层学在陆相地层中的应用。高分辨率层序地层学以美国克罗拉多矿业学院 Crosse 教授的地层基准面原理、体积划分层理、相分异原理和旋回等时对比法则(三个原理和一个法则)为理论基础,提出不同级别层序界面的成因类型、识别标志及其在旋回级次划分中的意义,比较详细的阐述了基准面旋回结构的基本类型,对不同的叠加样式进行了沉积动力学分析。在此基础上,通过大量的实例论证了 A/S 值与砂体空间展布规律和储集体物性的关系,以及高分辨率层序地层在小层砂体追踪和等时对比中的应用。

第二章主要介绍储层流体流动单元研究,在对国内外储层流体流动单元研究方法评述的基础上,创新性地提出油藏非均质综合指数法(I_{RH})进行流体单元研究,并分别应用于储层级、岩相级和岩心级流动单元的划分,由此提出不同层次结构流动单元的研究思路。同时也提出流动单元的定量识别和分类评价方法。

第三章比较系统地介绍了现代油藏地震技术,如储层地震反演技术、地震属性及其应用、神经网络定量地震相分析方法、相干体和三维可视化技术、井间地震技术、时延地震技术和多波地震技术。其中前四项技术在我国得到比较广泛的应用,在应用技巧方面经过一段时间的摸索,得到进一步的发展,现场应用取得良好的效果,附有很多实例来说明;后三项技术限于资料的局限性,在我国并没有得到很好的应用,国外已得到较成功的应用,预计将在我国成熟油区的和复杂油藏的开发方面有着广阔的应用前景,因此在这里也作了一定的介

绍。

第四章在对定量储层模拟研究现状评述的基础上,重点介绍了5种储层定量模拟方法:基于地质统计和随机地震反演地质建模方法、随机模拟技术、储层参数的分形表征及分形条件模拟、储层相对稳定性及其在储层模拟中的应用、基于神经网络和地质统计学方法和储层参数预测,这些方法多数为作者近年来悉心研究的结果,随机模拟在适用性的技巧方面作了有益的探索。本章的最后一节储层定量模拟中的智能化技术将是今后发展的重要方向,也作了简单的介绍。

总之,本书是一本介绍现代油藏描述新方法高度综合的学术著作,也是国家重点基础研究发展规划项目“大幅度提高石油采收率的基础研究”的部分科研成果(项目编号G19990225)。参与本项目研究和本书编写的同志还有成都理工大学的郑荣才教授、石油大学(华东)的林承焰教授、中国石油勘探开发研究院夏朝辉博士、郑小武博士和周丽清博士、石玉梅博士。全书由沈平平教授和宋新民博士统稿,最后由沈平平教授审定。本书编写过程中得到刘小燕同志帮助打印和清绘图件,在此表示谢意。由于编写时间仓促,书中不当之处在所难免,还请读者不吝指正。

作 者

2002年11月

目 录

第一章 高分辨率层序地层学在储层研究中的应用	(1)
§ 1 高分辨率层序地层学的理论基础	(1)
1.1 地层基准面原理	(1)
1.2 体积划分原理	(3)
1.3 相分异原理	(4)
1.4 旋回等时对比法则	(5)
§ 2 界面成因类型、识别标志及其在旋回级次划分中的意义	(6)
2.1 层序界面的成因类型、级别和识别标志	(7)
2.2 旋回级次的划分和控制因素	(7)
§ 3 基准面旋回结构和叠加样式的沉积动力学分析	(11)
3.1 基准面旋回的识别	(11)
3.2 基准面旋回结构的基本类型	(14)
3.3 基准面旋回结构和叠加样式的沉积动力学分析	(22)
§ 4 高分辨率层序地层学在储层研究中的应用	(30)
4.1 各级次基准面旋回的划分及其研究意义	(30)
4.2 A/S 值与砂体空间展布规律和储集体物性的关系	(39)
4.3 高分辨率层序地层在小层砂体追踪和等时对比中的应用	(50)
参考文献	(58)
第二章 储层流体流动单元研究	(60)
§ 1 储层流体流动单元概述	(60)
§ 2 储层流体流动单元的研究方法	(62)
2.1 精细沉积学研究方法	(62)
2.2 岩石物理相识别方法	(62)
2.3 FZI 划分方法	(63)
2.4 岩石物性三参数综合研究方法	(64)
2.5 应用生产动态资料进行流动单元研究	(64)
2.6 油藏非均质综合指数 I_{RH} 法	(65)
§ 3 流动单元的定量识别和分类评价方法	(65)
3.1 利用活度函数分析法进行流动单元识别	(66)
3.2 利用聚类分析方法进行流动单元识别和分类	(67)
3.3 灰色综合评价方法	(70)
§ 4 不同层次结构的储层流体流动单元	(71)
§ 5 应用非均质综合指数法识别和表征储层流体流动单元	(73)
5.1 储层级流体流动单元划分步骤	(73)
5.2 岩相级流体流动单元划分	(77)

