

高分辨率层序地层学

——原理及应用

邓宏文 王红亮 祝永军

Timothy A. Cross

著



地质出版社

高分辨率层序地层学

——原理及应用

邓宏文 王红亮 祝永军

Timothy A. Cross 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

全书由三部分组成：第一部分主要论述高分辨率层序地层学的理论基础和研究方法；第二部分主要介绍了如何以露头、岩心、钻/测井、地震资料为基础识别多级次的基准面旋回，开展高分辨率层序地层划分与对比，并以具体实例介绍了高分辨率层序地层学在国内外油气勘探与开发中的应用，特别是在陆相含油气盆地中的应用；第三部分为正、反演模型及其在地层预测中的应用。

本书可供从事油气田勘探与开发的科研人员参考使用，也可供从事相关专业的高等院校师生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

高分辨率层序地层学：原理及应用/邓宏文等著 .-北京：地质出版社，2002.9

ISBN 7-116-03626-1

I . 高… II . 邓… III . 地层层序-研究 IV . P539.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 042057 号

责任编辑：祁向雷

责任校对：李 玫

出版发行：地质出版社

社址邮编：北京海淀区学院路 31 号，100083

电 话：(010) 82324508 (邮购部)；(010) 82324577 (编辑室)

网 址：<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱：zbs@gph.com.cn

传 真：(010) 82310759

印 刷：北京印刷学院实习工厂

开 本：787×1092¹/₁₆

印 张：16.375

字 数：385 千字

印 数：1—2000 册

版 次：2002 年 9 月北京第一版·第一次印刷

定 价：34.00 元

ISBN 7-116-03626-1/P·2278

(凡购买地质出版社的图书，如有缺页、倒页、脱页者，本社发行处负责调换)

序

几年前,我在哥伦比亚波哥大大学短期讲学介绍高分辨成因层序地层学和它的应用时,一个学生问我为什么不用经典的层序地层学。我的回答是:从事石油工业的地球物理学家从不用 25 年前的老技术,为什么地层学家不能开创新的层序地层学理论呢?我在这本论文集集中使用高分辨率成因地层学的原理、概念和方法,是因为与传统的层序地层学相比,成因地层学理论和方法更完善、更具逻辑性、可应用的领域更广,而且具有可预测性。

高分辨率成因地层学的可预测性基于四个基本原理:沉积基准面原理、物质守恒原理、沉积物体积分配原理以及相分异原理。沉积基准面是一个潜在的势能平面,它描述了可容纳空间变化与地表侵蚀、搬运与沉积过程之间的能量平衡。可容纳空间与沉积物补给比值(A/S)向单一方向增加与减小的地层旋回变化记录了基准面旋回。物质守恒与基准面相对于地表的升降产生了第三个原理——沉积物体积分配。沉积物体积分配意指在基准面变化期间相域内不同沉积物体积的保存作用。由于沉积物体积分配控制或影响着相组成、相组合与相序、原始地貌的保存程度、岩石物性、地层结构以及旋回的对称性,因此相分异在很大程度上是沉积物体积分配作用的结果。相分异有两种类型,一种是在不同的 A/S 情况下占据沉积剖面上相同环境或地理位置的地貌要素变化;另一种是原始地貌要素保存的程度及其相对比率的变化。

成因地层学的上述原理与方法有着直接的联系,它们很容易在不同的沉积环境和岩石类型中应用。在地层单元和储层内部很少存在不整合的地层中开展油藏描述,高分辨成因地层学作为地层对比的方法,作为预测储层和盖层的物性、体积与连续性的手段具有无比的优越性。高分辨率成因地层学独特的优越性之一是具有将地层的一维信息转化为对多种类型和规模的沉积学与地层学属性的三维预测的能力。这是由于物质守恒与基准面变化控制了沉积物体积分配,由此控制了各种尺度的地层性质。

高分辨率成因地层学同时还是在无井控制区利用数学反演方法开展地层反演新技术和利用确定性沉积建模方法定量预测地层、沉积属性的基础。地层反演技术为更深入地认识地层架起了联结不同分辨率的地震—钻井之间的桥梁。至少有三个石油公司内部的“最佳实践”地层学指导手册(其中之一已公开发表)中推荐使用高分辨率成因地层学的理论与方法。也许这也是一些中国层序地层学倡导者决定出版这本书的原因,因此也就有了这本书的问世。

这本书阐述了成因地层学的概念、方法、思路和应用。早期的一些文章已在英文和中文刊物上发表,把它们编入这本书是因为它们涉及了该项理论的基础和概念,或是提供了一些应用实例,而不是其他研究的简单复制。邓宏文教授和她的同事们翻译了大量的英文手稿。作者对此一并表示感谢!

