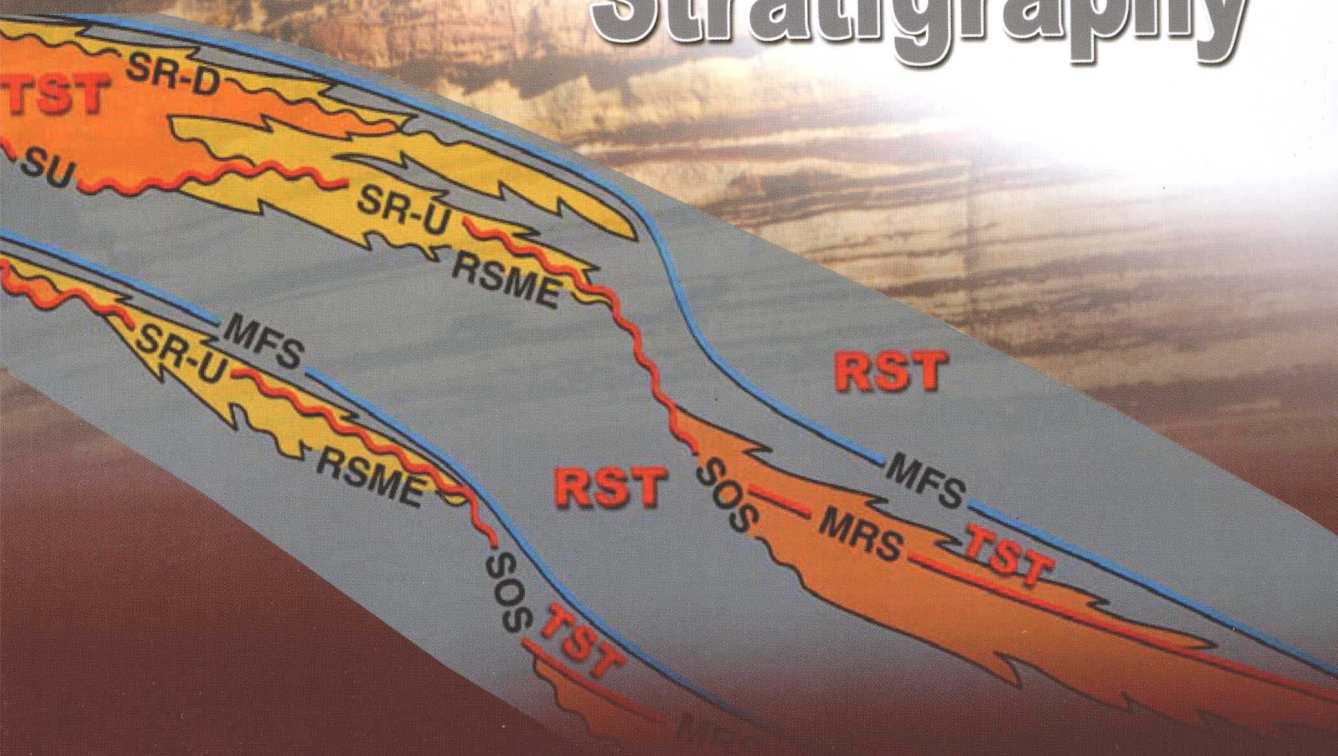


实用层序地层学

[加拿大] Ashton Embry 著
邓宏文 肖毅 王红亮 等译

Practical Sequence Stratigraphy



石油工业出版社

Practical Sequence Stratigraphy

实用层序地层学

[加拿大] Ashton Embry 著

邓宏文 肖 毅 王红亮 等译



石油工业出版社

内 容 提 要

本书总结了层序地层研究中应用的术语和方法,通过对比不同层序地层学派及理论,提供精确对比地层的可靠方法,并运用层序地层学提高各类地层圈闭油气勘探成功率。作者旨在通过系统地阐述层序地层学理论和应用中存在的问题,指出通过把地层序列置于时间格架内,层序地层研究可以在基准面变化的框架内解释沉积史和古地理演化史,从而使层序地层学研究具有可预测性。