5.3 孤东七区西取心井流体流动单元特征	(77)
参考文献	(79)
第三章 油藏地震技术在储层预测中的应用	(81)
§1 储层地震反演技术	(81)
1.1 概述	(81)
1.2 波阻抗反演的主要方法	(81)
1.3 反演新方法	(83)
§2 地震属性及其应用	(86)
2.1 地震属性的概念及发展	(86)
2.2 地震属性的类型	(88)
2.3 地震属性的提取	(88)
2.4 如何正确使用地震属性	(91)
2.5 地震属性与储层物性关系的试验数据导出法	(92)
2.6 地震属性分析中的地质统计学方法	(94)
2.7 常规地震属性分析方法的应用	(97)
2.8 应注意的问题	(98)
§3 神经网络定量地震相分析方法	(99)
3.1 神经网络定量地震相分析原理	(99)
3.2 自组织神经网络地震相分析程序	(101)
3.3 自组织神经网络地震相分析的应用	(102)
§4 相干体和三维可视化技术	(103)
4.1 地震相干数据体的计算	(104)
4.2 相干体断层的解释过程	(104)
4.3 相干技术的优点与应用中的注意事项	(105)
4.4 相干体技术的应用	(105)
4.5 三维可视化基本概念	(105)
4.6 三维可视化的基本流程	(106)
4.7 三维可视化技术的应用	(108)
§5 井间地震技术	(108)
5.1 概述	(108)
5.2 井间地震基本原理与数据采集	(108)
5.3 井间地震资料的处理	(110)
5.4 其它井间地震成像方法	(113)
5.5 井间地震资料的解释与应用	(113)
§6 时移地震技术	(118)
6.1 时移地震技术简介	(118)
6.2 开展时移地震的可行性研究	(118)
6.3 地震资料的采集	(120)
6.4 地震资料的处理	(120)
6.5 四维地震解释技术	(121)

6.6 四维地震的应用	(123)
§ 7 多波地震技术	(123)
7.1 多波地震技术概述	(123)
7.2 多波地震技术的发展与现状	(124)
7.3 多波多分量地震数据采集	(126)
7.4 多波多分量地震数据处理与解释	(128)
7.5 多分量地震技术的应用	(132)
参考文献	(140)
第四章 基于地震、测井和地质多信息的定量储层模拟	(144)
§ 1 定量储层模拟的研究现状	(144)
§ 2 基于地质统计和随机地震反演的定量储层地质建模方法	(145)
2.1 具外部漂移的泛克里金法	(147)
2.2 Secon Welm 的插值方法	(149)
2.3 Secon Welm 的建模流程	(150)
2.4 效果分析	(155)
2.5 讨论	(156)
§ 3 随机模拟技术	(157)
3.1 储层随机模拟概述	(157)
3.2 储层随机建模的现状评述	(159)
3.3 地质变量的空间结构分析	(165)
3.4 随机模拟原理	(172)
3.5 随机模拟方法的分类	(177)
§ 4 储层参数的分形表征及分形条件模拟	(178)
4.1 引言	(178)
4.2 岩心孔隙结构分形特征及其测定	(179)
4.3 孔隙结构分形特征在油田开发中的应用	(180)
4.4 储层参数中的分形特征及其测定方法	(182)
4.5 分形条件模拟及其应用	(183)
§ 5 储层相对稳定性及其在储层模拟中的应用	(188)
5.1 储层相对稳定性 (RRS)	(188)
5.2 RRS 在储层模拟中的应用	(189)
§ 6 基于神经网络和地质统计学方法的储层参数预测	(193)
6.1 基于神经网络和多元线性回归的多参数预测	(193)
6.2 依据径向基函数神经网络和地质统计学方法的储层参数预测	(198)
§ 7 储层定量模拟中的智能化技术	(204)
7.1 引言	(204)
7.2 遗传算法	(205)
7.3 演化算法	(206)
参考文献	(209)

