

中国地质大学(武汉)研究生课程与教材建设基金
中国地质大学(武汉)学术出版基金
湖北省杰出青年基金

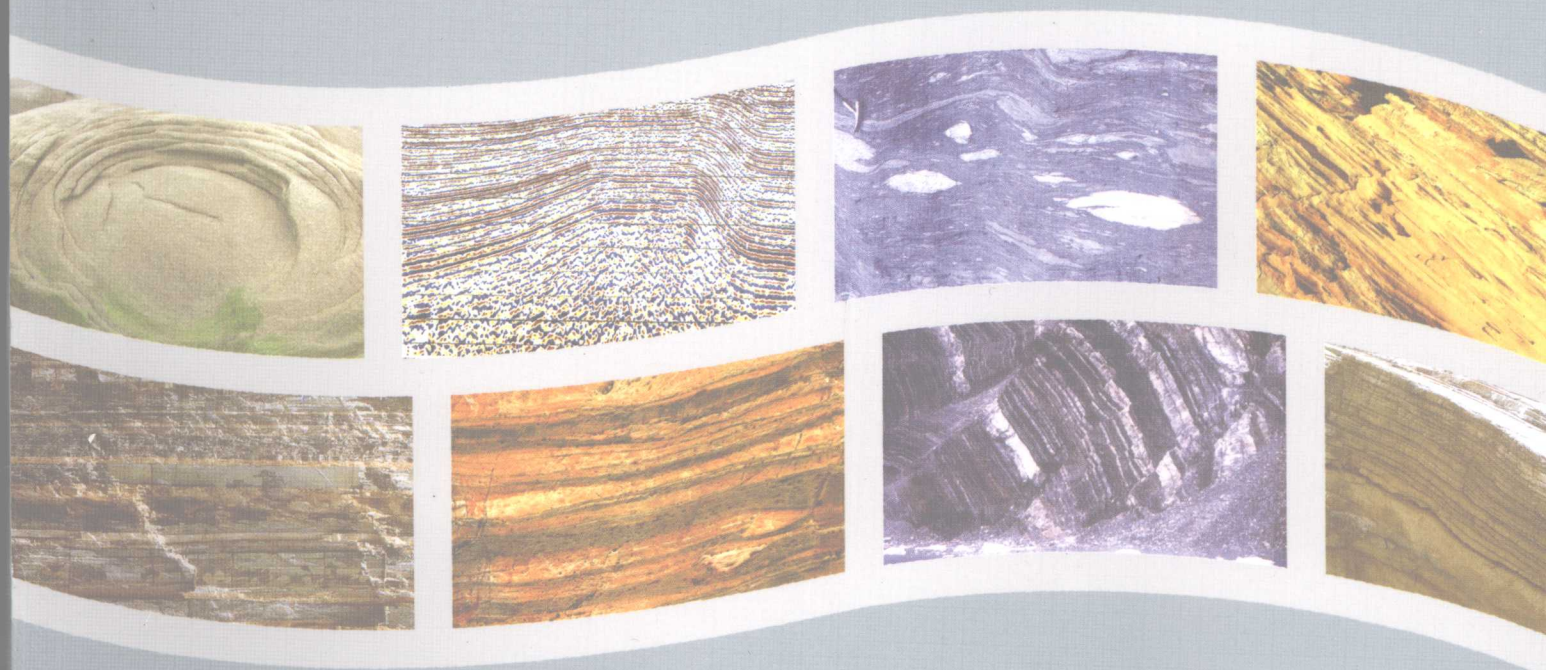
联合资助

中国地质大学(武汉)研究生系列教材

层序地层学 基本原理、方法与应用

CENGXUDICENGXUE JIBEN YUANLI FANGFA YU YINGYONG

主编 王 华



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

中国地质大学(武汉)研究生课程与教材建设基金

中国地质大学(武汉)学术出版基金

湖北省杰出青年基金

联合资助

层序地层学基本原理、方法与应用

主 编 王 华

副主编 陆永潮 任建业 王家豪

编 委 王龙樟 石万忠 焦养泉

解习农 庄新国 刘晓峰

肖 军 廖远涛 陈 平

聂逢君 甘华军

中国地质大学出版社

内容提要

本书着重介绍了层序地层学的基本原理和方法,并偏重于在含能源盆地以及油气资源勘查领域的应用实践与综合分析。全书共分13章,内容包括层序地层学历史、现状与研究内容体系和方法技术系列,层序及其构成样式以及层序形成的控制因素及其综合效应,单井层序地层学,地震(剖面)层序地层学,陆相盆地层序构成特征,构造坡折带类型及层序构成样式,野外露头层序地层学研究,碳酸盐岩层序地层学研究,层序地层学中的地球物理方法与技术系列、编图系列,最后结合实例论述了层序地层学在能源资源勘查中的应用。

本书是笔者们长期在该领域开展科学研究、国际合作与学术交流以及研究生、本科生教学工作的成果,并结合国内外最新的相关论著和研究成果而编著的。适用于基础地质、矿产地质、能源地质有关的研究生阅读和学习,同时也适合于这些领域的教学和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