Timothy A. Cross

2002 年 6 月 11 日

前言

层序地层学自 20 世纪 80 年代中后期引入我国后,经过十余年的认识与实践,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,如事件地层学、生态地层学、稳定同位素地层学、磁性地层学、地震地层学、层序地层学等,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。

随着地球油气资源勘探的逐渐深入,世界寻找油气田勘探难度逐渐增大,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。

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。关于高频层序的划分,根据硅质碎屑岩解释的全球海平面升降可以分为 5 个级别,频率范围为 9~10 Ma, 1~2 Ma, 0.1~0.2 Ma, 0.01~0.02 Ma, 对应的层序地层单元分别属于二级、三级、四级、五级旋回,对应的地层单元为超层序、三级层序、四级层序、五级层序等。Mitchum 和 Vail (1991) 按层序的时间跨度将层序划分为五级,即 > 50 Ma (一级层序); 5~50 Ma (二级层序); 0.5~5 Ma (三级层序); 0.1~0.5 Ma (四级层序); 0.01~0.15 Ma (五级层序)。上述分类中的四、五级层序属准层序或准

层序组级别。J.C. Van Wagoner 等人 (1990) 提出的构成体系域的基本组构单元——准层序组、准层序的概念及至层组、层、纹层组和纹层的多级次地层单元的划分, T.A. Cross 的多级次基准面旋回的划分与对比技术均属高分辨率层序地层学的研究范畴。

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位体系域、海进体系域、高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。

与国内目前有关层序地层学的专著或译著不同, 本书介绍的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。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。

自 20 世纪 80 年代以来, 以多级次基准面旋回为参照面的高分辨率层序地层学的基本理论和研究方法在认识与实践的反复验证中不断完善, 现已进入通过正、反演模型的建立对不同构造背景、不同沉积环境的地层进行定量预测的阶段。由于其在不同构造类型盆地、海相和陆相不同沉积环境形成的地层开展层序地层研究的广泛适用性, 以及在以不整合面为界的三级层序中可以进行高精度等时地层单元划分与对比的特点, 逐渐被美国的一些石油公司、法国的 Elf 公司、挪威的 Statoil 公司、哥伦比亚的一些石油公司等接受。在油气勘探与开发的应用实践中, 高分辨率层序地层学理论与技术正在不断完善与发展。

本书系统介绍了高分辨率层序地层学的基本理论与研究方法, 以大量实例列举了该理论和方法在国内外不同沉积背景和沉积环境的地层划分、对比及油气勘探与开发中的应用。特别是在陆相盆地碎屑岩不同沉积环境中应用的实例, 向读者展现了该理论与方法的广泛适用性与推广前景。

全书内容取材于科罗拉多矿业学院地质和地球物理系 T. A. Cross 的成因地层研究组和中国地质大学能源系相关科研组多年来的研究工作和科研成果、已发表和未发表的文章、硕士和博士研究生的论文等。

全书共分三大篇：第一篇主要论述高分辨率层序地层学的理论基础和研究方法；第二篇主要介绍了如何以露头、岩心、钻/测井、地震资料为基础识别多级次的基准面旋回，开展高分辨率层序地层划分与对比，并以具体实例介绍了高分辨率层序地层学在国内外油气勘探与开发中的应用，特别是陆相含油气盆地中的应用；第三篇为正、反演模型及在地层预测中的应用。

参加本书部分英文文献翻译工作的有中国地质大学能源系的博士研究生邢军、许红、张占松、汤军、陈清礼、王平等，辽河油田地质科学研究所的祝永军、张茱、李宏伟、彭峰、高益桁、张海琴、谢梅、马悦等。

