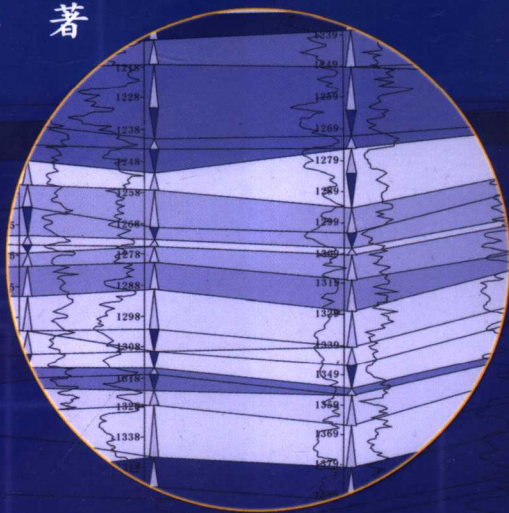


张尚锋 张昌民 李少华 著



石油工業出版社

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 理论与实践

张尚锋 张昌民 李少华 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统阐述了高分辨率层序地层学方法的原理及其在油气勘探开发中的应用:地层岩性油气藏预测,油气储层预测,储层流动单元划分评价等。通过实例剖析,展示了高分辨率层序地层学在陆相含油气盆地油气勘探开发中良好的应用前景。

本书可以作为从事沉积学、层序地层学及含油气盆地分析等工作的科技人员和高等院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率层序地层学理论与实践/张尚锋,张昌民,李少华著.
北京:石油工业出版社,2007.7

ISBN 978-7-5021-6155-2

I. 高…

II. 张…

III. 地层学-地层学-应用-油气勘探-研究

IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 097877 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.com.cn

编辑部:(010)64523543 发行部(010)64523620

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技排版中心

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:15.25

字数:390 千字 印数:1—1000 册

定价:48.00 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

20 世纪 90 年代初期,以 Cross 教授为代表的研究组运用基准面和可容纳空间变化的理论,以及地质过程—沉积响应动力学原理,将基准面变化过程中导致的可容纳空间变化与沉积物沉积过程—响应特征密切结合起来,从而形成高分辨率层序地层学。其理论与方法不仅可以提高地层界面研究的准确性与层次性,而且由于它是以基准面作为时间地层单元划分的参考面,不同于经典层序地层学依赖于海平面对层序形成发育的控制,因而不仅可应用于海相层序地层研究,同时在陆相沉积地层研究中也呈现出无可比拟的应用前景。高分辨率层序地层学成功地应用于国外含油气盆地勘探与开发中,取得了显著的勘探开发效果。特别是对盆底扇、下切水道充填等砂体的预测,在隐蔽油气藏勘探中获得成功。邓宏文教授将高分辨率层序地层学理论引入到中国以来,在中国油气地质学研究中得到迅速推广和应用,应用范围涉及油气勘探开发整个过程,研究领域涉及地层岩性油气藏勘探,油气开发储层预测、储层非均质性研究,流动单元划分评价等方方面面,并取得良好的勘探开发效益。当前,在含油气储层预测及岩性油气藏描述研究方面,高分辨率层序地层学理论与计算机模拟技术相结合,使油气储层研究预测正从定性走向定量。研究与应用范围从盆地规模到区带及至油藏规模;在陆相含油气盆地预测隐蔽油气藏类型、规模、数量、有利分布地区等方面,高分辨率层序地层学理论正在发挥越来越重要的作用。笔者长期从事高分辨率层序地层学在油气勘探开发中的应用研究,通过对多年研究成果的总结,出版此书,希望能对高分辨率层序地层研究者有所帮助,对我国陆相含油气盆地油气勘探开发工作有所贡献。

《高分辨率层序地层学理论与实践》一书共分四篇十一章,第一篇是对高分辨率层序地层学理论的概括论述,介绍了高分辨率层序地层学的研究现状、发展趋势及理论体系,分析了基准面变化的层次性。第二篇、第三篇及第四篇为应用方法介绍,其中第二篇以鄂尔多斯盆地坪北油田三叠系延长组为例,介绍了高分辨率层序地层学在坳陷盆地储层预测中的应用,包括建立等时地层格架;分析等时地层格架内储集砂体发育分布特点,建立地层格架内砂体原型地质模型;建立储层地质知识库,并通过随机建模技术建立储层骨架模型和物性模型。第三篇通过吐哈盆地侏罗系地层岩性油气藏研究,介绍了高分辨率层序地层学在类前陆盆地地层岩性油气藏研究中的应用,包括不同层次基准面旋回层序识别划分,分析等时地层格架内生、储、盖发育组合特点,总结了地层格架内地层岩性油气藏发育规律。第四篇以泌阳凹陷双河油田及东濮凹陷濮城油田研究实例,介绍了高分辨率层序地层学在断陷盆地储层流动单元划分评价中的应用,包括等时地层格架内隔夹层分析,及流动单元分析评价,证明高分辨率层序地层学对储层流动单元分性评价是行之有效的方法。