本书适合从事地质勘探开发的研究人员和工作人员,并适应高等学校的相关专业师生。

图书在版编目(CIP)数据

实用层序地层学 / [加] 恩布里 (Embry, A.) 著; 邓宏文等译.
北京: 石油工业出版社, 2012.12

书名原文: Practical Sequence Stratigraphy

ISBN 978-7-5021-9304-1

I. 实…

II. ①恩…②邓…

III. 层序地层学—研究

IV. P539.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 236832 号

Copyright © 2009 Ashton Embry, All Rights Reserved

本文经 Dr. Ashton Embry 授权翻译出版, 中文版权归石油工业出版社所有, 侵权必究。

著作权合同登记号图字: 01-2012-8854

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.pip.cnpc.com.cn

编辑部: (010) 64253574 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 9.5

字数: 184 千字

定价: 70.00 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

译者的话

本书原著 Ashton Embry 博士为加拿大著名的层序地层学、沉积学家。他长期致力于层序地层学基础理论和应用方法的研究，1993 年在对加拿大北极圈中生界的研究中首次提出海侵—海退旋回（T—R 旋回）层序的概念和体系域划分方法。在长期的层序地层研究与实践的基础上，Ashton Embry 博士撰写了《实用层序地层学》一书，最初作为连载发表于 2008 年 5 月至 2009 年 9 月的《加拿大石油地质协会》期刊《The Reservoir》上。

在过去的 30 年里，关于层序地层学的诸多著作和论文有数千篇之多，层序地层学理论与研究方法已相当普及，特别是在油气勘探与开发领域。尽管如此，在层序地层模式和相关术语、分析方法中仍存在着诸多混乱和各种错误概念。本书在回顾层序地层学 200 多年来的发展历史和不同学派在层序地层界面选择、层序划分、实际应用中的可操作性以及存在的争议和问题等的基础上，从构建层序地层学的最基本模块——层序地层界面开始，提出了两类层序地层界面——物理界面和时间界面，以及以此为基础划分的物理界面和时间界面层序、体系域等层序地层单元，讨论了物理界面和时间界面在层序地层分级体系及地层对比中的应用和意义，并分析了构造运动和海平面变化在驱动产生层序地层界面的基准面旋回过程中的作用。书中系统地梳理了目前层序地层研究领域中的术语和分析方法，并以典型露头、岩心、测井、地震等资料绘制的精美图片详实而生动地表征和阐述了层序地层学的理论基础和各类模式，提出了层序地层学应用解决方案。本书为从事层序地层学研究和实践的科学工作者石油地质家提供了可靠的层序地层划分方法和广阔的研究思路，使等时地层格架内的地层对比更为精确。同时，作为石油地质专业书籍，本书为总体把握层序地层学概念和解决具体生产实践可能遇到的问题提供了很好的理论依据和实例分析，对于培养层序地层学专业人才，也是一本较为全面的实例集。

本书内容主要分为 6 个部分。第一部分介绍层序地层学学科的发展历史，并综合分析层序地层学不同学派的理论基础，第二部分介绍基于沉积物的层序地层界面（简称为物理界面）的定义和特征，第三部分介绍了基于模型（等时）的层序地层界面（简称为时间界面）的定义和特征，第四部分介绍基于物理界面和时间界面的不同层序地层单元（体系域和准层序等）及其划分方法和存在的问题，第五部分介绍不同级别层序地层界面和单元划分以及对比过程中存在的问题和解决方案，第六部分介绍构造运动和海平面变化对基准面旋回的控制作用以及层序地层学在石油勘探中的应用。

本书的翻译工作由中国地质大学能源学院邓宏文教授领导的层序地层学与沉积学教研组完成，其中邓宏文（第一、二、三章）、肖毅（第五、七、十一、十四章）、潘涛（第四章）、郑文波（第六章）、高晓鹏（第八章）、穆娜娜（第九章）、郭佳（第十章和插图翻译）、童川川（第十二章）、韦腾强（第十三章）和秦雁群（第十五章）等翻译了初稿，肖毅博士和邓宏文教授对初稿进行了审校，定稿由邓宏文教授、肖毅博士和王红亮副教授负责完成。

本书在翻译的全过程中，得到了原著作者 Ashton Embry 博士的直接指导。石油工业出版社的同仁对本书的出版给予了支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢！

由于水平有限，译文中不足之处，恳请读者批评指正。

邓宏文

2012 年 8 月 26 日

致 谢

首先，我要感谢现代地层学的创始者 Hollis Hedberg 先生所作的重大贡献。他在 40 年间（20 世纪 30 年代末期至 20 世纪 70 年代末期）确定了地层学分类和术语的指导原则，所提出的思想和告诫，即使在今天看来也都是意义重大的。

我还要感谢 CSPG 《The Reservoir》期刊的编辑 Ben McKenzie 先生，他鼓励我撰写了这本层序地层学论文集，而且对其中的每篇文章都进行了详细的编辑。他对这本论文集的出版也作出了杰出的贡献。

我还要感谢 CSPG 公关协调人 Heather Tyminski 先生，他关心每篇文章的版面设计，并总是能够对咨询提出良好的建议。

在过去的 40 年中，我曾和很多研究者一起讨论过层序地层学中的诸多概念，在此对他们表示感谢。尤其要感谢挪威国家石油公司 (Statoil Hydro) 的 Erik Johannessen 和卡尔加里大学的 Benoit Beauchamp，当我懈怠时他们总是督促和鼓励我去完成这项工作。本论文集集中的许多概念是与他们交谈和争论的结果。