目 录

序 前 言

第一篇 高分辨率层序地层学的基础理论与研究方法

第一章 高分辨率层序地层学的基础理论	3
第一节 基准面与基准面旋回	3
第二节 基准面旋回与 A/S 值	6
第三节 可容纳空间与沉积物的体积分配	8
第四节 “相”分异作用	13
第二章 基准面旋回的识别与对比技术	16
第一节 基准面旋回的识别	16
第二节 基准面旋回对比	22

第二篇 高分辨率层序地层学在油气勘探与开发中的应用

第三章 海岸平原-浅海沉积体系层序划分与储层预测	27
第一节 碎屑楔状体的对比策略	27
第二节 浅海和海岸平原地层的叠加样式、沉积物体积分配和相分异	41
第三节 鄂尔多斯盆地上古生界含煤层序地层与储层预测	49
第四章 河流相地层层序分析与储层预测	55
第一节 哥伦比亚中 MAGDALENA 盆地陆相地层的对比策略和方法	55
第二节 沾化凹陷滩海地区馆陶组河流相高分辨率层序地层划分与储层预测	72
第五章 重力流沉积地层层序划分、对比及应用	79
第一节 重力流沉积地层层序划分与对比方法	79
第二节 辽河西部凹陷沙三段湖底扇沉积层序划分与对比	83
第六章 湖相沉积地层层序划分与储层预测	90
第一节 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	91
第二节 东濮凹陷前梨园洼陷下第三系湖相地层层序分析	98
第三节 渤中凹陷西斜坡区东营组层序地层与储层预测	105
第四节 渤海湾盆地惠民凹陷沙三段高分辨率层序地层与岩性圈闭预测	124
第七章 高分辨率层序地层学在储层描述中的应用	147
第一节 高分辨率层序地层学在储层分析中的应用	147
第二节 地层对陆相沉积储层的控制	161
第三节 哥伦比亚中 MAGDALENA 盆地冲积河道砂岩油藏结构的描述及预测	182

第三篇 地层正演、反演模型及应用

第八章 地层正演模型	205
第一节 依据基准面旋回原理的正演模型	205
第二节 成因层序内沉积物体积分配和旋回对称性变化模拟	210
第三节 成因层序间沉积物体积分配和旋回对称性变化模拟（叠加样式分析）	212
第四节 高分辨率地层对比的概念基础	213
第九章 地层反演模型	216
第一节 地层反演的概念	216
第二节 地层反演的科学基础	218
第三节 地层反演模型的建立与应用	228
第十章 测井基准面旋回自动判别技术及其应用	243
第一节 测井高分辨率层序地层计算机自动划分的方法和原理	243
第二节 测井基准面旋回自动判别技术应用实例	245
第三节 结论	246
参考文献	248

第 一 篇
高分辨率层序地层学的
基础理论与研究方法

第一章 高分辨率层序地层学的基础理论

第一节 基准面与基准面旋回

一、概念

基准面的概念对于地质学家来说并不陌生，早在 1917 年 Barrell 就认识到地层层序是基准面穿越地表上升与下降运动过程的地质记录，但地质学家对基准面含义的理解却不尽相同（图 1-1）。一些人认为，基准面即地貌学上的平衡剖面，进一步的认识是地层基准面为分隔沉积作用和剥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作用和埋藏作用”（Sloss, 1963）。由于在基准面位于地表之上的地方，沉积物发生沉积作用，而在基准面位于地表之下的地方，沉积物发生剥蚀作用并被向下搬运到基准面位于地表之上的位置，由此，在某一个固定的地理位置，基准面穿越地表的上升和下降产生了地层记录，在这个位置上剥蚀或沉积作用交替发生，形成由不整合面分开的垂向相序。

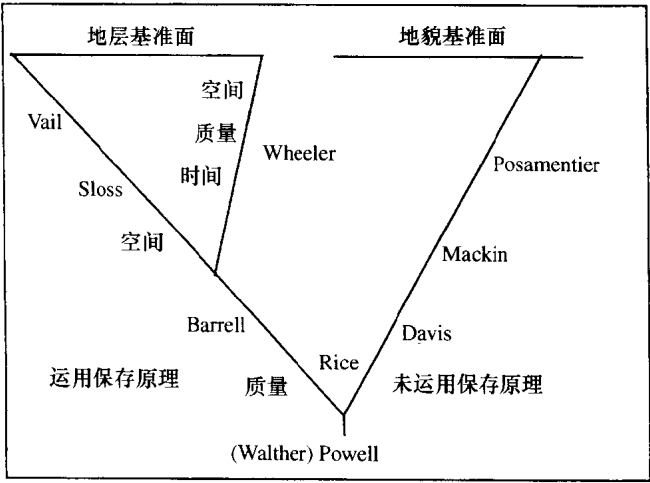


图 1-1 基准面概念的演化及应用
(据 T.A.Cross, 1998)