层序地层学基本原理、方法与应用/王华主编. —武汉:中国地质大学出版社,2008.5

ISBN 978-7-5625-2214-0

- I. 层…
- II. 王…
- III. 地层层序-地层学
- IV. P539.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 038860 号

层序地层学基本原理、方法与应用

王 华 主编

责任编辑:张晓红 刘桂涛

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路388号)

邮政编码:430074

电话:(027)67883580 传真:67883580

E-mail: cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

http://www.cugp.cn

开本:880毫米×1230毫米 1/16

字数:808千字 印张:25.625

版次:2008年5月第1版

印次:2008年5月第1次印刷

印刷:武汉中远印务有限公司

印数:1—3 000册

ISBN 978-7-5625-2214-0

定价:78.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

“研究生系列教材”总序

在中国地质大学研究生院建院二十周年来临之际,第一批反映我校研究生教学与科学研究成果的“研究生系列教材”出版了,这是我校研究生教育发展过程中的一件大事,可喜可贺!

随着我校研究生招生规模的不断扩大,如何保证研究生的培养质量是我们必须积极思考并努力着手解决的问题。这套研究生系列教材的及时出版,正是一个很有力的举措。研究生教材建设是保证和提高研究生培养质量的重要手段,是反映一个学校教师队伍的学术水平和教学水平的宏观尺度,更是具有战略性意义的基本建设。各门课程必须有高质量的教材,才能使研究生通过学习,掌握各门学科的坚实的基础理论和系统的专门知识,为从事科学研究工作打下良好的基础。因此,我校研究生院筹集资金设立了“研究生教材建设基金”,资助出版“研究生系列教材”以满足本校各学科研究生教学的需要,促进我校研究生教材建设工作,提高研究生培养质量。

由于研究生具有人才的高层次性、培养的超前性和学习的研究性等特点,这就要求研究生教材并不是本科生教材的简单深化和延续,而应该结合学校的学科专业结构和特色来编写系统性、新颖性、适用性融为一体的研究生教材。这套“研究生系列教材”以具有我校特色的研究生课程教材为主,既有基础理论教材,又有研究生专业课教材,准备在今后数年内分批次出版。“研究生系列教材”总的特色是从我校研究生的教学实际需要出发,根据各门课程在各专业研究生培养中的地位 and 作用,在内容上求新、求深、求精。专业课程教材还要力求高起点,反映科学规律,追踪该学科专业的发展前沿,反映国内外的最新研究成果。

虽然,我们的主观愿望是尽可能组织编写出一套特色鲜明、适用性强的质量“研究生系列教材”,但由于我校研究生教材建设工作起步不久,经验不足,已出版的教材质量尚待在使用中检验,敬请校内外专家学者及读者不吝指教,我们将非常感谢。

姚书振

中国地质大学(武汉)研究生院 院长

2005年5月20日

前 言

当代层序地层学是在石油勘探中形成并在石油勘探中取得了重大成功(Wilgus *et al.*, 1988; van Wagoner, 1990, 1995; Haq, 1987; Weimer, Posamentier, 1994)。层序地层学的勘探效益在于预测隐蔽圈闭,国际上大多数油公司已把层序地层学当作一种十分重要、具有很强预测功能的技术手段加以应用。

20世纪90年代末期以来,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来提高层序地层分析的正确性和储层预测的准确性,层序地层学正是为适应这一需求而产生的。层序地层学是随着方法体系的改进、勘探技术手段的进步、仪器设备分辨率的提高等而普遍开展的向高精度方向发展的层序地层学。近年来大量的研究实例表明,集高分辨率数据应用、高频层序单元分析、高精度储层研究和坡折带理论于一体的层序地层学可有效地应用于地下地质的研究,为精细的地层对比、沉积体系和沉积相、储层特征以及其他成藏条件的研究提供了有效的分析方法和预测工具,引起了国际石油地质界专家和学者们的重视(Posamentier, 1996, 1999; Eschard *et al.*, 1998; Herbert, 1999; 李思田, 2000; Gerald *et al.*, 2001; Janok *et al.*, 2001; Stephen, 2001)。

层序地层学是以层序地层单元边界的识别为起点来开展工作的,通过野外露头、钻井岩心、测井、古生物、地球化学和高分辨地震资料的宏观和微观的综合分析,建立研究区不同级别的等时地层格架。在构建的等时地层格架内进行地层岩性等隐蔽圈闭分布特征和成藏模式的研究和预测是有效而可行的。因为,①以不整合间断面和与之相对应的整合面划分地层单元在油气勘探中的实用性和重要性。高精度层序地层学分析的基本单位是三级层序,它是以不整合面或与之相对应的整合面为边界的。利用高分辨率的地震反射剖面,根据地震反射削截、上超等终止特征较易发现不整合面以至微角度不整合面。这些界面划分出的等时地层单元具有很好的合理性,并易于全盆追索。此外,盆地或凹陷中的多数不整合间断面及其附近的沉积体具有良好的油气输导和储集功能,能形成有利的油气成藏配置,如南非南部海域勘探中最大的油藏与二级层序界面上的盆底扇有关,这表明较大的间断对油气聚集更为重要(Brown 等, 1995)。②在建立层序地层格架的基础上能最有效地分析生、储、盖的分布规律,预测隐蔽圈闭的存在。生、储、盖的分布和所构成的油气成藏组合是在地层等时对比的基础上认识和建立的。层序地层格架基于等时物理界面的识别和追索,是客观存在的易于识别和使用的标志。这种方法不受生物地层研究中争论的影响,在化石带不具高