本书的出版得益于长江大学剩余资源研究组(3RG),属于剩余资源研究组系列研究成果之一,研究组王振奇教授、尹太举副教授、戴胜群副教授、尹艳树博士、龚福华副教授、杨飞副教授给予诸多帮助,已毕业的侯国伟博士、谈卫东博士、程涛博士、王海涛硕士、黄彦庆博士、韩登林博士、刘军博士等以及现在在校研究生参加部分工作,江汉油田分公司勘探开发研究院彭裕林副院长、姚凤英副所长、陈新民高工(博士)做了部分工作,长江大学地球科学学院李功权副教授对部分章节作了修改。中原油田分公司曾大乾总师、研究院赵良金总地质师、濮城室毛利华主任、李忠超高工,河南油田分公司樊忠海副总经理、开发室黎锡俞高工、鲁国甫高工等,吐哈石油地质研究院李志军总地质师、朱有信副总地质师、戴小平所长,成都理工大学郑荣才教授、王成善教授、黄思静教授、尹海生教授等给予了很多帮助和指导。借此机会表示由衷感谢!

尽管笔者想尽力编撰一本系统介绍高分辨率层序地层学理论及应用的书,但限于水平有限,难免有不足之处,有些地方甚至挂一漏万,恳请专家和同行批评指正。

目 录

第一篇 高分辨率层序地层学理论原理

第一章 绪论	(3)
第一节 从层序地层学到高分辨率层序地层学	(3)
第二节 高分辨率层序地层学	(7)
第二章 高分辨率层序地层学原理	(9)
第一节 地层基准面原理	(9)
第二节 体积分配原理	(11)
第三节 相分异原理	(12)
第四节 旋回等时对比法则	(13)
第三章 基准面变化的层次性	(15)
第一节 旋回层序界面的层次性	(15)
第二节 旋回层序实体的层次性	(17)
第三节 基准面旋回层序层次分析步骤	(18)

第二篇 高分辨率层序地层学在储层预测中的应用

第四章 区域地质概况与沉积相	(23)
第一节 区域地质概况	(24)
第二节 岩石相特征及沉积特征	(31)
第三节 沉积微相测井曲线特征与测井相模式	(39)
第四节 沉积亚相和沉积模式	(40)
第五章 储集砂体划分与对比	(43)
第一节 研究思路及步骤	(44)
第二节 层序界面及地层堆积样式	(45)
第三节 基准面旋回层序划分	(49)
第四节 地层等时对比及地层格架	(55)
第五节 A/S 值与砂体的空间展布规律	(72)
第六节 基准面旋回内砂体的发育特点及时空展布	(73)
第六章 基准面旋回内储层特征	(83)
第一节 储层岩石学特征	(83)
第二节 储层物性	(84)

第三节 储层非均质性 (87)
 第四节 基准面旋回变化对储层物性的影响 (97)
 第七章 储层地质知识库及储层模型 (99)
 第一节 储层模型中的储层地质知识库 (99)
 第二节 储层地质知识库的建立 (100)
 第三节 随机模拟技术现状及建模基本原理 (116)
 第四节 骨架及物性参数模型建立 (124)
 第五节 模拟结果检验 (126)
 小结 (148)

第三篇 高分辨率层序地层学在岩性油气藏预测中的应用

第八章 台北凹陷地质概况及沉积相 (153)
 第一节 区域地质背景 (153)
 第二节 沉积体系演化与岩石相 (156)
 第三节 沉积背景和沉积相 (159)
 第四节 沉积相测井响应与沉积模式 (165)
 第九章 台北凹陷层序地层划分对比及地层格架 (171)
 第一节 层序界面 (171)
 第二节 台北凹陷地层层序特征 (175)
 第三节 层序地层等时对比及地层格架 (180)
 第四节 台北凹陷等时地层格架内沉积体系 (185)
 第五节 岩性油气藏成藏因素 (189)
 第六节 层序地层格架内岩性油气藏分析 (193)
 小结 (197)

第四篇 高分辨率层序地层学在流动单元研究中的应用

第十章 流动单元内涵、研究现状及研究方法 (201)
 第一节 流动单元概念及研究现状 (201)
 第二节 岩石物理流动单元的研究方法 (204)
 第三节 储层流动单元层次性分析 (207)
 第十一章 储层流动单元研究实例 (209)
 第一节 泌阳凹陷双河油田核三段Ⅱ油组储层流动单元 (209)
 第二节 东濮凹陷沙三段储层流动单元分析 (216)
 小结 (222)
 参考文献 (223)
 图版 (229)