我还要感谢我就职的加拿大地质调查所培养和资助了我的研究工作，并允许我发表这些论文。我还要感谢我的同事 Dave Sargent，他不但熟练地绘制了所有的图件，而且还对许多图件的设计作出了改进。

本书作者：Ashton Embry 博士

目 录

1 绪论	1
2 层序地层学发展史：前 200 年（1788—1988）.....	4
3 层序地层学发展史：近 20 年（1988—2008）	10
4 层序地层学物理界面（Ⅰ）：陆上不整合面和海退冲刷面	17
5 层序地层学物理界面（Ⅱ）：滨岸海蚀面和最大海退面	24
6 层序地层学物理界面（Ⅲ）：最大海泛面和陆坡上超面	33
7 层序地层物理界面的基准面变化模型	41
8 层序地层学时间界面	51
9 层序地层学单元（Ⅰ）：基于物理界面界定的层序	59
10 层序地层学单元（Ⅱ）：基于时间界面界定的沉积层序	69
11 层序地层学单元（Ⅲ）：体系域	75
12 层序地层学单元（Ⅳ）：准层序	84
13 层序地层学级别系统.....	91
14 地层对比.....	100
15 基准面变化的控制因素及在油气勘探中的应用.....	111
词汇表.....	121
参考文献.....	133

绪论

本章是我热爱的学科之一《层序地层学》论文集的开篇。我之所以将该论文集称为“实用层序地层学”，是因为我着重强调了这一学科的可应用性，而不是详述其理论模式。本论文集集中的每一章包含一个主题，我相信，在坚持阅读完所有文章后，读者将会对层序地层学是什么以及“如何用于寻找石油”有一个清晰的理解。

在过去的 30 年里，有几十本著作和数千篇论文都是关于层序地层学的。层序地层学成为沉积盆地内建立对比格架最常用的地层学学科，这主要是由于它在岩心和露头数据上、在测井及地震上都具有易用性，而且更重要的是它的成本很低。尽管层序地层学已经如此普及，但其分析方法和术语（如层序单元的定义）中仍存在诸多混乱和各种各样的错误概念。这是十分遗憾的，因为层序地层学可以为相分析和沉积盆地古地理演化和沉积史解释提供很好的基础。

我之所以致力于推进层序地层学研究方法，是因为我发现无法应用 20 年前 Exxon 科学家提出的有关方法和术语。作为加拿大地质调查所的一名地层学工作者，我的主要工作是对加拿大北极群岛中生界沉积序列进行描述和解释。层序地层分析是这些研究工作的核心部分，但令人沮丧的是，我无法在研究中严谨地使用 Exxon 科学家提出的方法与术语。此外，当我仔细查阅有关文献，以了解其他研究者是如何应用 Exxon 方法时，我发现所有这些应用不是有问题，就是没有真正使用 Exxon 的方法。这就促使我去发展一些能够被客观地应用的层序地层学方法和术语，而且要求这些方法和术语能够在各种地质背景下应用，不管是露头还是地下，不管是未受构造影响的盆地充填序列还是那些因受到构造影响而只留下片段地层记录的区域。最后，要求所提出的层序地层学方法和术语能够应用于露头、由岩屑或岩心标定过的测井曲线和地震数据也是很关键的。在上述工作过程中，我得到了加拿大地质调查所的同事们特别是 Benoit Beauchamp 和 Jim Dixon 的帮助。他们在将层序地层学应用到区域地层序列的过程中遇到了与我同样的问题。在挪威国家石油公司 (Statoil Hydro) 工作的 Erik Johannessen 也给了我极大的帮助以及意见反馈，他从石油勘探家的角度看到了 Exxon 公司所提出的层序地层学中存在的问题。

本书将总结我和我的同事们在层序地层研究中认为最有用的层序地层学术语和方法。我们的方法具有很多与 Exxon 相一致的特点，但也有很大区别。我相信，如果能够被正确地使用，层序地层学将是一种进行精确地层对比的可靠方法。而精确的地层对比横剖面是油气勘探中寻找地层圈闭最基础的工作，因此，运用层序地层学能够提高各类地层圈闭油气勘探的成功率。层序地层研究是把地层序列置于等时格架内，由此可以在基准面变化的框架内解释沉积史和古地理演化史，其结论使得层序地层学研究具有可预测性。