Busch (1959) 重新引入了地层旋回是在基准面旋回期间形成的沉积记录的概念。他把术语“成因层序”作为一个地层单位。一个成因层序是在一个增加和减少可容纳空间的基准面旋回期间堆积的沉积物进积/加积的地层单元。这个地层单元包含一个完整的基准面旋回期间在所有成因上有联系的沉积环境中堆积的沉积物（图 1-2）。一个成因层序的半旋回边界发生在基准面上升到下降或下降到上升的转换位置。在不同的古地理环境，这些转换点或表现为地层不连续面，或表现为分别记录了可容纳空间增加或减小的整合地层。

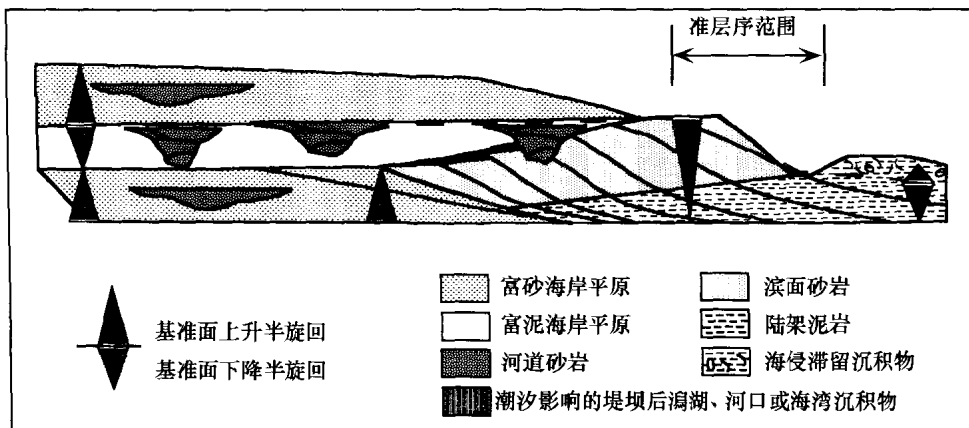


图 1-2 一个成因层序包含基准面旋回期间所有相邻环境沉积的沉积物

所以，在一个成因层序内的垂向相序满足“相”对比的 Walther 定律。如果地层不连续，其不连续面同成因层序边界一致。由此一个基准面旋回的全部过程被岩石 + 间断面的组合所记录。

Wheeler, H.E. (1964) 认为，基准面旋回经历了一个时间域，基准面变化对沉积物保存程度和内部结构有直接的控制作用。Wheeler 提出了一个更加适合于地层分析的基准面概念，基准面既不是海平面，也不是海平面向陆方向延伸的水平面，同样不具有地貌学上的平衡剖面的定义。地层基准面是一个相对于地表波状起伏的、连续的、略向盆地方向下倾的抽象面（非物理面）。这个面相对于地表上升和下降，其位置、运动方向及升降幅度不断地随时间而变化。当基准面上升时，基准面与向海倾斜的地面的交点向上坡移动，使沉积物可以堆积的基准面之下的地表面积增加，并且增加了在陆相环境中沉积物堆积的能力；当基准面下降时，会发生相反的结果。Wheeler 认为，基准面是一种状态，在这种状态下，要求搬运沉积物的能量与储存沉积物的能量是平衡的。

T. A. Cross 等引用并发展了 Wheeler (1964) 关于基准面的含义，明确指出：基准面为一个势能面，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，地表要不断地通过沉积或侵蚀作用改变其形态，使其向靠近基准面的方向运动。因此，基准面描述了迫使地表上、下移动到某一个位置的能量。在这个位置上，地形梯度、沉积物供给和可容纳空间是平衡的（图 1-3）。基准面在变化中总是具有向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（base level cycle）。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，后者称之为基准面穿越旋回（base level transit cycle）。基准面由上升到下降或由下降到上升的转换位置称之为基准面旋回的转换点（turnaround point）。