**第一篇 高分辨率层序
地层学理论原理**

第一章 绪 论

第一节 从层序地层学到高分辨率层序地层学

一、层序地层学研究历史

层序地层学是 20 世纪 70 年代末期由 Vail 等在地震地层学基础上创立起来的一门独立的地层学分支学科,层序地层学问世以来,在地学界产生了重大影响,它全新的观念和独特的视角使地质工作者开阔了思维空间,被誉为地质学领域的一场革命,它开创了了解地球历史的新阶段(Vail,1991)。虽然层序地层学的出现及广泛应用历史仅仅 40 余年,但层序地层学概念的形成可追溯到 20 世纪以前。在最近二三十年,由于地质学,特别是地层学、沉积学、构造地质学和地球物理学的相互渗透,层序地层学得到长足发展。纵观层序地层学的形成和发展历史,大致可划分为 3 个大的阶段。

1. 层序地层学的孕育及萌芽

20 世纪 40 年代末期,现代层序地层学的概念由其主要鼻祖 Sloss(1948)提出,Sloss 教授和他的同事及学生通过对北美克拉通地层的野外研究分析,以不整合面为界将北美克拉通地层从寒武纪晚期到全新世划分为 6 套地层,并称之为“层序(sequence)”,认为它可以作为实用的填图单元。Sloss(1963)对其作了进一步说明,坚持认为地层层序是比群和超群更高级的岩石地层学单位,并指出这些海进—海退期形成的地层中,每一期地层均与北美克拉通边缘的造山活动期交替出现相对应,而且将层序定义为“一个大的构造旋回的岩石记录”(图 1-1),

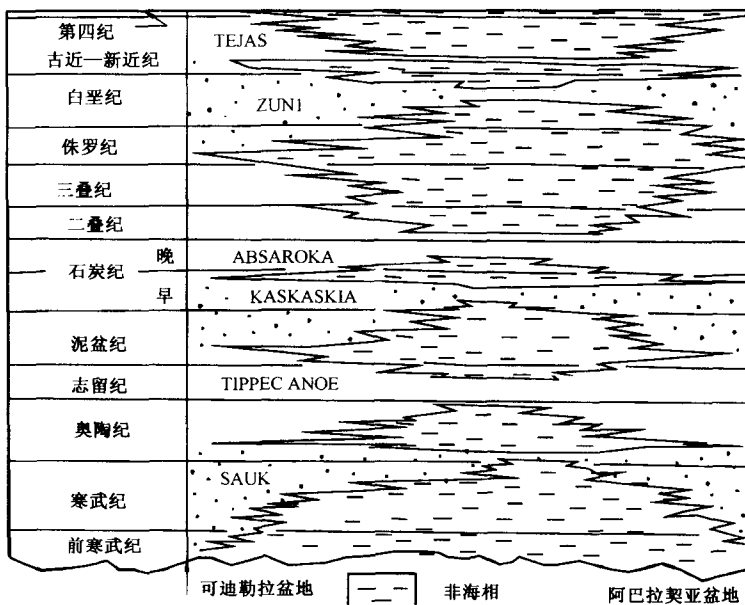


图 1-1· 北美显生宙克拉通层序与克拉通边缘造山幕的关系(据 Sloss,1963)

强调层序边界大规模不整合的重要性,还对这些层序进行了命名(表 1-1)。Sloss 提出的克拉通地层层序虽然为层序地层学奠定了基础,但由于 Sloss 所用的是传统的地质学方法,而且所用的基础资料也是由基础地质提供的,所以在 50 年代至 70 年代初期,除了 Wheeler 及其“从前的学生与最亲近的熟人”外,他的这一思想几乎无人接受(Sloss,1988; Van Wagoner 等,1990)。也没有文献再论及“sequence”。而在地震地层学提出前的一段时间(60 年代至 70 年代中期),一些研究者致力于全球地层对比、全球海平面变化的可能性研究以及对在海平面控制下形成的地层单元几何形态等研究。如 Frazier(1974)通过研究密西西比河三角洲,将三角洲序列划分为前积相、退积相和加积相(图 1-2),并讨论了三角洲迁移的自旋回作用和冰川作用对海平面的控制作用。70 年代末期地震地层学的出现为层序地层学后来的发展奠定了坚实的基础,从而使层序地层学的形成与发展进入到一个崭新的历史阶段。

表 1-1 北美显生宙克拉通层序名称及其来源(据 Sloss,1963)