下面，我将讨论为什么将层序地层学视为一门独立的地层学科，而不是一个涵盖各种来源资料的大杂烩。

地层学与地层学科

地层学是研究遵循 Steno 叠置法则（新地层上覆在老地层之上）的层状岩石的科学。叠置法则区分地层单元和界面的相对时间顺序，并通过对不同位置的地层单元和界面进行对比，从而建立全球范围内的地层的相对时间顺序。地层学包括对地层的物理、生物和化学性质的识别与解释，并根据这些性质的垂向变化定义一系列的地层界面和单元。

不同的地层学科根据不同的特定性质进行地层单元的定义、描述和解释。根据地层特定性质的垂向变化可以识别和划分地层界面，并利用这些界面来确定地层单元的边界及进行地层对比。自 William Smith 时代以来，岩性地层学（岩性变化）和生物地层学（化石的变化）统治了地层分析。然而在过去的 50 年中，对地层的其他特征的研究催生了新的地层学科，这些新学科均有各自的地层单元和界面体系。被正式接纳的新地层学学科包括磁性地层学（磁性的变化）、化学地层学（化学性质的变化）和层序地层学（沉积趋势的变化）。

每一门地层学科都是通过对比不同地点之间地层某种特定属性来确定地层单元的边界。地层岩石的属性通常可以在很大范围内变化，由此可以通过对比定义多个区域性地层单元。另外，确定地层序列中不同单元的年代关系是很有用的。为此，需要评价通过对比得出的地层边界之间的时间关系。每个地层界面都代表在某个不连续的时间间隔内发生的一幕变化，因此在其延续范围内均有不同程度的穿时性。要进行等时地层分析，即把所研究的地层置于时间地层格架内，必须分析每一个对比边界的等时性，即与真正等时边界的接近程度。

低穿时性的地层界面，即在短时间内形成的界面，是我们能够获得的最具等时性的界面，对于构建地层横剖面 and 等时地层格架最有用。这样的界面通常是通过生物地层学来确定，而不是通过岩性地层学确定（如斑脱岩）。近些年来，磁性地层学和化学地层学也被用来建立近似的等时地层格架。在石油地质中，应用磁性地层

学和化学地层学分析方法的主要问题是耗时长、费用昂贵，而且分析人员需要经过特殊训练。另外，这些方法需要取自露头或岩心的样品，而这些在绝大多数地下地质研究中常常是不具备的。所有这些因素都极大地限制了磁性地层学和化学地层学分析方法在石油勘探中的应用。正如下面将要谈到的，层序地层学则没有这些缺陷和限制条件，所以可以用于建立近似的等时地层格架。

在层序地层学中，用来定义和划分层序地层界面，并使层序地层学成为一门独特的地层学学科的、可以识别的地层属性变化是沉积趋势变化。沉积趋势变化的实例包括：从沉积作用转变为侵蚀作用或饥饿沉积作用，或者相反；从向上变粗转变为向上变细，或者相反；从向上变浅转变为向上变深，或者相反。这些沉积趋势变化是以客观的观察和解释为基础的，是定义特定层序地层界面的主要依据。向上变粗转变为向上变细和向上变浅转变为向上变深这两种沉积趋势变化常用来解释从海退到海侵的变化趋势，反之则解释从海侵到海退的变化趋势。在层序地层学中有时也从沉积趋势变化中解读出基准面的变化，基准面从下降转变为上升，或者相反，但正如下面将要指出的，这种解读并不是在任何资料中都能够实现的。

这种沉积趋势的变化被用来定义和划分某种特定类型的层序地层界面（如从沉积作用转变为陆上剥蚀作用可以用来定义和划分陆上不整合面），反过来，所定义和划分的界面又可以用来进行地层对比和定义特定的层序地层单元（如层序）。

因此，我们可以认为层序地层学包括：

- (1) 识别和对比反映岩石记录中沉积趋势变化的地层界面；
- (2) 描述和解释以这些界面为边界的相应的成因地层单元。

每个层序地层界面都具备多个物理特征，通过以下两方面进行识别：

- (1) 界面本身的以及界面上下地层的沉积学标志；
- (2) 界面与其上下地层之间的几何关系。

因此，用于层序地层分析的基础资料类型必须要求能够进行合理的相序解释和确定地层几何形态。来自其他地层学科（如生物地层学和化学地层学）的数据也有助于界面识别（如帮助确定地层几何形态），但却不能用于描述界面特征。

对每一门地层学科而言，具备坚实的理论基础，把各种地层界面的形成与地球上所发生的现象联系起来是有用的，但这不是绝对必要的。例如，在生物地层学中，界面代表着化石种类和含量的变化，而这种变化主要是由于沉积环境变迁和生物演化的相互作用造成的。应注意到的是，生物地层学早在进化论产生之前就已经繁荣昌盛了。在有理论对其进行解释之前，绝大多数层序地层界面都已从地层岩石记录中被识别出来，并用于地层对比。最终，这些层序地层界面的成因被假设为沉积作用与基准面相对变化之间的相互作用造成的。目前，这一理论模式已经被广泛地接受。在下一章中笔者将从经验观察和理论基础两方面来回顾一下层序地层学的发展历史。