不论规模的大小，每种规模的基准面旋回导致的地层旋回都是时间地层单元，因为它们是在基准面旋回变化期间由成因上有联系的沉积环境中堆积的地层记录构成。由于基准面旋回运动在地表之下时产生剥蚀作用，基准面旋回所经历的全部时间由地层记录（岩石）和沉积间断面组成。

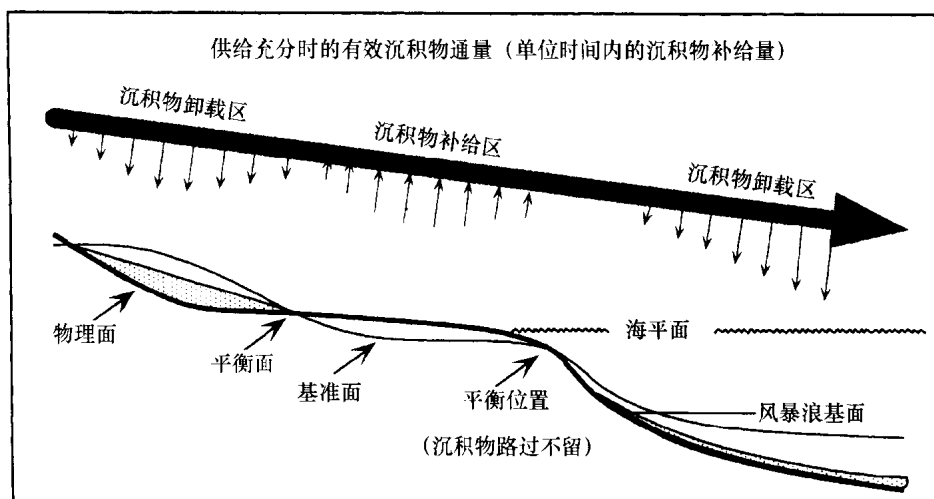


图 1-3 基准面、可容纳空间和反映可容纳空间与沉积物供给之间平衡时的地貌状态
(据 T. A. Cross, 1994, 修改)

地层旋回的多级次特征说明了基准面旋回的多级次性。最短期的地层旋回是符合沉积相序或相组合基本定律 (Walther 定律) 的进积/加积的地层单元, 即成因地层单元 (也可以称作成因层序)。一个成因层序包括在一个基准面旋回期间相互联系的沉积环境中堆积的, 并在地层记录中得以保存的所有沉积物。成因层序的相序符合 Walther 定律。短期地层旋回由短期基准面旋回期间堆积在侧向上有联系的沉积环境中保存下来的沉积物组成。连续的短期地层旋回在某些地区可以被地层不连续界面分开, 地层不连续面可以是基准面上升和下降期间形成的侵蚀不整合面、沉积物路过不留面和非沉积作用间断面。在某些地区可以被基准面上升到下降或下降到上升的整合地层分开, 通过旋回对称性、地层结构和相序的变化可以识别出这些转换界面。

二、基准面旋回变化的主控因素

前面已谈到, 基准面是抽象的、非物理的界面, 而且地层旋回的存在表明确实存在一个变化的势能面, 其通过制约可容纳空间变化而控制着地层的沉积与保存作用, 这就是地层基准面。经典层序地层学曾总结出了控制层序形成与发育的四大要素, 即构造沉降、全球海平面升降、沉积物补给与气候。事实上, 这些要素综合作用的结果反映在基准面的变化上, 基准面相对于地表位置的变化又控制了层序发育特征。基准面的变化是海平面、构造沉降、沉积物补给、沉积负荷补偿、沉积压实与沉积地形等各要素变化的综合反映, 是这些参数相对比值变化的结果。

