

层序地层学 基础与应用

池秋鄂 龚福华 编著

石油工业出版社

层序地层学基础与应用

池秋鄂 龚福华 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书围绕层序地层学最新理论及发展,从层序的成因机制出发,系统研究不同沉积背景下陆相碎屑岩和海相碳酸盐岩的层序形成条件、形成机制及发育特征,并重点介绍不同资料中层序的研究方法及在油气勘探与开发中的应用原理,介绍了国内外层序地层学在油气勘探与开发中的典型实例。

本书适合油气勘探、开发等领域的科技工作者。

图书在版编目(CIP)数据

层序地层学基础与应用/池秋鄂等编著.
北京:石油工业出版社,2001.11
ISBN 7-5021-3493-X

I. 层…

II. 池…

III. 地层层序—研究

IV. P539.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 057447 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)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 15 印张 376 千字 印 1—1200
2001 年 11 月北京第 1 版 2001 年 11 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5021-3493-X/TE·2586
定价: 30.00 元

序

《层序地层学基础与应用》一书是作者在从事多年层序地层学研究的基础上，深入调研近二十年来国内外诸多著名学者关于层序地层学的论著与研究成果，并结合中国实际的地质特征和层序地层学在中国油气勘探中的实际应用经验编著而成。

本书以少量的篇幅对层序地层学的发展与基本理论进行了概述，尤其是对层序地层学理论存在争议的概念进行了较为详细的论述并进行了系统对比和总结，这有助于学者了解、掌握层序地层学理论，对比研究各类学派的观点。

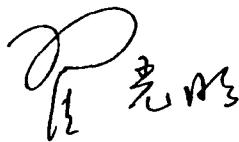
书中用大量篇幅对陆相沉积和海相碳酸盐岩沉积中层序地层学的研究与应用进行了系统论述，并列举了丰富的资料，这对当前我国进行层序地层学研究与应用有一定的参考价值。

本书另一特色就是对层序地层学的成因机制进行了详细的分析与论述，并由此针对不同成因主导形成的层序地层提出了具体研究方法，尤其是书中系统总结的综合各学科方法建立层序地层格架的方法，是对近些年层序地层学研究成果的集成，这对当前我国层序地层学研究与应用是有一定作用的。

层序地层学作为油气勘探开发研究与评价的新理论，为综合研究油气成藏组合和储层特性提供了一个科学有效的新方法。作者列举了国内外层序地层学在油气勘探与开发中的多个典型实例，说明了层序地层学是油气地质勘探学家和油气地质开发学家在研究工作中必须考虑的问题。

总之，本书内容丰富，思路清晰，可以说是近期关于层序地层学的论著中较具有特色的一本书，相信本书会成为当前层序地层学研究人员有价值的参考资料。

中国工程院院士



2001年10月

前 言

层序地层学代是一种划分、对比和分析沉积岩系的新方法，其理论指导的地层研究极大地改变了人们对地层形成过程和盆地建造控制作用的认识，其模式分析对地层格架的建立和数字模拟研究提供了一个强有力的手段，使地层学的研究前进了一大步。层序地层学研究已经证明形成周期性层序的各种作用的重要性，这些因素包括全球海平面变化、区域构造作用及气候变化。

层序地层学与沉积体系和岩相分析相结合的研究方法已成为层序地层学研究的重点。其研究已逐步转向与各种沉积体系和岩相分析有关的地层层序、与油气藏的勘探开发过程有关的储层层序及各种方法综合的高分辨率层序研究等方面，并且已进入理论研究、广泛实践与全面发展的新时期，并在油气田的勘探开发过程中发挥着巨大的作用。层序地层学已逐步成为油气地质勘探学家和油气地质开发学家在研究工作中不可缺少的工具。

本书共分九章。第一章简要介绍了层序地层学及其研究意义；第二章介绍了基本的层序地层学理论及研究学派；第三章介绍了层序格架与旋回特征；第四章介绍了碳酸盐岩沉积层序与模式；第五章介绍了层序的形成机制，从长周期海平面变化及造陆运动、米兰柯维奇作用和构造机制等方面进行了探讨；第六章介绍了以地震、钻测井、露头等资料为基础的碎屑岩和碳酸盐岩层序综合研究方法；第七章总结了我国若干典型沉积地层序地层特征与成藏条件，包括我国东部裂谷盆地和海相克拉通盆地、西部前陆盆地及东南海域大陆边缘断拗盆地；第八章介绍了层序地层学在油气田开发中对油气储层非均质性的研究；第九章以五个典型实例为基础介绍了层序地层学在油气田勘探开发中的实践。

本书的九章内容融为一体，所用的资料是国内外 20 世纪 90 年代初至今的地质学家、地球物理学家和油藏开发学家的最新成果，也贯穿了作者的新认识与新见解和部分研究成果。

在编写过程中，得到了中国地质大学徐怀大教授、樊太亮教授、中国石油天然气股份有限公司罗光文博士的指导，本书的出版得到了中国石油天然气集团公司咨询中心翟光明院士、勘探开发公司童晓光教授的支持，在此一并深表谢意。