层序地层学发展史：

前 200 年（1788—1988）

在第一章中，我强调了层序地层学是诸多的地层学科之一，每门地层学科都有其用于对比和确定地层单元的特定的地层界面。我定义层序地层学为：（1）识别和对比岩石记录中沉积趋势变化的地层界面；（2）对以这些界面为边界的成因地层单元进行描述和解释。上述层序地层学的理解和简洁定义是在该学科经历了长时间和曲折的发展后才获得的。

在本章和下一章中，我将回顾层序地层学的发展历史。从首次识别出层序地层界面到今天，层序地层学已经成为一门相当综合的地层学科，但还存在着对界面缺乏理论上的认识、术语过于复杂和工作方法等问题。

早期研究

从 18 世纪晚期现代地质学的创始者 James Hutton 首先认识到不整合是一种特殊类型的地层界面，代表着重大的时间间断开始，层序地层学就已经开始了它的缓慢发展历程。也就是从那时起，不整合面就被作为十分有用的地层界面用于地层对比、划分地层单元和进行地史分析。因为不整合面反映了沉积趋势变化，因而成为层序地层学中最常用的界面之一。由此可以说，从 Hutton 定义不整合面时起层序地层学就已经诞生了。

在 19 世纪就存在关于不整合面成因的争论，即不整合面是由于构造运动导致地表上升造成的还是海平面下降造成的。19 世纪末，研究者已经普遍认为不整合面产生于构造运动，代表着一幕地壳运动，因此是进行全球地层对比的关键。在 20 世纪最初的 20 年，已经认识到与不整合面有关的几种重要的地层接触关系。Grabau（1906）描述了不整合面之下地层的削截和其上地层的超覆现象。Barrell（1917）在提出基准面的概念的同时，首次提出的层序地层发育模式中定义的基准面是一个抽象面，它限制了地表沉积作用的最大限度，并提出基准面升降旋回在地

层记录中所产生的多个不整合。值得注意的是，Barrell 还定义了沉积间断的概念，与不整合相比，沉积间断代表了地层记录中可以忽略的沉积间隔。令人遗憾的是，Barrell 在发表关于基准面和不整合的文章后不久，就因感染流感而病倒，他的超越时代的不整合面概念因此就被搁置了很长时间。

20 世纪 30 年代，以不整合面为界的小规模地层单元在美国中部石炭系中被识别出来，Weller 等称之为旋回层（Weller, 1930；Wanless and Shepard 1936）。我们现在知道这些旋回的形成与冈瓦纳冰川周期性消长导致的海平面升降有关，然而当时曾对其是构造运动成因还是海平面升降成因而进行了激烈争论。

Sloss 和 Wheeler

早在 60 多年前，当 Sloss 等（1949）用层序这个术语来命名遍布北美大陆大部分地区的以大型区域不整合为界的大规模地层单元时，层序地层学就作为一个特殊的地层学科诞生了。Krumbein 和 Sloss（1951）进一步把层序定义为大型构造旋回。直到 20 世纪 60 年代早期，Sloss（1963）充分发展了层序的概念，并命名了六个在北美大陆发育的层序。Sloss（1963）把这些以不整合面为界的层序解释为由北美大陆范围内的幕式构造隆升运动造成的。

在 Sloss 等（1949）提出了层序的概念之后，Wheeler 发表了一系列文章（Wheeler 和 Murray, 1957；Wheeler 1958, 1959, 1964a, 1964b），阐述了不整合面发育及构成的层序的理论基础。与 Barrell（1917）的相似，在 Wheeler 的模式中主要参数是沉积物供给与基准面上升与下降（基准面穿越旋回）。Wheeler（1958, 1959）用诸多研究实例证明以不整合面为边界的层序模式的正确性。在他所给出的大多数实例中，识别出的不整合面较 Sloss（1963）提出的遍布大陆范围的不整合面的规模要小，而且许多不整合面向盆地方向消失（Wheeler, 1958, 1959）。正如 Wheeler（1958, Fig.3）所说明的那样，以不整合面为边界的层序在不整合面消失的部位将变得不可识别的。因此对 Wheeler（1958）而言，层序是完全以不整合面为边界的地层单元。

把层序定义为完全以不整合面为边界的地层单元，其结果意味着大多数层序仅出现在地层间断普遍存在且易于识别的盆地边缘地带。如此定义所产生的问题是，由于不整合面沿沉积走向上分布不稳定，向盆地方向也会不发育，那么每在不整合面出现的地方就需要识别和命名新的层序（图 2.1）。另外，以不整合面为边界的层序对于地层记录中不发育沉积间断或间断不明显的近盆地中心地层的划分几乎没有帮助。