层序名称	层序时代	层序名称来源
TEJAS	晚古新世—全新世	西班牙语得克萨斯
ZUKI	中侏罗世—中古新世	亚利桑那和新墨西哥州 ZUKI 隆起
ABSAROKA	晚石炭世—早侏罗世	怀俄明和蒙大拿州 ABSAROKA 山脉
KASKASKIA	早泥盆世晚期—早石炭世	伊利诺斯州 KASKASKIA 河
TIPPECANOE	中奥陶世—早泥盆世	印第安纳州 TIPPECANOE 县
SAUK	前寒武纪—早奥陶世	威斯康星州 SAUK 县

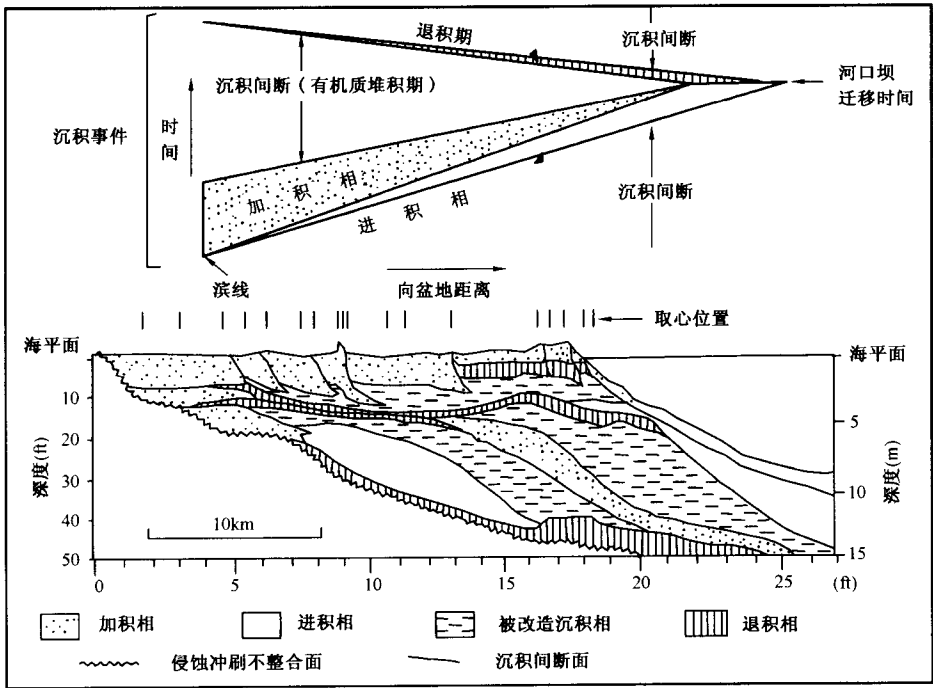


图 1-2 层序地层概念模型(据 Frazier,1974 修改)

2. 地震地层学——层序地层学的形成

随着地球科学技术的发展及科学技术的进步,20 世纪 70 年代初北美、西欧一些国家将勘探地球物理方法中的地震勘探技术广泛的应用于油气勘探领域,并取得显著的经济效益。1975 年美国石油地质家协会(AAPG)以地震地层研究为中心召开年会,从此为地震地层学理论的形成奠定了基础。Vail(1977)的《层序地层学——在油气勘探中的应用》论文集的出版,标志着地震地层学理论的诞生。并于其后 10 余年的时间,对世界 80 多个小型盆地进行了区域地震地层分析。地震地层学在盆地分析方面表现出两个方面的优势,其一是能够详细定义复杂的盆地格架;其二是能够在长距离范围内识别对比不整合面,并对其进行作图。80 年代初期,Vail(1981)利用北海侏罗纪的资料,用地震地层学解释全球海平面旋回变化,并与其同事吸取各家之长,于 1987 年在 AAPG 和 Nature 上发表了“Vail 曲线”,提出层序地层学的概念,开始架设由沉积地质学通向地球物理学的桥梁。与以前主要通过露头研究层序不同,Vail 等人主要应用地震资料研究沉积层序。但其基本方法与前期基本相同,先都以不整合面为界划分层序,后研究层序内部特征,所以,地震地层学被认为是层序地层学的一个发展阶段(Sloss,1988, Van Wagoner 等,1990)。但 Vail(1977)的层序地层学与以前不同的是,Sloss(1988)认为构造作用控制层序的发育特点,而 Vail(1977)则强调全球海平面变化是层序发育的主要控制因素,并且提出它是研究一套由侵蚀面或无沉积面、或与之相当的不整合面所限定的、重复出现并有成因联系的、限制在一定的年代地层框架内的岩石关系,因此体现出成因地层学的本质特点。所以,Vail(1977)等人对地层层序的定义为:层序是有一套内部相对整合,在成因上有联系的、以不整合和可与之对比的整合面为界的等时沉积体,并且根据层序的基本特点作出了层序的基本概念及其与年代地层学之间的关系(图1-3)。一个层序内部可分为若干沉