第一章 高分辨率层序地层学在 储层研究中的应用

层序地层学原理及其在实际应用中的有效性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,可对地层分布模式做出更为合理的解释和对同时代成因地层内的沉积体系域进行划分,为含油气盆地的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,从而有力地推动了地质学,特别是石油地质学的发展。但是,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,以提高层序地层分析的时间—地层分辨率以及储层预测评价和描述的准确性。正因为如此,自从 Cross (1994)^[1]为代表的美国科罗拉多矿业学院成因地层研究小组提出的高分辨率层序地层学 (high-resolution sequence) 问世以来,其全新的理论、概念、技术方法和显著的实际应用效果,业已引起国内外广大石油地质学和沉积学、层序地层学等地质工作者的高度重视,并在我国石油勘探开发领域,取得了众多研究成果和显著的经济效益,逐步发表了一批有价值的学术论文,有力地推动了高分辨率层序地层学理论体系及其技术方法在我国沉积学和石油地质学领域的研究和发展。如运用构造和地层沉积学响应特征进行高分辨率层序划分和对比,建立等时地层格架,在油田范围内进行储层的三维预测和评价,编制短时间尺度大比例尺的等时沉积微相图、精细描述储集砂体的几何形态、非均质性和储层结构,为储层建模和流体流动单元划分、建立储层的流体流动单元和数值模拟,以及剩余油分布状况分析和注采工艺调整、加密井和扩边井部署等勘探开发等深层次的地质问题和技术难题的研究和解决,提供了更为可靠的地质模型。

§ 1 高分辨率层序地层学的理论基础

与盆地或大区域规模级的经典层序地层学分析不同,高分辨率层序地层分析以地表三维露头、钻井岩心、测井和高分辨率地震反射剖面为主要研究对象,其中尤以钻井岩心和测井剖面资料为最重要的研究基础。通过各种资料的精细层序划分和对比技术,将钻井或露头,以及地震剖面中的一维或二维信息转换为三维地层关系的信息,从而建立区域、油田乃至区块或油藏级规模储层的等时成因地层对比骨架,大大提高储层、隔层及油层分布的预测和评价精度。这一层序分析工作主要基于下述 4 个基本原理。

1.1 地层基准面原理

以 Cross (1994)^[1]教授为主的成因地层研究小组认为,受海平面(或湖平面),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依据。Cross 等引用并发展了 Wheeler (1964)^[2]提出的基准面概念,分析了基准面旋回与成因层序形成的过程—响应原理。认为地层基准面并非海平面,也不是相当于海平面或湖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、略向盆地方向下倾和呈抛物线状的抽象面(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1-1)。基准面在升、降变化过程中具有向其幅度的最大值或最小值单向移动的趋势,由此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合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)。在地表的不同部位,于同一时间域发育的基准面旋回是等时的,在一个基准面旋回升、降运动变化过程中保存下来的岩石即为这一基准面旋回时间域的成因地层单元,即成因层序,其以时间面为界面,因而为一个时间地层单元。从图1-1可看出,当基准面位于地表之上时,提供了沉积物的堆积空间,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,而侵蚀作用占主导位置。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,或沉积与侵蚀均是局部或暂时的,两种作用主要处于动态平衡状态,沉积物仅仅表现为路过(sediment bypass)。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出四种地质作用状态,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无沉积作用的间断。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(间断面或相关整合面,图1-2)。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,也可由单一的上升期或下降期沉积的岩石+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。

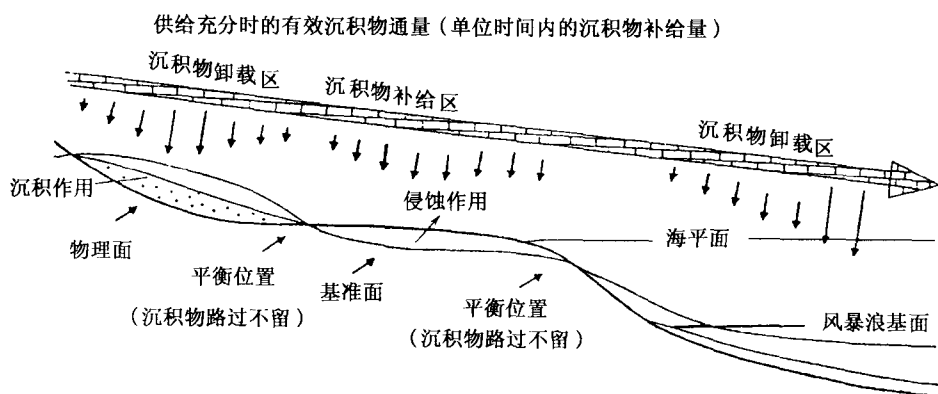


图1-1 基准面、可容纳空间和反映可容纳空间与沉积物供给之间平衡时的地貌状态
(据 Cross, 1994 略作修改)