由于编著者水平有限，书中不完善之处，敬请广大读者批评指教。

编 者
2001 年 10 月

目 录

第一章 层序地层学及其研究意义	(1)
第一节 简要历史回顾	(1)
第二节 层序地层学的新概念	(4)
第三节 层序地层学研究进展	(6)
第四节 层序地层学研究的发展趋势	(7)
第二章 层序地层学理论与学派	(9)
第一节 Exxon 沉积层序理论	(9)
第二节 Galloway 成因地层学概念	(31)
第三节 Cross 陆相高分辨率层序地层学原理	(32)
第三章 层序格架—旋回分析	(40)
第一节 层序格架级次划分	(40)
第二节 四种基本的地质旋回与特征	(47)
第四章 碳酸盐岩层序地层学	(66)
第一节 碳酸盐岩层序地层分析基础	(66)
第二节 碳酸盐岩沉积作用与层序地层模式	(70)
第五章 层序的形成机制	(82)
第一节 长周期海平面升降运动和造陆运动	(84)
第二节 米兰柯维奇地球运动旋回与天文周期	(93)
第三节 构造机制	(98)
第六章 层序地层分析法	(123)
第一节 层序地层分析法	(123)
第二节 层序地层格架建立的方法	(126)
第七章 中国若干典型沉积盆地层序地层学及成藏条件研究总结	(145)
第一节 中国东部裂谷盆地沉积层序特征与油气成藏组合	(145)
第二节 克拉通盆地沉积特征与天然气成藏条件分析	(155)
第三节 中国西部前陆盆地沉积特征与油气成藏组合	(158)
第四节 东南海域大陆边缘断坳盆地沉积特征与油气成藏组合	(161)
第八章 层序地层学在油气田开发中的应用	(165)
第一节 层序地层学与油气储层非均质性	(165)
第二节 层序地层与四维地震	(172)
第九章 典型实例分析	(176)
实例一 松辽盆地东南隆起裂谷盆地层序地层学研究	(176)
实例二 济阳坳陷胜海地区东营组浊积砂体隐覆油气藏勘探	(180)
实例三 渤海湾盆地济阳坳陷北部胜海地区上第三系馆陶组河流相地层河道砂体预测	(188)

实例四	西班牙比利牛斯山南麓上白垩统前陆的变形对沉积层序的影响·····	(192)
实例五	综合运用层序地层学、地质统计模拟和生产数据来模拟河道砂岩储集层的 空间分布 (法国 Chaunoy 油田的冲积储集层) ·····	(210)

第一章 层序地层学及其研究意义

第一节 简要历史回顾

层序地层学是一门新兴的边缘交叉学科，作为一种划分、对比和分析沉积岩系以进行研究地层组合的概念出现在地质学领域仅仅只有几十年的历史，然而，其理论指导的地层研究极大地改变了人们对地层形成过程和盆地充填机制控制作用的认识。在大量的理论研究及广泛的实践中，层序地层学概念及其涵义也随着地质学理论不断发展而发展。

自 1948 年 L.L.Sloss 在美国地质学会的沉积相研讨会上提出层序概念至 20 世纪 70 年代早期，为层序地层学发展的初期阶段。这个阶段，Sloss 主要贡献在于他提出了以不整合面为界的层序是地层学的工具。Sloss (1963) 将北美克拉通前寒武纪末期至全新世地层划分成以区域不整合面为边界的六套地层，称之为层序，认为是实用的作图单元，并以北美印第安部落的名字对这些层序进行了命名（图 1—1）。虽然 Sloss 提出的克拉通层序概念为层序地层学研究奠定了基础，但在 50 年代至 70 年代中期，除了 Wheeler 及其从前的学生，他的这一思想几乎无人接受。1958 年，

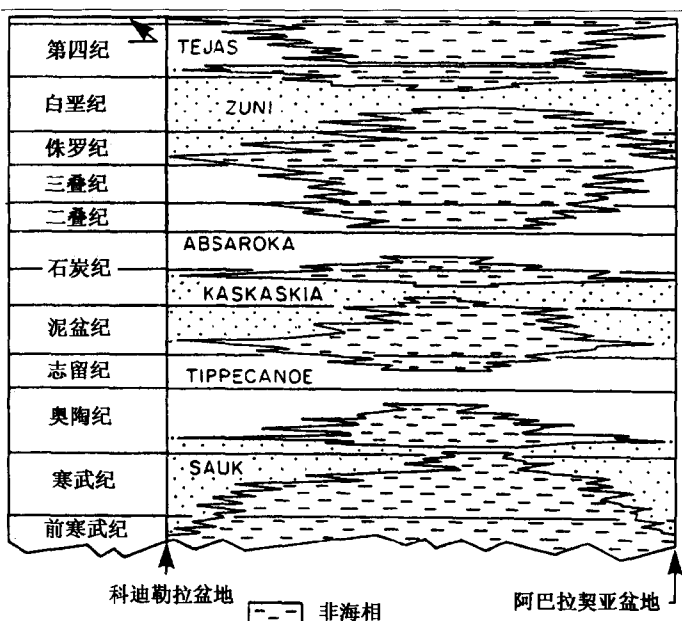


图 1—1 L. L. Sloss 识别出的北美显生宙克拉通层序
(1963)

Wheeler 创立了年代地层图，即所谓的 Wheeler 图解（图 1—2）。该图能有效地识别不同地区地层单元和不整合面在年代上的确切分布。然而，在这一阶段，一些学者热衷的是研究全球地层对比、全球海平面变化的可能性及在海平面变化控制下形成的地层单元的几何形态等学术问题。