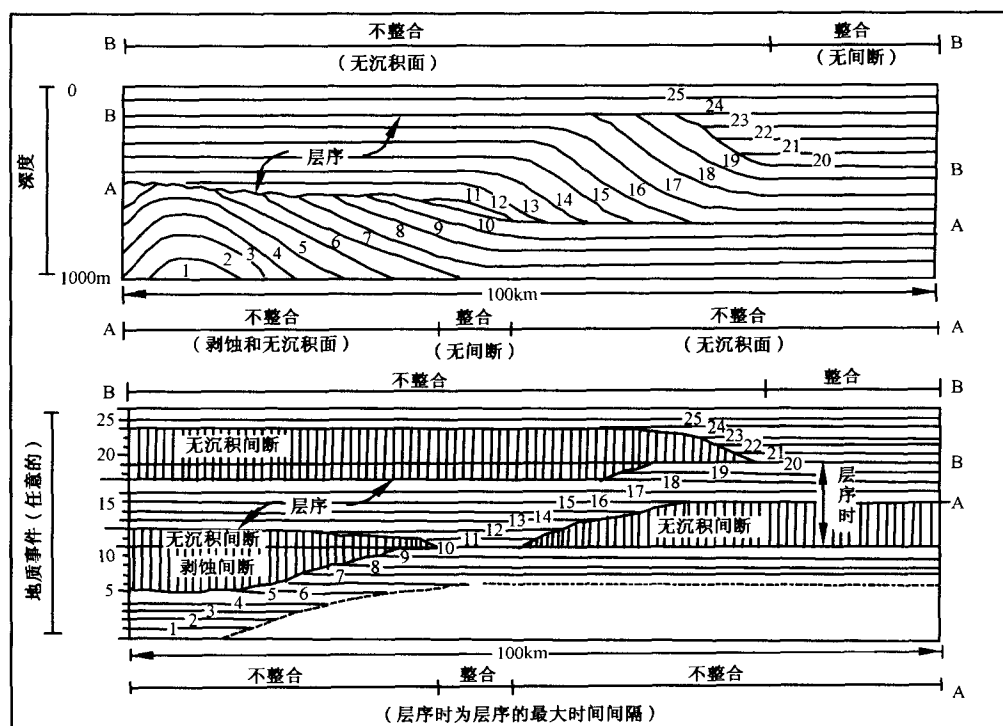


图1-3 层序地层学与年代地层比较(据 Mitchum, Vail 和 Thompson, 1977)

积体系域,它们以其在层序内的位置以及海泛面为界的准层序组和准层序的叠置方式来定义。1987年,Sangree和Vail著的《层序地层学的应用》、Van Wagoner(1988)著的《层序地层学基础和关键定义》问世,他们创造性地阐明层序地层学的基本理论、关键定义的术语、解释程序及具体工作步骤,为层序地层学的形成发展奠定了理论基础。总之,以上这一切工作成就及成果的出现,标志着层序地层学理论体系基本形成。

3. 层序地层学的全面发展

1988年9月隶属国际地科联(IUGS)的全球沉积地质委员会(GSGC)在法国迪涅召开会议,批准将刚步入“科学前沿”的“层序地层学和全球海平面变化”正式纳入“全球沉积地质计划”(GSGP),从此使“层序地层学”面向世界,同一时期,国际沉积学会(SEPM)第42集特刊“Sea Level Change—An Integrated Approach(海平面变化——一种综合分析方法)”(层序地层学原理),系统、全面地讨论了层序地层学的理论、方法,厘定了名词和术语的定义。从此层序地层学进入全面发展的新阶段。

到了20世纪90年代,层序地层学除了进一步完善其理论体系,广泛应用于地球演化史研究、盆地分析及层状矿产的勘探和开发领域,取得了大量的研究成果。特别是层序地层学研究已成为油气勘探开发各个阶段不可缺少的内容。此外,层序地学应用于陆相盆地方面也取得长足进展。

二、层序地层学研究现状及发展

目前,层序地层学研究已经成为国际地质科学研究的热门课题,这充分展示了在理论上、实际研究的深度和广度上取得的长足进展。其进展主要表现在:

(1)对北美—西欧及其他经典露头地区的地层进行细致的层序地层再分析;对碳酸盐岩以及混积岩的层序地层的深入分析;对海平面的进一步研究及精确计算;对被动大陆边缘条件下的沉积层序进行计算机模拟。