基准面处于不断地升、降运动中,当其位于地表之上并相对于地表处于持续上升状态时,可容纳空间逐渐增大、沉积物在该可容纳空间内堆积的潜在体积和速度增加,沉积物的堆积体积和速度同时受控于物质来源和搬运的地质过程限制。也就是说,可容纳空间控制了某一时间内、某一地理位置的沉积物堆积最大值。假定沉积物质供给速度不变,可容纳空间与沉积物供给量比值(A/S 值)即决定了可容纳空间沉积物(有效可容纳空间)的最大堆积量、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和下切幅度将增加,侵蚀速度和下切幅度受基准面下降幅度和沉积物搬离地表过程的双重因素控制,在有地表径流作用的位置侵蚀速度相对较快和下切侵蚀幅度一般相对较大,延续时间较长,而无地表径流作用的部位在时间上相对滞后,侵蚀速度变慢和下切

侵蚀幅度减小。因此，由基准面的升降运动可描述可容纳空间的形成或消失，及其与沉积作用之间的相互作用和变化过程。据此，可将基准面视为一个势能面，它反映了地球表面力求与基准面平衡的地表过程之间的不平衡程度，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，并向靠近基准面的方向运动，以达到两者处于同一位置的平衡状态。

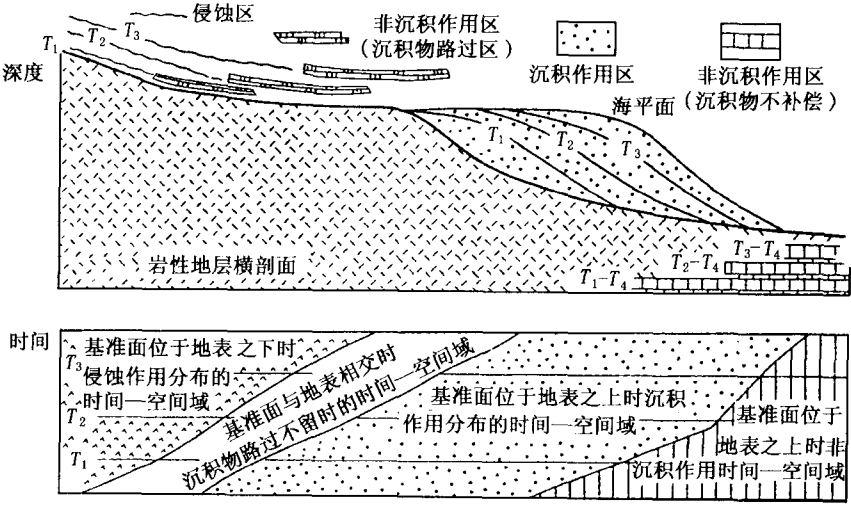


图 1-2 岩性地层剖面及侵蚀作用、沉积物路过、沉积作用和非补偿沉积作用的时空迁移对比关系图解 (据 Wheeler, 1964)

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沉积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地层过程—沉积响应关系，Cross (1994) 提出了沉积物体积划分 (volumetric partitioning) 的概念。沉积物体积划分系指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，以及诸多的沉积学和地层学响应。伴随着有效可容纳空间 (所谓有效可容纳空间系指可容纳空间中可被沉积物充填的那一部分空间) 位置的迁移 (图 1-3A)，直接控制着滨岸或水道化砂体的沉积体系的体积划分及沉积物堆积样式的变化 (图 1-3B)。如在基准面下降期间，有效可容纳空间位置向盆地方向迁移，空间向盆地方向增大，向陆减小，因而滨岸或水道化砂岩沉积体系逐渐增大，陆上沉积体积减小。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，陆地相域的沉积体积逐渐增大。又如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) 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 1-3B)，其基本规律为向盆地方向迁移的进积 (seaward-stepping) 堆积样式，形成于较长期基准面旋回的下降晚期至刚进入上升初始期的时间段，相继产生的垂向加积 (vertical-stepping) 地层形成于基准面旋回上升的早、中期阶段，而向陆方向迁移的退积 (landward-stepping) 堆积样式，则出现在持续的基准面上升晚期，随之再度产生的加积地层则出现在基准面上升的末期和下降的早中期。