地震地层学研究极大地推动了层序地层学的发展，这项工作是由 Sloss 早期毕业的研究生 P.R.Vail 领导的。1977 年，《地震地层学在油气勘探中的应用》论文集的出版标志着层序地层学成为一门独立的分支学科，进入地震地层学的发展阶段。地震地层学利用了地震反射层平行于地层反射界面、并具有年代地层意义的概念，能广泛用于地层的划分与对比。同时，这种方法与野外露头研究中常规的盆地分析方法不同，它克服了常规研究方法中岩相界面明显穿时的问题。

地震地层学在盆地分析中有两个主要的实用性发展：一是能相当详细地定义复杂的盆地

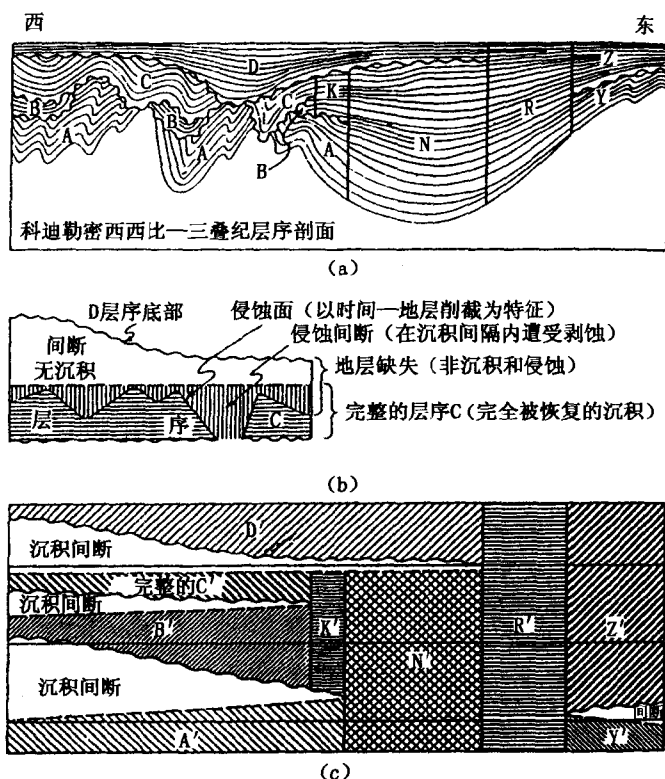


图 1—2 Wheeler 创立的年代地层图

以时间为纵坐标轴的地层横剖面精确地描绘了不同地区地层单元和不整合的持续时间。(a) 成因地层横剖面；(b) 层序 C 的时间横剖面及 Wheeler 使用的某些术语的定义；其它是把这些资料转换成年代地层图的各种表示 (Wheeler, 1958)

合面为顶底界面的地层单元”。这个层序概念比 Sloss 的层序 (1963) 所代表的时间小得多。Sloss (1963) 层序相当于 Vail 和 Mitchum 等人建立的层序周期图上的超层序 (Van Wagoner 等, 1990)。另外, Vail 提出了全球海平面变化是层序演化的主要驱动力, 并提出了利用地震剖面中反射界面上超点的迁移幅度研究海平面变化规律。这种认识一经提出, 便激起了众多的讨论 (Sloss, 1988; Galloway, 1989)。

B.U.Haq, J.Hardenbol 和 P.R.Vail (1987) 在“三叠纪以来海平面变化”的文章中首次正式提出层序地层学概念, 并指出了构造沉降、全球海平面变化、沉积物供应及气候对层序成因的控制作用; Jervey (1987) 的数学模拟定量论证了这四个参量对层序形成的控制作用。

格架; 二是能在大范围内识别、对比不整合面, 并对其作图。在进行地层格架研究工作中, 发展并定义了一系列特殊的术语, 尤为实用的是集中在地层终止方式的特征描述方面, 这些不同的地层终止方式携带着与沉积地层的前积、加积和侵蚀作用等有关的重要信息 (图 1—3)。由 Vail 和他的同事所进行的地震资料解释最终形成了用于解释地震资料和区域及全球地层组合的层序地层学模式, 即 Vail 的沉积层序模式。同时通过对野外露头、地震剖面、测井资料及生物地层解释的综合分析产生了著名的全球海平面变化周期图 (简称全球周期图), 随着大量生物地层学资料、磁性地层学和年代地层学证据的不断增加, 他们反复修改并陆续发表了不同版本的全球周期图 (图 1—4)。