(2)将起源于被动大陆边缘的层序地层学理论和方法应用于其他类型的盆地,如活动大陆边缘盆地、伸展(或挠曲盆地)盆地及稳定克拉通盆地等,证明其应用效果,并总结不同类型盆地的层序地层模型。

(3)在层序地层学中引入新的概念方法,使得层序地层学的理论体系更加完善。如Kauffman等人(1991)提出的包括物理事件、化学事件、生物事件以及复合事件的高分辨率事件地层学的概念方法,有助于层序地层学的年代和地层学研究;Kominz和Boud(1991)利用伽马方法较为准确的测定了更新统及白垩系旋回沉积中的米兰科维奇旋回时限。

(4)层序地层学的工作站解释技术的出现。以Geostrat和Basinseis为代表,编制了面向石油工业的层序地层学解释软件,提高了层序地层学解释精度及工作效率。

(5)在层序地层学理论发展完善的同时,其自身理论学科也得到飞速发展,出现了许多新的层序地层学分支,如层序生物地层学、成岩层序地层学、高频层序地层学、层序充填动力学以及高分辨率层序地层学等等。层序地层学被引入我国后,国内沉积学家及石油地质学家根据我国实际情况,把环境和相类型作为切入点,大大发展了层序地层学理论,出现了3个层序地层研究学派,即“类海相”派、陆相派(李思田,1992;解习农,1996)和综合派(纪友亮,1996)。虽然我国层序地层学研究起步较晚,但在短短的10几年时间内,我国层序地层学研究快速发展起来,基本上跟上了国外层序地层学的研究步伐。

值得一提的是,进入20世纪90年代,层序地层学理论研究和实践的热点从海相盆地转向

陆相盆地,陆相盆地层序地层学研究目前已经成为重要的发展方向。1991年在加拿大召开的NANA讨论会认为,研究陆相层序地层时必须考虑基准面和沉积物补给空间的控制因素,这些控制因素包括海平面变化、气候作用和构造作用等。并成立了专门的陆相层序地层工作组。会后,Shanley(1994)等撰文总结该工作组研究成果,认为层序地层学概念能有效应用于陆相地层。而对于陆相含油气盆地油气勘探开发而言,以科罗拉多矿业学院 Cross 教授(1994)所倡导的高分辨率层序地层学理论原理和方法发挥着越来越重要的作用。

第二节 高分辨率层序地层学

一、概述

高分辨率层序地层学(high resolution sequence stratigraphy,有人译为高精度层序地层学(林畅松,2000))是层序地层学的一个重要分支,可分为“传统”高分辨率层序地层学和“现代”高分辨率层序地层学。

1. “传统”高分辨率层序地层学

“传统”高分辨率层序地层学的形成始于 Jervey(1988)、Posamentier(1993)和 Van Wagoner(1990)等人的研究,提出“可容纳空间”、“相对海平面变化”、“强制性海退”等概念,其层序地层格架的建立依赖于精细的露头、岩心和测井资料的垂向分析和横向对比,识别出的高级海(湖)平面或沉积基准面变化产生的沉积间断面、相突变面及海泛面或湖泛面。这些研究成果的出现提高了层序和沉积体系域的划分精度。如 Van Wagoner(1990)等人利用露头、岩心和测井资料建立的三级层序比 Vail 早期利用地震资料划分的三级层序级别更小。Brown(1995)等人和 Plint(1996)等人进行了四级层序的划分对比研究。所以说“传统”高分辨率层序地层学的提出,对精细层序划分及沉积体系域分析具有重要作用。近年来,此方面成果大量涌现。虽然“传统”高分辨率层序地层学对于提高层序的研究精度等具有重要作用,但其理论体系与层序地层学的理论体系大体一致,所以不能构成一支独立理论体系,它的出现只能说是对层序地层学理论的补充完善。

2. “现代”高分辨率层序地层学

“现代”高分辨率层序地层学是由科罗拉多矿业学院 Cross 教授(1994)提出,其核心内容为:在基准面变化过程中,由于可容纳空间和沉积物补给通量比值的变化,相同沉积体系域或相域中发生沉积物的体积分配作用,导致沉积物的保存程度、地层堆积样式、相序、相类型及岩石结构和相组合类型发生变化。Cross 认为基准面是理解地层层序成因并进行地层划分的主要控制因素。Cross 的高分辨率层序地层学运用全新的概念和理论体系,以地面露头、岩心、测井和高分辨率地震资料为基础,对地层进行精细层序划分和对比。所谓“高分辨率”是指对不同层次的地层基准面旋回划分和对比的高精度时间分辨率,也就是说高分辨率的时间—地层单元既可以用于油气田勘探阶段长时间尺度的地层单元划分和等时对比,也可以用于油气田开发阶段的短时间尺度,如砂层组、砂层和单砂体等层序单元的划分和等时对比。