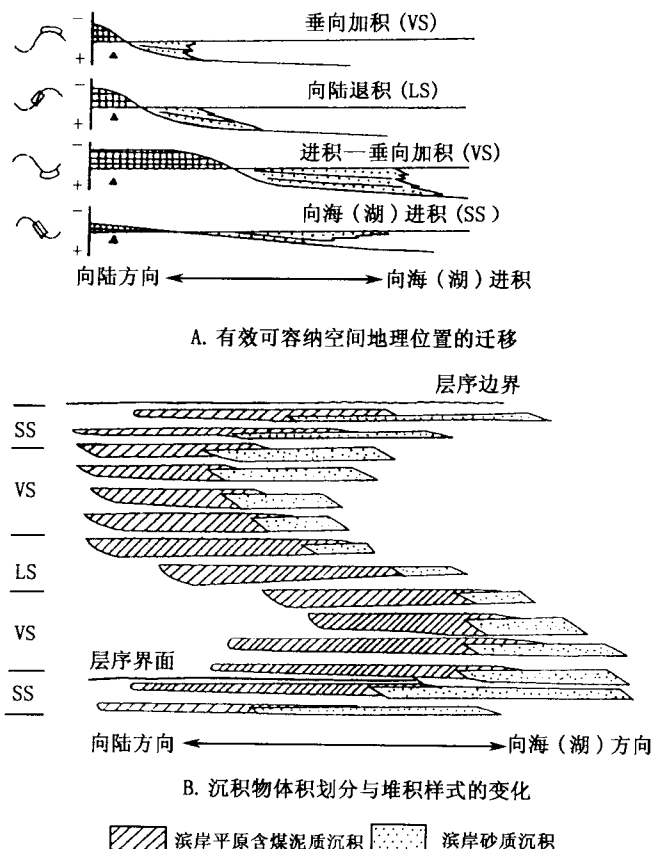


图 1-3 有效可容纳空间迁移导致沉积物的体积划分和成因地层堆积样式的变化
(据 Cross, 1994)

1.3 相分异原理

伴随基准面的上升和下降所控制的可容纳空间变化, 及其所影响的沉积物体积划分过程, 发生在同一地理位置(或沉积体系域、相域)的沉积环境或相类型、相组合和相序的规律性变化, 称之为相分异 (facies differentiation)。这些变化直接影响储层的各项物理特征, 如储层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 (储集物性和非均质性)。又如高可容纳空间与低可容纳空间形成的水道化砂体的几何形态 (宽度与厚度之比)、砂体的连通性、侧向连续性、相互截切程度、底形类别、保存程度、底部滞留沉积厚度与类型均有明显差异。再如与低可容纳空间进积成因层序中的砂体 (如向上变浅加粗的河口坝砂体或长距离延伸下切的河道砂体充填物) 的沉积序列比较, 高容纳空间退积成因层序中, 向上加深变细的砂体体积减小、侧向连续性变差、相类型和相序趋向简单化, 砂岩含泥量或泥质夹层增多、分选变差而非均质性增高。这些相分异特征直接影响储层物性, 乃至油、气、水的流动及渗流系统。

从沉积动力学观点出发, 相同沉积体系域或相域的体积划分、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过程中所处位置和可容纳空间的函数, 即时间和空间的函数。因而运用地层过程的沉积动力学特征, 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和沉积相分异作用所解释的地层结构及沉积学特征,在根本上不同于传统的和静止的相模式类比法(邓宏文,1995)^[3]。

1.4 旋回等时对比法则

高分辨率层序地层划分与对比,是依据基准面旋回过程中由可容纳空间变化所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。成因层序划分和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,进而划分不同级次的基准面旋回和分析连续的层序在空间上的排列组合或沉积样式。

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”,即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,因而依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变化所产生的沉积作用、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,乃至非沉积作用间断等状态随时间发生空间迁移的地层过程中的沉积学响应(图1-2)。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,在地层记录中或由代表二分时间单元(分别代表基准面上升与下降半旋回)的完整地层旋回组成,或由不对称的半旋回和代表侵蚀作用或非沉积作用的间断界面构成。由于相序及其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,因而通过能指示沉积物保存程度、堆积速度的相序、地层界面及相分异的变化,可识别出地层旋回的对称程度,并由旋回加厚或变薄的叠加样式,以及在跨越成因地层边界位置上相转换的幅度与方向,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。无论是海相或陆相沉积环境,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,则以反映逐渐变深的相序为代表。层序的叠加样式基本规律为,较长期基准面旋回中代表基准面下降半旋回的地层,通常由多个呈进积样式的较短期旋回叠加组成,而基准面上升半旋回则是退积结构的连续发育。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(较短期地层旋回)的相分析基础上加以识别(图1-4)。

高分辨率层序地层对比是同时代的地层或界面之间的对比,不是旋回幅度和岩石类型的对比。Cross(1994)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,也即基准面旋回上升和下降的二分时间单元的分界线。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沉积的岩石序列。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。因而了解地层过程中的沉积学响应特征,成为分析岩层与岩层对比、岩层与界面或界面与界面对比关系的关键。时间—空间图解是对地层剖面进行时间空间反演的最有效的方法(图1-2),有助于对地质过程(时间+空间)的地层学和沉积学响应特征(岩石+界面)的理解,同样地有助于确定什么时候岩层对比岩层、岩层对比界面或界面对比界面之间的多种对比关系,以检验层序等时对比的可靠性。