与海相盆地不同, 在陆相盆地中, 基底沉降、沉积物供给和气候对基准面变化和层序发育的控制作用更加明显。其中, 构造运动的控制作用至关重要。陆相盆地构造运动强烈, 具有很强的分割性。如我国东部断陷盆地形成早期, 由于拉张作用造成软流圈上拱而具裂陷性质, 晚期因热流扩散岩石圈冷却收缩而具拗陷性质。盆地的拉张裂陷时期盆缘同生正断层事件是构造运动的主要形式, 是一个不连续的、多旋回的幕式沉降过程 (张万选, 1994)。断层活动中应力的积累与释放决定了断裂作用以不连续的间歇式活动完成, 即幕式运动。断层的幕式活动造成断块基底沉降的阶段性及至可容纳空间的周期性变化。

断层幕式活动的规模、幅度和强度则控制着可容纳空间的变化速率。边界控盆断裂幕式活动形成长期地层旋回，期间产生的次级幕式活动形成次一级的地层旋回，由此导致断陷盆地充填地层的多级次旋回特征。

不同级次的基准面旋回形成的主要控制因素不同。构造基准面旋回的形成受区域构造运动控制，多与盆地的演化阶段有关。气候的变化仅影响沉积物的补给量和沉积物类型。对长期基准面旋回内部次级、高频基准面旋回来说，除受局部构造运动控制外，沉积物补给量的变化对旋回的形成与发育的影响明显增强。构造旋回也可以划分为不同的级次，形成不同级次的不整合面或沉积间断面。构造基准面旋回的级次愈高，形成的地层旋回在盆地内的可对比程度愈差。区域构造运动形成的长期基准面旋回在盆地范围内可以追踪对比，如断陷盆地控盆边界断裂活动形成的基准面旋回。规模次一级的基准面旋回可以由二级断裂的活动造成，在二级构造单元或局部地区的可对比性强。更次一级的基准面旋回受构造沉降与沉积物补给双重作用的控制更加明显。短期基准面旋回的形成除了与构造运动、沉积物补给作用等因素有关外，自旋回作用对地层旋回形成的影响逐渐增加，如河流的决口、三角洲朵叶迁移等，因而一般仅能在沉积体内部进行追踪与对比。

对陆相湖盆来说，周期性的构造运动、交替变化的古气候条件、断层的间歇性活动都会引起基准面的周期性升降变化、湖盆水体深度和水域大小的变化、沉积物供给速率的变化，最终导致可容纳空间的变化，由此决定了地层旋回的形成与发育特征。

第二节 基准面旋回与 A/S 值

控制沉积物在地表形成、分布和保存的诸多的物理、化学和生物作用可归纳为两个地层变量，即可容纳空间 (A) 和沉积物供给 (S)，二者以比值形式 (A/S) 表示。一组地表过程可以合并为变量 A ，其控制地表相对于地层基准面上升或下降形成的沉积物贮存的潜在能力。控制可容纳空间的地质过程包括构造运动、机械和热负载的岩石圈响应、沉积压实作用和流动分异作用、层间流体的流动以及海平面变化等。地表相对于地层基准面向下运动时，沉积物贮存潜能增大；地表在地层基准面之上向上运动时，剥蚀潜能增大。另一组地表过程合并为变量 S ，其控制沉积的产物及其再分布，通过增加和减少沉积物，使地表向上或向下、靠近或远离地层基准面运动。这些地表过程包括气候、地形起伏、地貌高程、植被、源区的岩石类型、营养供应、生物富集程度及生产能力、风化剥蚀速度和水动力能量等。当沉积物堆积作用致使地表向上、向地层基准面移动时，发生沉积物堆积作用的潜力逐渐降低，而发生沉积物路过不留的潜力增加。

两个变量的所有过程可用能量术语——牛顿·米表示。当能量需要地表向上或向下、靠近或远离地层基准面运动时，每个过程都是可测定的。由于两个术语的单位都是牛顿·米，两个变量可表示为无量纲的可容纳空间与沉积物供给比值 (A/S)。把诸多的沉积过程组成两个变量，并用比值来表示的主要原因之一是：通常我们不能分辨每个过程对整个地层响应的贡献。没有某一地层响应归功于某一单独的地质过程，诸多响应与单种作用或作用组合的关系可能是非线性的。我们可以观察到某种地层响应，然后用 A/S 值分析地质过程的综合。用量化技术，如地层反演技术 (Lessenger and Cross, 1996)，至少能够分辨某些过程对地层响应的贡献。