高分辨率层序地层学问世后立即得到学术界有识之士的高度重视。成因地层研究小组在对浅海环境沉积层序进行分析研究的基础上提出的利用 A/S [Accommodation(可容纳空间)/Sediment Supply(沉积物供给量)] 比和基准面旋回进行地层对比的方法(Cross, 1991, 1993, 1994, 1997, 1998),为我们进行地层精细对比提供了新思路。

自该理论引入国内后(邓宏文,1995),受到了石油地质工作者的重视,开展了多方面的研究工作,应用资料涉及露头、地震、岩心和测井,应用领域涵盖了石油勘探与开发,不同研究者的研究侧重面不同(邓宏文,1996;郑荣才,2000,2001)。但总的来看其应用大多局限于依据该理论进行储层的精细对比,尽管也作了一些储层非均质性方面的研究工作,但还不够系统和完善,而对于该理论的基本原理和方法的研究,以及据此进行剩余油预测的研究等目前才刚刚起步。

二、高分辨率层序地层学研究进展

高分辨率层序地层对比技术包括两个方面:一是适用于盆地范围的地层对比技术,主要用于勘探阶段的地层分析和盆地模拟,利用露头、钻井、测井、地震、地层古生物、地球化学等多种资料综合分析。另一方面则是适用于油藏规模的储层对比技术,主要依靠岩心和测井资料,适用于开发阶段的储层表征和储层的精细对比。因为储层岩性、几何形态、连续性及岩石物理特征等是在沉积物堆积过程中产生的,精确的地层对比可以在四维空间中对这些特征有更清楚的认识,高分辨率地层对比是识别储层非均质性的有效方法。另外,具时间意义的地层界面通常与流体流动单元的岩石物理面相一致,可通过精细地层对比,准确划分流动单元。随着时间分辨率的提高,对地层形态和规模,相的位置和岩石物理特征的预测也就更加精确。

从目前研究来看,高分辨率层序地层学的发展具有以下几个特点:

- (1)由“粗放型”勘探应用向“集约型”开发应用方向发展,以注重地层精细划分对比;
- (2)由储层空间展布的预测向储层非均质性研究方向发展;
- (3)由储层地层对比预测到剩余油分布预测的综合研究;
- (4)由定性的地层分析到定量的地层形成过程模拟的发展(Tipper J. C.,2000)。

随着高分辨率层序地层学理论的不断发展和完善,加之其他沉积型矿产资源(如煤、河道沉积型铀矿、金矿)勘探的需要,高分辨率层序地层学研究应用范围不断扩展,关于高分辨率层序地层学煤田勘探、沉积层控金属矿产资源勘探方面的研究成果不断涌现。

第二章 高分辨率层序地层学原理

层序界面是层序地层分析的基础和关键。依据层序界面,传统层序地层学关于层序的划分方案存在三种观点,第一种观点以 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;第二种观点以 Galloway 为代表,这一观点基本上继承和发展了 Frazier 的思想,采用最大洪泛面作为层序确定的边界;Johnson 等人持第三种观点,强调以地表不整合或海进冲刷不整合为界面的海进—海退旋回层序。以上三种层序的共同特点是强调海平面的变化控制了层序成因和沉积相带的展布特征。以科罗拉多矿业学院 Cross 领导的成因地层组倡导层序形成不只是受控于海平面变化,而是受海平面、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升降过程控制,基准面是理解地层层序成因并进行层序划分的主要格架,它是高分辨率层序地层学的核心,高分辨率层序地层学的其他原理(如体积分配、相分异等)都是以基准面原理为基础的。

第一节 地层基准面原理

一、概述

基准面(base level)一词最早是由 Powell(1875)提出并应用于地貌学研究,认为基准面代表了陆上侵蚀作用的下限,海平面即是总的基准面,强调侵蚀和沉积的平衡条件特点。Davis 则认为基准面是一个进行着正常陆上侵蚀作用的假想水平面,即河流的终极侵蚀面。Sloss(1962)指出基准面是一个在其上颗粒无法停留下来,而在其下则可能发生沉积与埋藏作用的界面。Wheeler(1964)注意到在地球表面任一时刻都可划分为无数个区域,这些区域或经历着沉积作用或经历侵蚀,沉积与侵蚀作用之间或任何经历不同作用的区域之间的界面即是处在基准面上。与平稳的海平面相比,随着沉积物供给和能量情况的变化,基准面可穿越地表上下而发生升降波动。总结起来,地质学中的基准面概念大体可归纳为三种:其一是地貌学上的平衡剖面或侵蚀基准面,即基准面是侵蚀作用的终极状态。其二是沉积临界面,即基准面是一个颗粒在其之上无法停留下来,而在其下则发生沉积与埋藏作用的界面。实际应用中,人们常将沉积基准面看作是海洋环境中的海平面和陆地环境中的湖平面等具体物理面。其三是地层基准面,即高分辨率层序地层学理论所称之基准面。