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(邓宏文,1995)^[3],它更多地受控于区域或局部构造作用及沉积物的供给作用,这一特性为陆相盆地的层序分析提供了重要的理论基础。

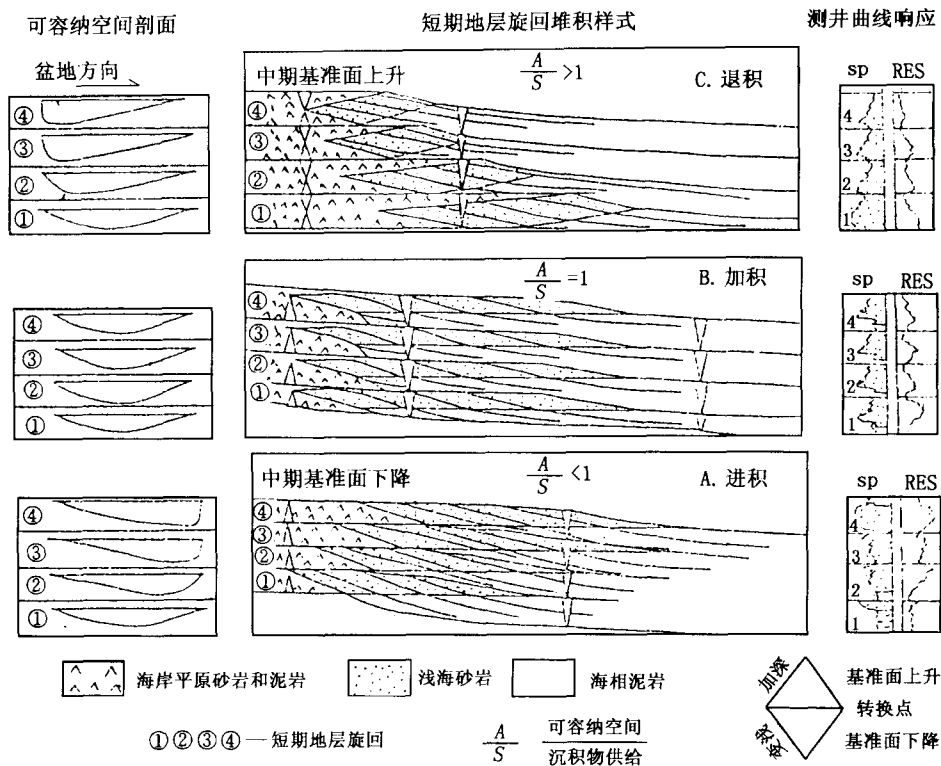


图 1-4 较短期地层旋回叠加样式的测井相响应特征

§ 2 界面成因类型、识别标志及其在旋回级次划分中的意义

源于被动大陆边缘的“Vail”经典层序地层学理论 (Vail, 1987)^[4]并不完全适合中国广泛分布的中、新生代陆相含油气盆地层序分析,已被众多层序地层研究者和石油地质工作者逐渐认识,而高分辨率层序地层学理论及其技术在陆相层序分析和油气勘探开发中的适用性和有效性则被越来越多的研究者所接受。有关该理论体系所突出的“高分辨率”含义,不同的研究者各有不同的理解,或将其作为高分辨率地震地层学的代名词,或将其等同为高频层序,认为在岩性、测井或地震剖面中将层序尽可能地划分为最小成因地层单元,即可达到“高分辨率”的目的。综合近几年来应用该理论体系对多个陆相盆地进行层序分析的众多研究成果,结合 Cross 提出的基准面旋回的概念范畴、级次划分和等时对比原则,认为所谓“高分辨率”的实质系指对不同级次地层基准面旋回进行划分和等时对比的高精度时间分辨率,即高分辨率的时间—地层单元划分,既可应用于油气田勘探阶段长时间尺度的层序单元划分和等时对比,也适合开发阶段短时间尺度的砂层组、砂层和单砂体层序单元划分和等时对比,其关键在于提高所对比地层的等时性精度。在已发表的众多文献资料中,有关基准面旋回的级次划分和层序的等时对比,虽然都遵循了基准面旋回划分和旋回中二分时间单元界线为等时地层优选对比位置的基本原则,然而在大多数成果中未提出具体的旋回级次划分标准,从而导致旋回级次的划分具有一定的随意性。由此可见,这一理论体系及其技术方法在