总之，到 20 世纪 60 年代中期，层序地层分析主要有两种不同的方法，即来自资料的经验主义，如 Sloss（1963）的工作；另外一种则是理论推断法，如 Wheeler

(1958)所使用的。很明显,这两种方法的相似之处在于都把层序定义为以基准面下降(构造隆升或海平面下降)形成的陆上不整合面为边界的地层单元。

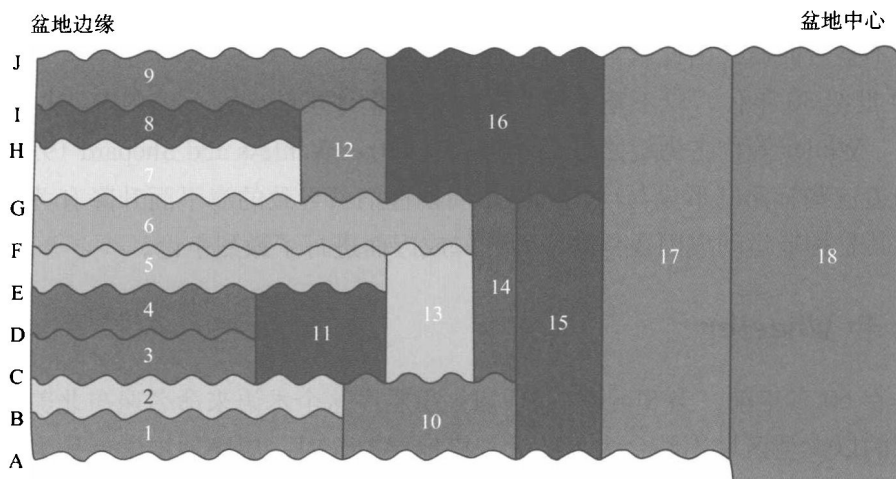


图 2.1 以盆地边缘发育的十个不整合面为边界
可以划分出 9 个以不整合面为边界的层序

由于不同的不整合面向盆地中心延伸的范围不同,在每一个不整合面消失的地方都需要定义一系列“仅以不整合面为边界”的层序,由此造成层序命名的混乱以及不能对大部分盆地地区域进行细分。这就导致了 Wheeler (1958) 提出的“仅以不整合面为边界”的层序未能被广泛接受

随着堪萨斯州地质调查局第 169 期 (Merriam, 1964) 对旋回沉积作用以及不整合概念发展的总结性文章发表后,也就是 20 世纪 60 年代中期,层序地层学的前期发展告一段落。此后,由于沉积地质学研究转向过程沉积学和相模式,对层序地层学的兴趣逐渐消退。20 世纪 70 年代中期,又有一些新的概念出现: Frazier (1974) 把以海洋饥饿作用面(即现在的最大海泛面)为界的地层单元命名为沉积复合体; Chang (1976) 仿照 Sloss 等 (1949) 的作法,把层序重新命名为“构造层”。但是,直到 Exxon 的研究者发表革命性的概念以及分析方法之前,这些新概念没有被接受,层序地层学一直处于搁置和停滞不前状态。

Peter Vail 与地震资料

随着 1977 年 AAPG 第 26 期关于地震地层学论文集的发表,研究者对层序地层学的兴趣才在再度兴起 (Payton, 1977)。在 AAPG 这篇具有分水岭意义的论文集中, Peter Vail 和他的同事们用区域地震剖面作为原始资料基础,说明了沉积记录是由一系列主要以不整合面为边界的地层单元所组成 (Vail 等, 1977)。这一认识又被一些合理的假设所完善,如许多地震反射轴平行于地层面,不整合面与削截、顶超、上超或下超的地震反射轴重合。从本质来说, Vail 等 (1977) 是通过运用地震资料所反映的地层的几何关系来识别不整合面的。

诸多 Exxon 的研究人员,包括 Peter Vail 在内,都曾是 Larry Sloss 的研究生,

因此他们把由地震资料确定的、与不整合面有关的地层单元命名为“沉积层序”就足为奇了。在盆地边缘，层序的边界反射是以对下伏地层的削截和上覆地层的上超为特征，与 Sloss 等（1949）和 Wheeler（1958）的定义层序边界的不整合面（即不整合主要是由于陆上剥蚀作用造成的）概念相似。最重要的是要注意到，在盆缘地带包络着削截不整合的地震反射轴可以被追踪到盆地中心地带，并表现为不同的反射特征，但是没有缺失，被称为与层序边界可对比的整合部分。更普遍的情况是，上述代表层序边界可对比的整合部分的地震反射轴因发育海相上超或下超而具不整合关系。因此，在地震剖面上划分出的层序边界似乎具有复合边界的特征，即在盆地边缘以削截不整合为特征，在更靠近盆地中心部位则以海相不整合和可对比整合为特征（图 2.2）。以此观察为基础，Mitchum 等（1977）提出了层序的新定义，即层序是“一个顶底以不整合面或可对比整合面为界的、相对整一的地层序列组成的地层单元”。