可容纳空间指的是地表和基准面之间可供沉积物堆积的空间体积。基准面相对于地表的升降会使可容纳空间产生变化。当基准面位于地表之上时，提供了可供沉积物堆积的空间，就会发生沉积作用，此时的任何侵蚀作用均是局部的或暂时的。随着基准面相对于地表的进一步上升，可容纳空间不断增大，可供沉积物在该可容纳空间内堆积的潜在速度增加。但此时沉积物堆积的实际速度还受控于搬运物质的地质过程。也就是说，可容纳空间控制了某一时间内，某一地理位置沉积物堆积的最大值， A/S 值则决定了可容纳空间内沉积物堆积速度、保存程度和内部结构（如堆积样式）等。当沉积物补给速率大于可容纳空间增加速率（ $A/S < 1$ ）时，海（湖）岸线向盆地方向推进，沉积物发生进积作用；当沉积物补给速率小于可容纳空间增加速率（ $A/S > 1$ ）时，海（湖）侵作用发生，沉积物发生退积作用。当基准面位于地表之下时，可容纳空间消失，此时的任何沉积作用均是暂时的和局部的。随着基准面相对于地表进一步下降，侵蚀作用的潜在速度增加，但实际速度也受将沉积物搬离地表的地质过程所限制。当基准面与地表一致时，既无沉积作用又无侵蚀作用发生，沉积物仅仅路过而已。因而，在基准面变化的连续的时间域内，在地表的不同地理位置表现为四种地质作用状态，即沉积作用、侵蚀作用、沉积物路过时既无沉积作用出现又无侵蚀作用发生的沉积间断（非沉积作用）及沉积物非补偿（ $A/S \rightarrow \infty$ ）产生的饥饿性沉积作用。由此造成地层记录中代表基准面旋回变化的时间-空间事件由岩石或岩石 + 界面（不整合面或沉积间断面）组成（图 1-4）。

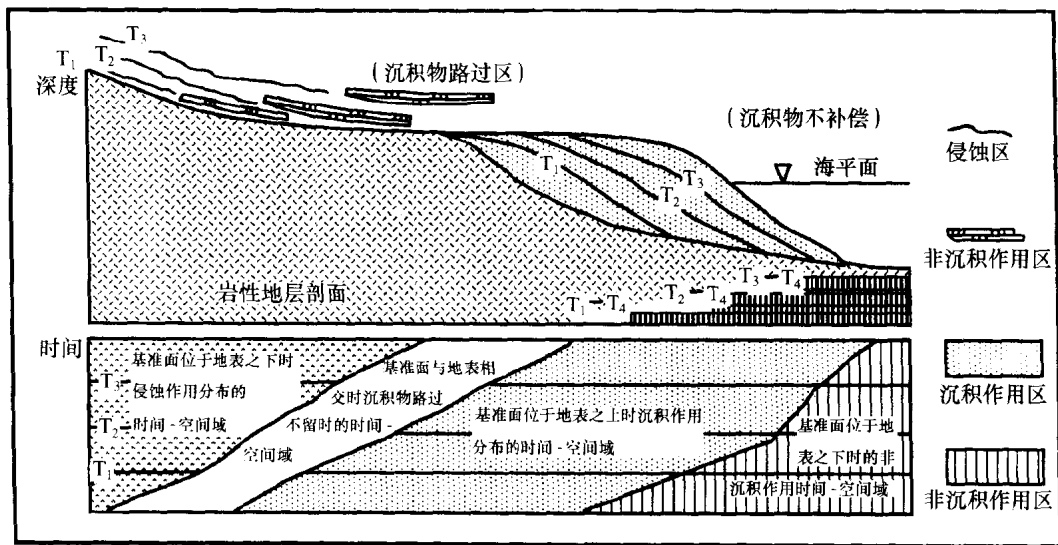


图 1-4 岩性地层剖面及侵蚀作用、沉积物的路过、沉积作用和非补偿沉积作用的时空迁移对比图解

（据 H. E. Wheeler, 1964）

地层过程控制可容纳空间和沉积物供给的动态变化，从而控制了原始三维地貌要素的保存能力。有些情况下，地层的 A/S 值还控制着地貌要素的形成环境。保存能力可以由保存在地层中的原始三维地貌沉积体的多样性及其比例确定。在基准面上升期间可容纳空间增加时沉积物体积和地貌要素较下降期间可容纳空间减小时保存程度要完整。由此，在基准面旋回的不同位置地层特征也不同。大量的地层学和沉积学性质，包括岩石物性、相