陆相层序分析中的应用,如何更加合理地划分旋回级次和进行等时地层对比,建立高时间精度分辨率的层序地层格架,已成为实际工作中急需解决的关键技术难题之一。

2.1 层序界面的成因类型、级别和识别标志

众所周知,层序是指以底、顶不整合面或相关整合面为界的、内部叠置有序的一套沉积组合,因此,层序地层分析中界面的识别是划分层序和确定层序成因类型的依据。目前有关层序划分的方案主要有3种,其一以EXXON公司“Vail”学派为代表,以不整合面或相关整合面为层序边界(Vail, 1987)^[4];其二以Galloway为代表,以最大洪泛面作为层序边界(Galloway, 1989)^[5];其三则为Johnson等所强调的地表不整合或海侵不整合面为界的沉积层序(Johnson, Klapper&Sandberg, 1985)^[6]。与上述层序划分方案有所不同的是,Cross倡导的层序划分是取决于海平面变化、构造沉降、沉积负荷、沉积通量和沉积地形等综合因素制约的基准面升降过程,一个基准面升降过程中形成的沉积充填序列即为一个成因层序单元,界面对应于基准面下降达最低点位置时,它既可位于沉积界面之上(相关整合面),也可位于沉积界面之下(不整合面或冲刷面),由界面限定的旋回级次取决于地层基准面旋回周期的长短(Cross, 1994)。有关旋回界面在钻井岩心、测井和地震剖面中的识别标志,已有众多相关的论文给予专门介绍,然而对于不同成因或成因上有所差异的界面与各级次基准面旋回的关系在已有的文献资料中描述甚少,无形中阻碍了高分辨率层序地层学理论及其技术在油气勘探开发工程中的应用和推广。依据在辽河断陷盆地、鄂尔多斯和川西前陆盆地、百色走滑盆地进行的陆相层序分析成果,上述盆地的构造性质虽然不同,但在盆地构造—沉积演化序列中均可识别出6类具不同成因特征、发育规模和识别标志的界面(表1-1),其中同类界面的各项特征及其所限定的层序结构、叠加样式和时间跨度基本一致,由此认为此6类界面可作为划分旋回级次的基本标准。需指出的是,由此6类界面所限定的各级次基准面旋回中,均可发育有级次和规模相当的洪泛面,各级次洪泛面大多为整合面和以沉积泥岩为主的,性质是非常相似的,但不同级次的层序中,与洪泛面相关的泥质沉积环境和沉积厚度仍有较大差别,特点为级别高的低频旋回中发育的洪泛期泥质沉积厚度大、相类型稳定,其等时可对比性强,而低级别的高频旋回中则相反,甚至缺失洪泛面沉积标志。从整体上看,相对各级次旋回的底、顶界面往往具有不同程度的穿时性,因洪泛面具有更好的等时性和区域对比意义,以及更高的时间分辨率和等时地层的可对比性,因而在实际工作中通常以洪泛面作为最重要的等时对界面标志。

2.2 旋回级次的划分和控制因素

依据地层基准面旋回周期的长短变化,已有的大多数研究成果将基准面划分为长期、中期、短期3个级次。在同时考虑地层基准面旋回与盆地构造演化关系的基础上,部分研究成果中提出了增加超长期和超短期旋回的4级次和5级次划分方案(郑荣才, 1999, 2000, 2001)^[7-13]。由于层序分析对象和要求不同,如在同一地区的同一地层系统中,以勘探阶段层序分析为目标的研究者,对象主要为长—中等时间尺度的统、组、段地层单元,采用3级次划分方案划分的各级次旋回时间跨度可能系统偏大,而以开发阶段层序分析为目标的研究者,对象主要为短时间尺度的段、砂层组、砂层(或小层),乃至单砂体地层单元,采用同样的3级次划分方案划分的各级次旋回时间跨度可能系统偏小,由此不同的研究者很可能将同一地层系统因研究目的不同而将其划分为不同级次的旋回。究其原因无疑与缺乏统一的划分标准有关,也说明仅3个级次的旋回划分方案已不能满足油气田勘探开发各阶段的要求。针对上述问题,结合典型陆相含油气盆地的层序界面发育特征(表1-1),在原来3级次划

表 1-1 基准面旋回界面类型的划分和主要识别标志 (据郑荣才, 2001)^[7]