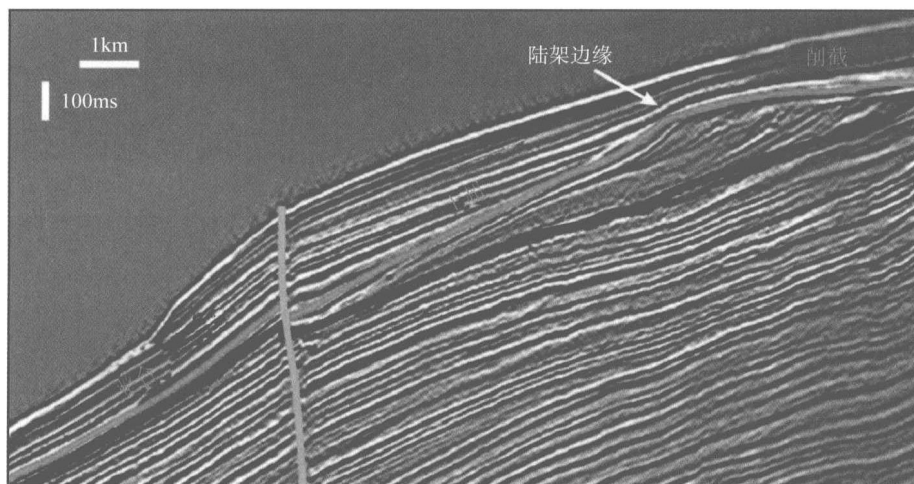


图 2.2 地震划分出的层序

在其边界（红色线）上地层具有不同的接触关系，反映了层序边界是由不同的界面组合而成的。在盆地边缘，层序边界以削截为特征，向盆地中心方向发育海相上超，而在盆地中心则是可对比的整合面。地震线来自墨西哥湾 Desoto 峡谷区第四系沉积序列（修改自 Posamentier, 2003）

这一新的层序定义对层序地层学来说是意义重大的变革。有了这个层序定义，就可以对盆地的地层序列进行层序划分，而所划分出的层序在整个盆地或盆地的绝大部分区域都是能够识别的（图 2.3）。如此，不仅解决了 Sloss（1963）和 Wheeler（1958）的“仅以不整合面为边界”的层序不被接受的问题，而且也给层序地层学注入了新的生机。

总之，Exxon 的地震资料清楚地表明层序边界是区域地层对比的关键界面，层序是描述和解释沉积史最为实用的地层细分单元。Vail 等（1977）的层序边界概念中最具创新性的一点是，层序界面是由不同类型地层界面复合而成，而不只是由某种单一类型的界面构成。正是由于层序边界的这种复合特征使得层序可以在盆地

的很大范围内进行对比，也是层序边界在对比中具有重要作用的关键。这种通过地震划分的复合层序边界有一个问题，就是不能确定构成复合层序边界的各个界面的特定类型。这种不确定性主要是由于在 Vail 等的时代用来进行研究工作地震资料垂向分辨率较低造成的。在绝大多数情况中，单个反射轴所代表的地层厚度是 20 ~ 30m，因此地震资料不能分辨必要的细节，无法对产生地震剖面上代表层序边界的反射轴的地层界面的类型进行可靠识别。根据地震剖面中的削截 / 上超关系可以合理地得出，在盆地边缘陆上不整合面构成了层序边界。然而，是何种类型的地层界面产生了地震剖面上盆地中心区域的海相不整合面及可对比整合面却是很难确定的。而且，在某些情况下，例如“下超面”或顶超不整合时，地震剖面上的不整合（反射轴视削截）是真正的不整合，还是由于地震分辨率低（地层合并而不是终止）造成的假象也是很难说的。即使在今天，构成层序边界的地层界面的特定类型的不确定性仍然是存在的主要问题。