Mitchum (1977) 强化并扩大了层序的概念, 将其定义为“由相对整合的、有成因联系的地层序列组成, 并以不整合或其可对比的整

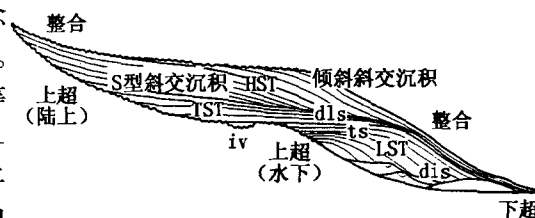
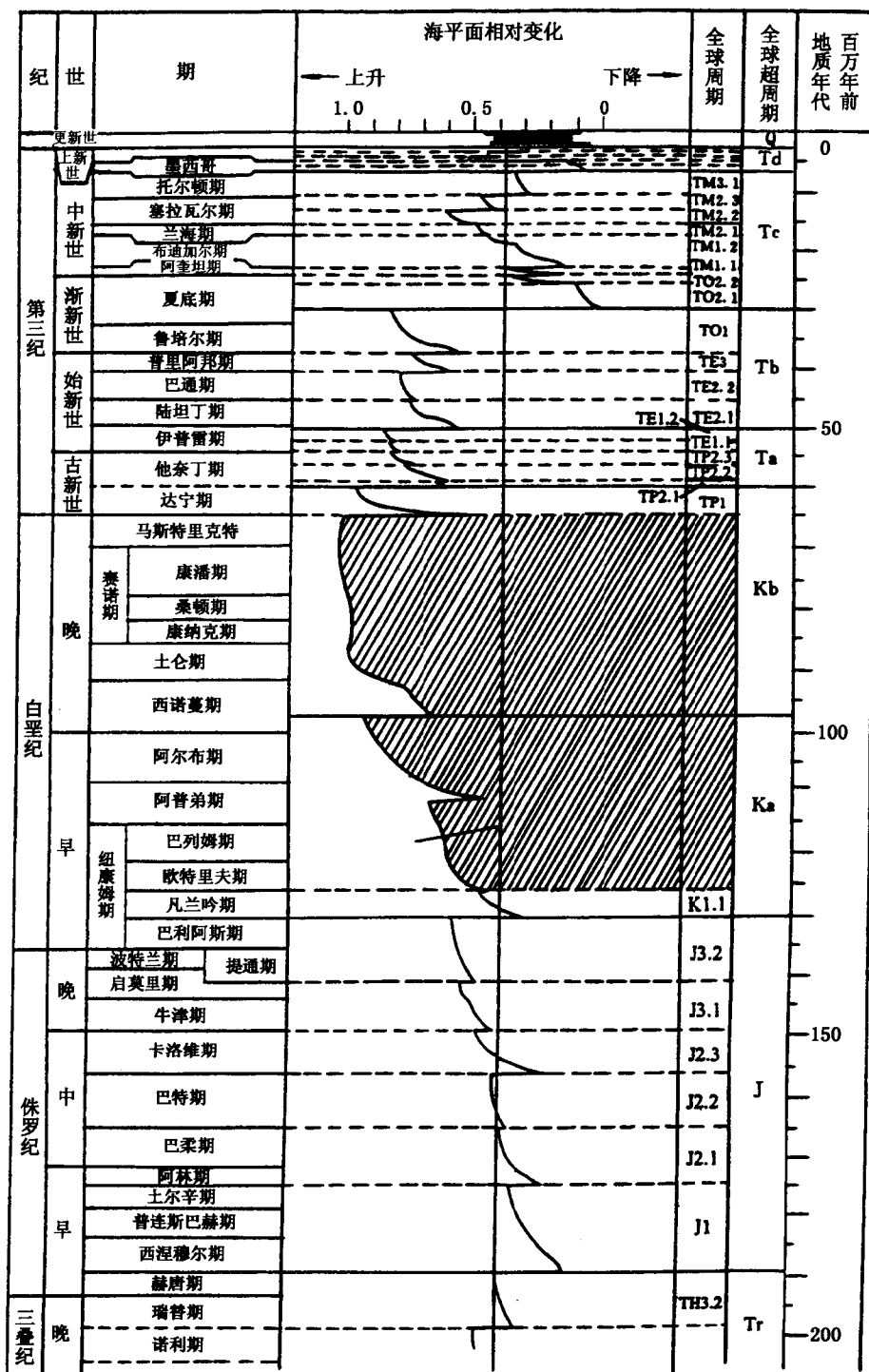


图 1—3 基本层序地层模式
(地层几何体及术语的说明)

斜交地层代表了倾斜地层剖面的横向前积或加积;
dls—下超面; ts—海进面; iv—下切河谷;
LST—低位体系域; TST—海进体系域;
HST—高位体系域 (据 Christie-Blick, 1991)



侏罗纪—白垩纪时间比例尺据Van Hinte 1976a, b

图 1—4 侏罗纪—第三纪全球海平面相对变化周期 (据 Vail, 1977)

系统的层序地层学论著是国际沉积学会 (SEPM) 第 42 集特刊 (1988)《Sea level Change—An Integrated Approach——层序地层学原理 (海平面综合分析)》, 这本文集系统、全面地讨论了层序地层学的理论与方法, 厘定了名词和术语的定义, 明确了层序地层学研究的对象、内容和任务。这本书已成为层序地层学的经典著作, 它启发了许多地质学家用新眼光来看待老资料, 鼓励他们对过去的老资料进行新的解释, 即使他们并不一定相信层序地层学能够提供全球对比的手段。这本文集的问世, 也表明层序地层学发展进入了一个新阶段。

综上所述, 层序地层学是 20 世纪 70 年代在震地层学基础上发展起来的一门新兴学科, 正式诞生于 1988 年, 其基础是震地层学理论和 Jervey 的计算机模拟。层序地层学理论发展至今, 已经在地层的划分、对比、分类和级别体系划分等地层学根本理论问题方面取得了创新与突破, 并孕育着一场新的地层学革命。由于层序地层学提供了一整套研究盆地充填、建立等时地层格架的方法, 因而受到广泛的重视和应用, 它使沉积学和盆地研究进入了一个新阶段。