界面类型	成因	产状及等时性	主要识别标志		
			地表和岩心剖面	测井剖面	地震剖面
I 类	区域构造运动	穿越盆地边界的区域构造不整合面, 具大幅度穿时性	风化壳, 底砾岩, 角度不整合或下伏地层大套缺失的假整合	各项测井参数的突变面	大型构造削截面、沉积超覆面, 角度不整合面
II 类	与盆地构造演化各阶段相关的应力场转换有关	遍及盆地和对应构造演化各阶段的构造不整合面, 具较大幅度的穿时性	风化壳, 底砾岩, 下伏地层部分缺失的假整合, 岩性、岩相的突变面	反映不同沉积体系和不同测井相组合特征的转换面、突变面	盆地范围内的大型构造削截削蚀面, 沉积超覆面, 微角度或假整合面
III 类	与同一构造演化阶段中的次级构造活动强度周期性幕式变化有关	限于盆地范围的次级构造不整合面和相关整合面, 具幅度不大的穿时性	古暴露标志, 大型冲刷间断面或侵蚀面, 岩性、岩相突变面	反映同一或相邻沉积体系的大套进积→退积组合的测井相转换面、突变面	限于盆地边缘的构造削截削蚀面, 沉积超覆面, 反映地层不协调关系的连续强反射界面和反射终止类型
IV 类	与偏心率周期中气候波动引起的基准面升降和物质供给变化有关	局部发育的沉积间断面和相关整合面, 较大范围内具较好的等时性	间歇暴露面, 较大规模的冲刷面, 岩性、岩相的突变面	反映同一沉积体系中相似或相邻相序的进积→退积组合的测井相转换面、突变面	未作特殊处理的剖面很难识别, 或表现为地震反射结构变化的分界面, 地震相类型转换面
V 类	与斜率周期中气候波动引起的基准面升降和 A/S 值变化有关	局部发育的沉积间断面和相关整合面, 区内基本等时	间歇暴露面, 小型冲刷面和非沉积作用间断面, 相似岩性和岩相组合的分界面	反映韵律性沉积旋回的进积→退积组合的测井相组合转换面	一般不能识别
VI 类	与岁差周期中气候波动引起的基准面升降和 A/S 值变化有关	分布范围有限的小间断面和非沉积作用间断面, 主体为整合面, 区内基本等时	小型冲刷面, 非沉积作用间断面, 相似岩性、岩相组合的地层分界面	反映单一岩性或整个岩性组合的进积、退积、加积或进积→退积的测井相转换面	不能识别

分方案的基础上, 提出 6 级次划分方案 (表 1-2)。与 3 级次划分方案相比较, 该方案突出如下几个重点:

(1) 充分强调了引起地层记录中不同级次地层基准面旋回周期性变化的各种控制因素, 并保存在各级次旋回的地质记录中, 因而通过界面的成因类型、产状特征、发育规模和识别标志, 可对各级次基准面旋回进行更为合理的划分;

(2) 基准面旋回的分级命名, 同时考虑了各级次旋回的时限变化范围和主控因素, 给予特定的层序含义, 规范了级次划分标准;

表 1-2 基准面旋回的级次划分和基本特征 (郑荣才, 2001)^[7]

基准面旋回级次	界面类型 (详见表 1)	时限范围 (Ma)	层序定义	层序发育规模 (厚度, m)	主要控制因素		与 Vail 相当的层序地层单元对比
巨旋回	I 类	30 ~ >100 (视盆地延时而定)	包括盆地演化各阶段的原型盆地完整的沉积充填序列	千余米至数千米级	构造因素	区域构造运动	相当 II 级层序组
超长期	II 类	10 ~ 50	以盆地演化各阶段为单位的构造充填序列 (或构造层序、构架层序)	数百米至千余米级		构造演化阶段的应力场转换	相当 III 级层序组
长期	III 类	1.6 ~ 5.25	一套具较大水深变化幅度的、彼此间具成因联系的地层所组成的区域性湖进—湖退 (或海进—海退) 沉积序列	百余米至数百米级		各构造演化阶段中的构造幕式性强弱变化	相当 III 级层序组
中期	IV 类	0.2 ~ ≤1	一套水深变化幅度不大的、彼此间成因联系密切的地层叠加所组成的湖进—湖退 (或海进—海退) 沉积序列	数十米至百余米级	天文因素	偏心率长周期	IV 级层序组 (准层序组或体系域)
短期	V 类	0.04 ~ 0.16	一套具低幅水深变化的、彼此间成因联系极为密切, 或由相似岩性、岩相地层叠加组成的湖进—湖退 (或海进—海退) 沉积序列	数米至数十米级		偏心率短周期	V 级层序组 (准层序)
超短期	VI 类	0.02 ~ 0.04	一套代表最小成因地层单元的单一岩性及相关岩性的叠加样式	分米至米级		岁差周期	VI 级层序组 (韵律层)