组合和相序、层组厚度、地层结构及地层不整合面出现的频率等，都记录了保存程度和 A/S 值条件。

A/S 值增大和减小的趋势与侧向上相关的沉积环境沿斜坡的上下迁移是一致的。通常“相模式”所描述的沉积学和地层学的特性实际上是基准面变化过程中不同位置的地层特性的混合。由图 1-5 可以看出，海岸线形态的变化就是 A/S 值随时间推移的变化产生的。基准面下降期间，向陆方向可容纳空间减小，盆地高部位的沉积物的存储能力降低，

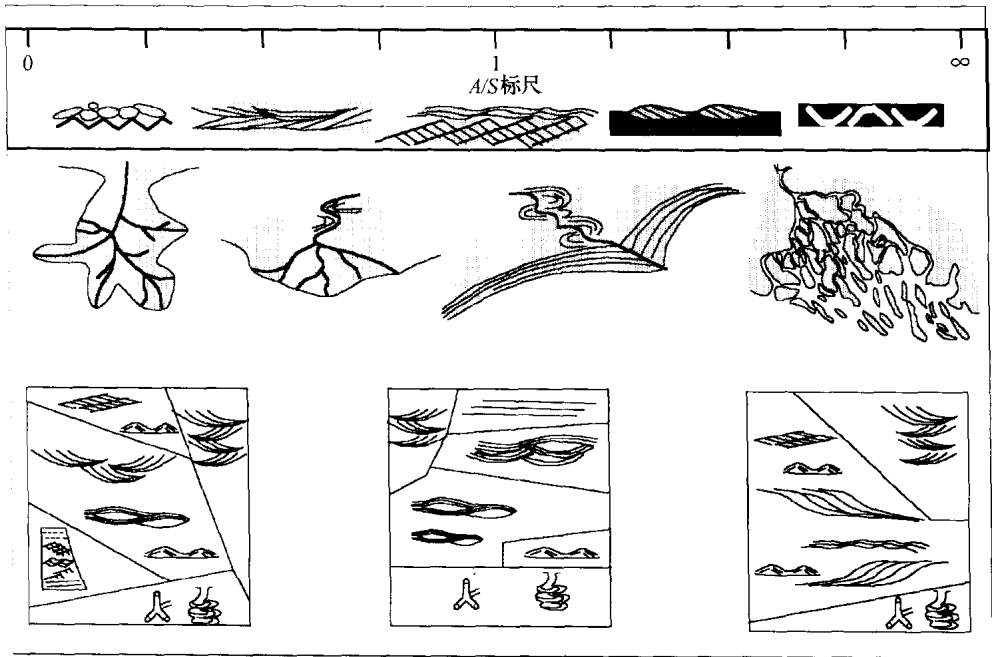


图 1-5 随 A/S 值变化的不同三角洲类型及其相组成的变化
(据 Cross, 1999)

多数沉积物经过海岸平原路过不留而堆积在滨面陆架上。基准面上升期间，向陆方向的可容纳空间增大，高部位的沉积物储存能力增加，搬运至滨面的沉积物较少 (Barell, 1912; Cotton, 1918; Cross 等, 1993)。三角洲的类型变化实际上与 A/S 值变化密切相关。随着海岸部位河流作用增强，河流供给沉积物的增加，海浪和潮汐通过对河流沉积物再分配而改变海岸地形中所起的作用逐渐减小，三角洲发育成鸟足状或朵状。随着河流向海岸输入沉积物的减少，海岸线弯曲度变小，并逐渐由海浪作用所控制。当沉积物供给进一步减少时，海岸因水淹而变成港湾形，近海地区受潮流的影响更显著。海岸地貌的这些变化是沉积物供给与存储能力平衡关系变化的产物，它制约着出现在相同地貌位置的沉积环境，并因此控制了进入地层记录中的相和相组合特征。

第三节 可容纳空间与沉积物的体积分配

一、沉积物体积分配的概念

在基准面变化过程中发生的沉积物体积分配作用最先由 Barrell (1912) 和 Cotton