第二节 层序地层学的新概念

P.R.Vail 等人 (1988) 提出了层序地层学概念, 这一概念表述为: 层序地层学是研究一套由不整合面及其相应的整合面为边界的、具有成因联系的年代地层格架内岩层间相互关系的一门学科 (图 1—3)。主要是根据露头、岩心、地震与测井等地质与地球物理资料, 结合有关沉积环境和岩相古地理解释, 对地层层序格架进行地质综合解释。它涉及到生物地层学、沉积学、地球化学、震地层学、测井地层学等学科, 能有效地划分和对比沉积层, 并能提供一种更为精确的地质时代对比、岩相古地理再造和钻前预测生储盖组合的方法。

层序地层学的最大特点在于它的科学性、定量性、预测性和综合性, 具体表现在以下几个方面。

一、科学性

层序地层学的研究基础是在对沉积作用的控制因素、物源、构造运动及气候变化因素进行分析的基础上, 建立年代地层格架, 并在这个等时的年代地层格架中分析地层分布型式, 查清沉积体系和相的空间配置关系, 建立三维沉积模式。因此, 层序地层学研究的是四维地球科学。它利用时间序列分析沉积体系的空间展布规律及沉积环境的变迁, 能够更加真实地反映事物的本质及演化规律, 并包含了岩石的物源、沉积环境和能量平衡三个方面的含义。

首先, 层序地层学包含了物源共生含义。层序的物源可以大体分为陆源、内源和火山物质来源。一定板块构造部位的盆地都有其特殊的物源区供应条件, 它们通过一定的物质传输方式和系统堆积于同一盆地, 形成特定物源共生组合体。如被动大陆边缘的物源区常常是基底隆起, 相应形成以基底隆起为物源的共生层序体。陆相断陷盆地的物源区常常是古地形高地, 形成以古地形高地为物源的共生层序体。研究物源的传输系统和传输方式可以更好地认识物源共生性质。为了研究全球构造的物源区和沉积物的传输系统, 必须对全球古水系网和古构造进行分析。

其次, 层序地层学包含了沉积环境方面的共生含义。沉积盆地的可容纳空间及其沉积作用的动力特征是决定层序性质的重要方面。海 (湖) 平面的变化和构造运动直接引起沉积盆地自然地理景观方面的变化, 引起层序形成的可容纳空间的变化, 包括各种岩相带空间位置

的变化和发育程度，也包括沉积介质条件和动力环境的变化。沉积作用动力和其发生的物理的、化学的和生物作用的环境构成了层序形成时在沉积环境方面的各种参数（包括物理、化学及生物作用方面的参数）。不同沉积环境单位，实际上就是根据不同的物理的、化学的、生物作用的、火山作用的各种动力所构成的沉积盆地中的特定的一部分地表。从动力学的观点来看，层序地层学包含沉积环境共生的含义就是由于盆地容纳空间发生变化形成沉积作用动力的变迁以及相关动力之间的共生交替。如海平面上升，可容纳空间增加，形成海进体系域和向上变深的共生序列；海平面下降，可容纳空间变小，形成海退体系域和向上变浅的共生序列。

第三，层序地层学包含能量平衡共生含义。沉积作用的能量平衡是指沉积物堆积速率与地壳沉降速率两者之间的平衡关系、补偿状况和其变化趋势。沉积作用堆积速率取决于物源供应状况和速率与相对海平面变化速率。物源供应速率与大地构造背景有关。物源性质和物源成熟度也与大地构造背景相关。稳定构造区，如克拉通盆地，常常形成物源成熟度高、稳定组分高、物源补偿性质低速率的共生模式；非稳定构造区，如活动大陆边缘，常常形成物源成熟度低、非稳定组分高、非平衡补偿性质的高速率共生模式。沉积能量的补偿平衡性是层序形成最重要特征之一。不同的平衡共生关系决定了层序堆积型式和旋律，导致形成不同的层序格架和体态。

二、定量性

计算机模拟技术的发展带动了盆地模拟技术，使定量动力地层学来评价地球历史全新途径的演化也已成为可能。测试分析技术的提高使年代地层测年技术得到发展。用各种不同沉积环境的露头、测井和岩心等资料建立的资料库为研究不同沉积环境下的层序模型提供了丰富的物质基础。反射地震运动学和多种动力学参数的研究，为地震资料属性分析与应用提供了保证，促进了储层的渗透性、孔隙度及含油性的定量研究。

三、预测性

分析沉积体系的展布规律和生储盖岩系的发育规律，是层序地层学最基本、最重要的应用。以层序成因认识为指导，以综合分析各种地质、地球物理和地球化学资料所反映的沉积环境和相类型及其变化为基础，理清盆地中不同级别层序地层格架，研究各种类型沉积相、沉积体系、体系域在纵向上的演变过程和在平面上的展布规律，对于分析和科学预见生储盖层条件和组合特点，进而提高有利勘探目标预测的准确性，具有极为重要的实践意义。十多年来，层序地层学的新思维及理论在世界各地的油气勘探与开发中已发挥出巨大的作用。

四、综合性

层序地层学虽然起源于地震地层学，但发展成为独立学科后对地质学产生了极大的影响。层序地层学与其他基础学科的不同点在于：它综合了沉积学、地震地层学、地层学和各个分支学科的优势，并与其他学科交叉渗透。盆地动力学、构造地质学、地层学和计算机科学的发展从不同角度影响和推动着层序地层学的进步，天文学和事件地层学的发展为层序成因机制的研究提供了依据。露头、岩心、测井、地震、钻井和古生物资料的综合应用减小了层序研究的多解性，并向量化方向发展。以 EXXON 石油公司为例，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了层序地层学的理论、方法或研究成果，甚至还以已知油气田与层序地层的关系为基础编制了指导新区勘探开发的指导模式（钱凯，1997）。