二、基准面原理

Cross 等吸收并发展完善了 Wheelers 提出的基准面的概念,通过分析基准面旋回与成因层序形成的过程—响应,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、横向摆动的、连续的、略向盆地方向下倾的抽象面(而非物理面),其位置、运动方向及升降幅度不断随时间而发生变化(图 2-1)。基准面的变化具有总是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称为一个基准面旋回。如果以地球地表面为参考面,

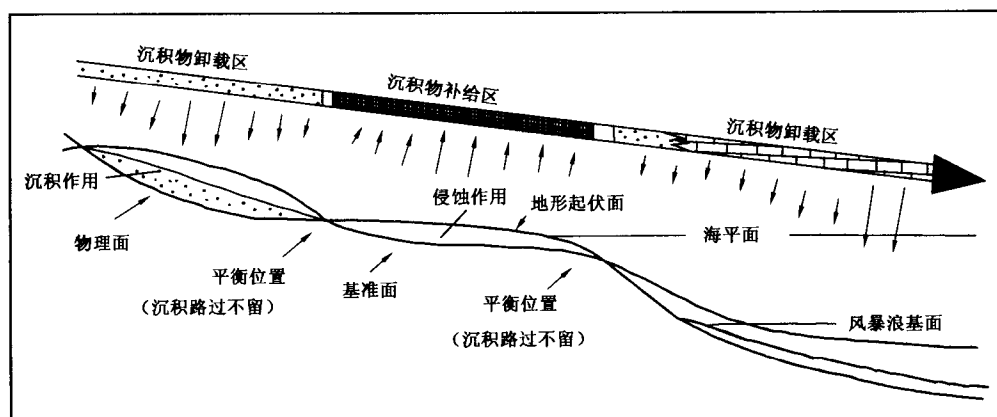


图 2-1 基准面原理图(据 Cross,1994 略作修改)

考查基准面的运动,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,基准面这种穿越地表过程构成基准面穿越旋回(base level transit cycle)。在地球表面不同位置,在相同时间域内形成的基准面旋回具等时性,在一个基准面升降变化过程中(可理解为时间域)保存下来的岩石,即一个时间域内的成因地层单元,即是成因层序,其以时间面为界面,因而为一个时间地层单元。从图 2-1 可以看出,在基准面相对于地表的波状升降过程中,引起了沉积物可堆积空间(可容纳空间)的变化。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、沉积物供给增量比值即 $\Delta A/\Delta S \rightarrow \infty$)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(间断面或整一界面)(图2-2)。

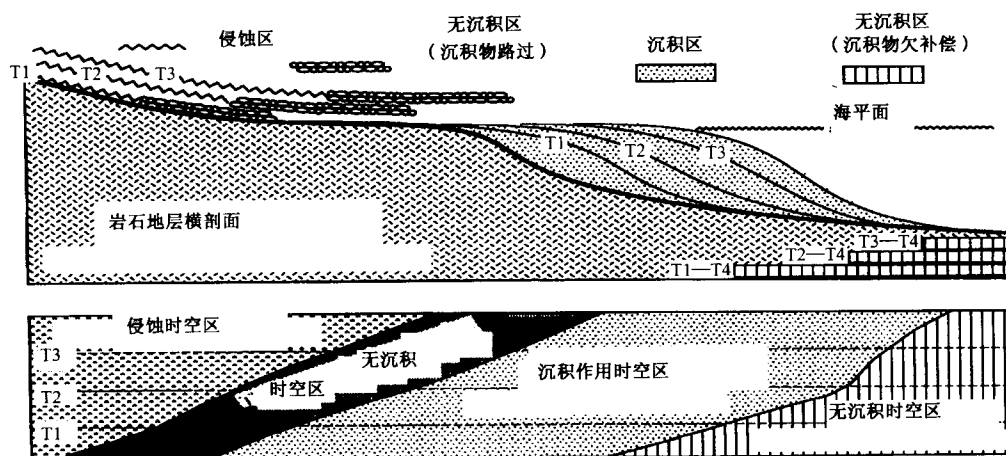


图 2-2 基准面旋回的岩石地层横剖面和相应时空图解(据 Cross,1994)