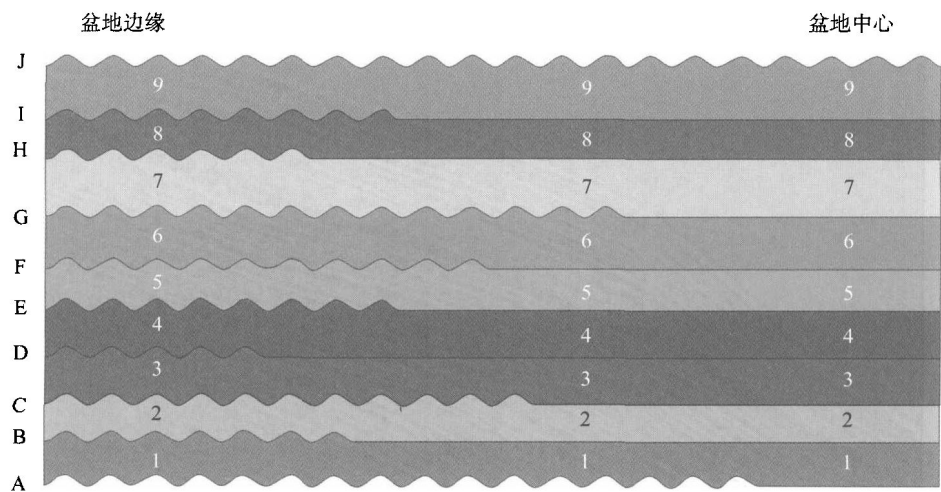


图 2.3 盆地侧翼存在的十个不整合，界定九个沉积层序
用 Mitchum 等（1977）补充的“可对比的整合面”可以确定层序边界，
这九个层序能够延伸整个盆地。这就解决了“仅以不整合为界”的层序术语
存在的弊病和在盆地中心部位层序无法划分的问题

基准面上升

除了提出了新的层序划分方法和定义之外，Vail 等（1977）还将在全球许多地区地震剖面中识别出的层序边界解释为主要是由于海平面变化造成的。这一解释明显与 Sloss（1963）的不同，后者总是强调构造运动是层序边界形成的主要控制因素。如前所述，关于不整合的成因是构造成因还是海平面变化成因的争论，从 20 世纪初开始，一直到现在从未停止过。重要的是，把层序的产生归因于海平面变化，产生了新的层序成因解释模式，即把稳定沉积物供给速率情况下的海平面的正弦曲线

变化与向盆地方向增加的构造沉降速率相结合起来的层序成因模式。这个模式再现了在地震剖面上观察到的诸多地层接触关系，如盆地边缘的削截不整合和盆地中心具有下超特征的凝缩层。正因为如此，Exxon 的科学家们推崇该模式，使其成为随后的层序地层学分水岭性质文章的核心部分（Wilgus 等，1988）。这些文章本身、这些文章所提倡的模式及对模式作出的解释，构成了层序地层学新术语与分析方法的基础，使这些新术语和方法能够在钻井、测井、露头以及地震资料中使用。在下一章中，我将讨论这一具有变革意义的模式是如何把层序地层学从进行低分辨率的地震资料对比提升到高分辨率的钻井、测井和露头剖面地层解释的。我还要讨论 20 多年来 Exxon 层序模式的所有术语和争议，以及新的可选层序模式和分析方法。

层序地层学发展史：

近 20 年（1988—2008）

前一章我回顾了用来进行地层对比、编图和沉积演化史解释的地层学分支学科——层序地层学前 200 年的发展史（1788—1988）。到 1988 年之前，层序的定义已经被修改为“以不整合面或可对比整合面为边界的地层单元”（Mitchum 等，1977）。由于该定义主要来自于对地震资料的观察与解释，所以其对于构成层序边界的地层界面的类型，尤其是可对比整合面的类型还存在着相当大程度的概念混乱。但这个问题在 1988 年之后就被真正地解决了。

Exxon 层序地层模式

1988 年，Exxon 研究者发表了一系列文章，首次描述了综合的层序地层模式。这些刊登在 SEPM 专刊第 42 期《海平面升降变化：综合分析方法》（Wilgus 等，1988）中的文章提出了 Exxon 学派的层序地层方法、模式、分类体系和术语。这些文章清晰地表明 Exxon 的科学家是如何从盆地边缘向盆地中心对层序边界进行识别和对比的。Exxon 的工作结合了理论模拟和实际地震记录、测井横剖面和露头的观察。

Mac Jervey（1988）提出了一个关于层序发育的定量化理论模型，在很大程度上发展了 Barrell（1917）和 Wheeler（1958）提出的关于沉积作用与基准面变化之间的相互作用的某些概念。Jervey 的模型运用了是正弦曲线变化的基准面、向盆地方向增加的构造沉降和稳定的沉积物供给这三者作为模型的输入参数，预测了在基准面上升与下降旋回期间（Jervey，1988），三个不同的沉积单元依次发育，构成了一个完整的层序。这三个沉积单元依次为：形成于缓慢基准面上升初期的顶部进积（海退）单元、形成于快速基准面上升期的中部退积（海侵）单元和形成于基准面上升开始变缓慢及随后下降期的上部进积（海退）单元。