第三节 层序地层学研究进展

层序地层学的问世，毫无疑问是对地球科学的一场革命，推动了包括沉积地质学、储层描述在内的各个地质学科领域的迅速发展，具有十分重要的意义，90年代是其发展的高峰时期。目前，层序地层学无论是在理论上、实践上还是在研究的深度和广度上都取得了长足的进展，这些进展主要表现在以下几个方面。

一、在层序地层学基本理论研究领域

目前，层序地层学的理论研究工作已从早期的被动大陆边缘型盆地向前陆盆地和陆相沉积盆地发展，在地层年代上已涉及到古生代以来的整个时期，在岩性上包括碎屑岩层序、碳酸盐岩层序以及混积岩层序。其主要的研究内容是对不同沉积环境配置下的层序模型进行详细的阐述。

二、在油气勘探与开发领域

就其所产生的巨大影响与作用，层序地层学已逐步成为油气地质勘探学家和油气地质开发学家在研究工作中不可缺少的工具。其在油气地质勘探和开发中的应用研究主要集中在以下几个方面：

（1）层序地层学的发展使沉积体系的研究进入了新阶段。层序地层学的关键问题是研究等时地层界面，并以此为基础重建沉积盆地的等时地层格架，成因上相关的一系列相和沉积体系构成了这种等时地层格架中不同级别的层序。将沉积体系纳入层序地层学研究具有如下明显优点：①将沉积体系纳入等时地层格架，能正确地对比和追踪相的横向关系，使沉积学和地层学研究成为一体。②有利于阐明整个盆地内相和沉积体系的三维配置并预测沉积体。三维配置规律的阐明有助于在油气勘探与开发中查明生、储、盖的组合关系。③层序中各种地层反射特征和关键界面的识别有助于推断沉积体系类型，预测生、储、盖组合类型。因此，层序地层学理论和沉积体系与相分析方法的结合为地层结构、沉积充填过程与沉积体系和油气的生、储、盖组合的综合研究提供了新的视点。

（2）层序地层学的发展使储层研究进入了新阶段，促进了油藏开发过程中储层非均质性的研究以确定和预测储层的分隔性。精细的储层表征和油藏描述能有效地进行储层研究，层序划分及其所确定的单元是储层研究的基础。为了研究储层的基本特征和设计包含储层固有非均质性的开发计划，主要从以下四个方面进行研究：①确定高分辨率层序地层框架内储集层的构型；②研究储层流体流动的趋势；③为了确定储集层的非均质性，研究流体流动与储层构型的关系，并研究储层的三维流动单元模型；④确定储量增加的条件，如计算体积以估算原始石油地质储量、剩余油饱和度和剩余可动油。

目前，层序地层、层次界面及流动单元分析三位一体的研究理论和方法的迅速发展，为储集层精细划分和分层次建模提供了理论依据，这对研究油藏开发过程中油藏范围内单一储集砂体及渗流屏障的分布十分有效。高分辨率层序地层学理论不仅能在油藏描述中解决高级别的层序划分问题，而且能为地层对比和成因单元填图提供框架。以 Miall 等为代表的层次

界面划分和相应结构单元分析不仅能与高级别的层序研究的方法和理论相对应，而且始终能与沉积成因分析相吻合。而流动单元则既反映了精细的储集层研究，又能紧密地将储集层中的油水运动规律结合起来。

在油藏描述过程中，将先进的地球物理技术应用于三维数据体。在每个层序内，通过地震参数（反射面几何形态、振幅、频率和连续性）和地震属性（瞬时频率、瞬时响应、瞬时相位）的分析，利用三维可视化技术，通过井间储层表征和建模技术，建立精细的储层地质模型，并对开发过程中储层性质和流体性质的动态变化特征进行监测，确定剩余油分布特征及规律。

通过以上研究，可以更好地确定和预测储层的分隔性，有效地选择完井和开发井目标，从而达到提高采收率、增加储量并降低勘探开发成本的目的。在油田开发范围内改进储集层、生油岩和盖层的预测，有效地解决储层的剩余油储量问题。

第四节 层序地层学研究的发展趋势

层序地层学的理论与方法显示了学术上的先进性和巨大的应用价值。然而，它的理论和方法也和任何新兴的学科分支一样，在它的发展过程中面临着争论和挑战。这些争论包括：关于层序地层模式的特殊性，关于全球海平面变化问题，关于不同级别层序或旋回的划分标志问题，层序地层学术语体系及其已形成规范的年代地层和岩石地层术语体系的关系问题等等，这些问题的提出和解决，必将对层序地层学的发展产生深远的影响。

（1）层序地层学模式的特殊性问题。模式的重要作用在于可以类比和借鉴，好的模式在新区工作中具有预测功能。但地质学中的任何模式都源于典型实例的总结，难免有认识上和区域上的局限性。因此在类比和借鉴的同时应充分考虑所研究对象的具体特征而不受任何已有的任何模式的束缚。由 P.P.Vail 等人建立的基本层序模式主要反映了被动大陆边缘层序地层特征，从盆地的基本结构、构造沉降和海平面变化这三个主要控制因素之间的平衡关系以及与沉积物供应有关的几个主要控制因素来说，早期的层序地层模式是非常简单的，并且最初仅来源于被动大陆边缘碎屑岩沉积。地质背景的多样性造成层序样式、沉积体系类型和配置的多样性，目前越来越多的实例显示出与之明显的差异。因此随着层序地层学的广泛开展，将会产生不同构造背景下的层序地层学模式，如前陆盆地层序地层学模式、陆相盆地层序地层学模式等。

（2）不同级别层序或旋回的划分标志问题，即不整合成因问题。地层不整合是受控于全球海平面变化，还是受控于陆地高程的变化？不同性质、不同级别的地层不整合形成了不同性质和不同级别的层序。为了有效地进行层序对比，必须搞清层序的成因机制。除海平面变化对层序的控制作用以外，还应特别注意构造作用和轨道作用力对层序成因的控制作用。

（3）不同级别层序或旋回的对比问题。层序是区域性的，还是全球性的？为了查清全球作用的影响（如全球海平面变化）与区域性作用的结果（包括各种不同类型的构造作用），首先需要回答上述问题。而回答这个问题则涉及到层序与其它地层和构造事件之间的对比标准。但是，对任一给定的地层组合来说确定其精确的地质年代是困难的。因此 Vail 的全球周期图的构成、意义及实用性值得推敲。

（4）关于全球海平面变化问题。Vail 的沉积层序模型的重点是放在将海平面升降变化当作层序结构的主要控制因素。如果将海平面升降作为主要机理，那就证明可以用层序地层来

建立全球旋回图，其假设是任何地方的一个层序记录均反映同样的全球海平面升降控制因素。

近来，大量事实日益清楚地表明，由于支持全球海平面变化曲线的许多假设是不成立的，并且用来限制这些曲线的古生物、古地磁及放射性等测年技术的精度还不足以确定已发表的三级海平面曲线的时限，结果，来自不同盆地的曲线被毫无意义地叠加在一起形成了令人质疑的全球海平面曲线。因此全球海平面变化曲线的建立与全球性对比的可行性已普遍受到人们的怀疑。

针对这些问题，一些新的研究方法正被引入到层序地层学研究中来。

(1) 沉积盆地动力学演化（即盆地形成机制）的研究正在成为盆地研究的最主要目标。通过揭示地壳与地幔对流系统的关系、与构造环境相关的盆地充填的变化和热演化等来研究地壳热作用产生的广泛的区域性地表上升、下拗和掀斜，即所谓的“动力地形”，及气候和海平面变化，并以此来探讨大陆和海洋高程改变的机制。

(2) 计算机模拟技术的发展使定量地层研究成为可能。沉积盆地模拟技术，即利用数字技术和计算机绘图技术来综合考虑不同构造背景下构造沉降、海平面变化和沉积物的影响，进行盆地充填形成机制的层序地层学分析，以此来验证真实盆地的资料。计算机功能的提高以及对物理和化学作用认识的发展，复杂的地球作用数值模拟已成为现实，因此用定量动力地层学来评价地球历史全新途径的演化也已成为可能。全球气候模拟可研究米兰柯维奇旋回（旋回地层学）。

(3) 地壳和地幔作用过程的地球物理理论研究，以搞清大陆和海洋高程改变的机制。

(4) 详细的综合地层研究，利用年代地层学评价不整合和层序界面，并结合区域构造事件和 Vail 全球周期图来进行详细的年代地层研究。由于中新生代地层相对完整，这些研究主要集中在中新生代地层中。许多研究者提出了包括物理事件、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，为层序地层学年代分析及详细的地层研究提供了新的思想。利用伽马测井方法来测定更新统及白垩系旋回沉积中的米兰柯维奇旋回，以进一步证实旋回沉积中时间的相对性和旋回的周期性这一假说。

第二章 层序地层学理论与学派

目前,有许多讨论涉及到 Exxon 的沉积层序、Galloway 的成因地层和 Cross 的陆相高分辨率层序的共性与异性。本章主要介绍这三种基本的层序地层学理论、应用方法、典型实例及它们的最新发展。

第一节 Exxon 沉积层序理论

层序地层学概念体系的形成主要源于以 Peter Vail 为代表的 Exxon 公司的研究集体。他们根据被动大陆边缘海相地层建立起来的层序地层学理论也称为 Exxon 沉积层序理论或模型。

一、层序分析的关键术语

1. 层序

层序(sequence)是层序地层学研究的基本单元。其顶、底是以不整合面及与之相对应的整合面为边界的、一套相对整一的、成因上有联系的地层单元。层序可进一步细分为体系域(system tract),体系域根据其在层序中的位置以及由海平面所限定的准层序组和准层序的堆积型式确定。因此,层序的基本组成单元是准层序和准层序组。图 2—1、图 2—2 显示了层序的基本几何特征及所定义的名词。

2. 地层终止型式与地震相分析

地层终止型式(stratigraphic terminations)的辨别是层序分析方法的关键。搞清这个问题有助于解释为什么层序地层学的发展起源于地震资料的研究。这是因为基于露头 and 钻井资料的常规盆地分析方法无法提供对地层终止方式有关的任何信息,而这些信息在地震反射横剖面上显示得十分清楚(见图 2—1)。沉积层序在地震剖面上的响应称为地震层序,地层超覆(lapout)常用于各种类型的地层终止型式的研究。

地层层序关键的几何特征是上超(onlap),它形成于沉积地层的底部,表示原始地层(水平或倾斜的)沿上倾方向依次超覆在前一个更陡的界面之上;顶超(offlap)形成于或接近于沉积地层的顶部。这些几何上的特征记录了由于基准面变化或构造沉降产生的沉积环境横向迁移(图 2—1)。当盆地边缘沉积体系逐渐向海推进时,位于海泛面之上的下超面(downlap surface)发育。这些倾斜前积性的沉积单元称为斜交沉积(clinoforms),它们超覆于下超面之上,并产生侧向前积。沉积地层遭受侵蚀后形成的侧向终止,称为削截(削蚀、侵蚀)(truncation)(见图 2—1)。

地层单元内部主要特征可以从它们对应的地震相来确定。地震相(seismic facies)是区域上被限制的、在一定范围内分布的一组地震反射单元,其内部的反射结构和外部形态明显不同于相邻的一组反射。可以用各种属性来定义这些相,如:反射结构、连续性、振幅和频率、内部速度、内部几何关系和外部三维形态。通常地震相代表了产生其反射的沉积物的

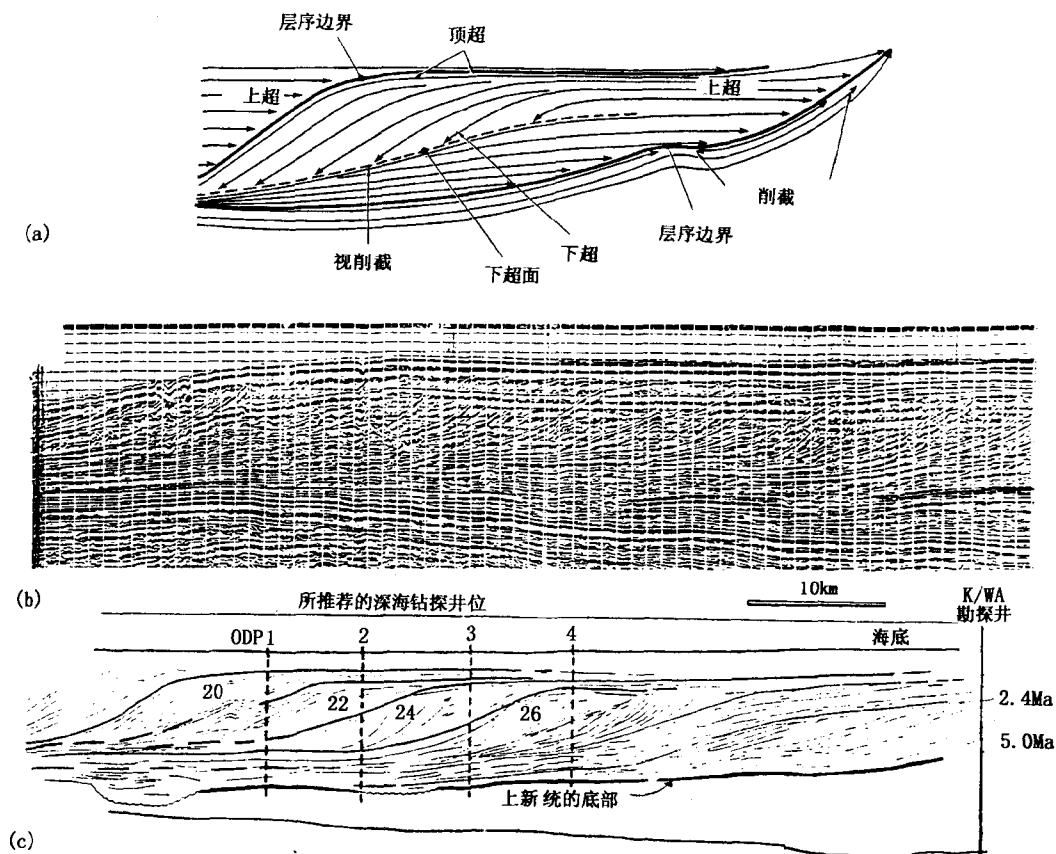


图 2—1 层序概念模式与实际地震资料的对比

(a) 以不整合为边界的层序内部的反射终止方式和不连续类型
(据 Vail, 1987); (b) 和 (c) 未经过解释和经过解释的地震测线,
表示一系列进积层序和如何选择有助于识别这些进积层序的反射终止

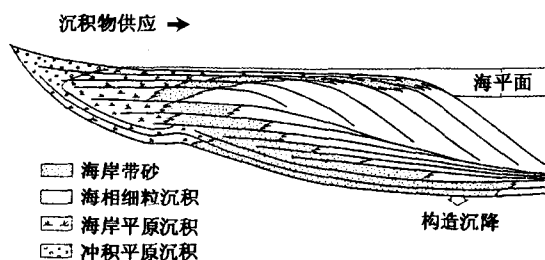


图 2—2 地震反射结构与沉积环境之
间的关系及地层层序的四个
主要控制因素 (据 Vail, 1987)

岩性组合、层理和沉积特征。因此通过研究层序内部地震相的反射属性, 可进一步分析层序的沉积环境及古地理, 重塑盆地的沉积史和构造史, 预测生、储油气带及地层、岩性圈闭。

地震相的特征可用以下四类参数来表达: (1) 几何参数: 反射结构、外形、反射连续性; (2) 物理参数: 层速度、振幅、频率、相位、极性、波形; (3) 关系参数: 地震相的平面组合关系; (4) 地质参数: 据测井确定的岩性、层位层

面属性、沉积环境、岩性指数、砂岩百分比。各参数代表意义见表 2—1 所示。