分辨定年能力时也同样可找到区域性物理界面。实践表明,一旦建立了适合区域的层序构成模式,就有明显的预测功能,特别是在低位体系域中预测浊积扇体和下切谷砂体(IVF)所取得的巨大成功。目前我国东部许多盆地或凹陷已进入到以找寻地层岩性等隐蔽圈闭为主要方向的找油气阶段(如大庆油田、胜利油田近十余年在隐蔽油气藏勘探领域取得了巨大成就),系统地应用层序地层学的方法将是解决这一重大任务的一个最重要、最基本的技术。

③用高精度层序地层学理论和方法可以描述成藏要素。高精度层序地层学所划分的层序、体系域及其相应的层序界面和体系域界面已经成为烃源岩、储层、盖层和上覆岩层等成藏要素研究中的主要内容。等时层序地层格架的建立更为圈闭的形成和油气运聚过程的研究提供了重要的地层对比与沉积演化资料。同时,高精度层序地层学在近十年来的广泛实践中表明:其不仅可以在海相、海陆交互的盆地或凹陷中得到很好的应用,而且在相变复杂的陆相盆地中同样也能成为等时地层格架建立和隐蔽圈闭预测的有效手段(如渤海湾盆地、北部湾盆地等),因此被 Exxon、Mobile、Arco 等国际知名油公司誉为“权威性的找油工具”。

该教材的编写分工是:前言、第一章(层序地层学产生背景、基本概念体系与研究进展)由王华、陆永潮、聂逢君、王家豪执笔,第二章(层序地层学研究内容与方法系列)由王华、陆永潮执笔,第三章(层序及其构成样式)由陆永潮、王华执笔,第四章(层序形成的控制因素及其综合效应分析)由王龙樟、肖军、廖远涛执笔,第五章(单井层序地层学)由陆永潮、陈平执笔,第六章[地震(剖面)层序地层学]由王家豪、廖远涛、王华执笔,第七章(陆相盆地层序构成特征)由陆永潮、王华执笔,第八章(构造坡折带类型及层序构成样式分析)由任建业、陆永潮执笔,第九章(野外露头层序地层学研究)由任建业、陆永潮、庄新国执笔,第十章(碳酸盐岩层序地层学研究)由陆永潮、解习农执笔,第十一章(层序划分与储层综合预测技术)由石万忠、陆永潮执笔,第十二章(层序地层学的编图系列)由王华、肖军、廖远涛、甘华军执笔,第十三章(层序地层学在能源资源勘查中的应用)由焦养泉、庄新国、刘晓峰执笔;结束语、参考文献由王华等全体人员综合整理。全书最后由王华进行统稿。由此可见该教材是中国地质大学(武汉)一批中青年学者长期密切合作、集体智慧的结晶。

该书在资料准备、编写与出版过程中始终得到了多个“产学研”单位(如中国石油冀东油田、大港油田、大庆油田、中国石化胜利油田、西北石油局、中原油田、河南油田、江汉油田、中国海洋石油湛江分公司等)领导的关切。同时,本教材的出版工作也得到了中国地质大学校领导的关注。

该书的出版得益于湖北省杰出青年基金的支持,受益于中国地质大学(武汉)学术出版基金、研究生课程与教材建设基金、中国地质大学“211 工程”建设中的“国土资源勘查评价与信息技术学科群”,得益于中国地质大学赵鹏大院士的鼓励 and 热心支持,受益于中国地质大学李思田教授所给予的长期的热心支持和学术指导。同时感谢中国地质大学杨士恭教授、林畅松教授、姜再兴教授、陈开远教授,中国石油大学(北京)的朱筱敏教授、纪友亮教授,中南大学郭建华教授,中国石油勘探开发研究院的冯友良教授等在层序地层学领域的多次学术交流、协助与指导!中国地质大学(武汉)校领导、研究生院、资源学院负责同志也对该

书的出版给予了关注与支持,中国地质大学(武汉)矿产普查与勘探专业的研究生肖力、朱正茂同学在文图编排及在出版过程中的图文编辑等方面付出了辛勤的劳动。在此,本书的编著者们向他们表示衷心的感谢!

由于笔者们的研究水平与工作经验有限,对层序地层学领域的众多问题的认识、分析与总结定会存在欠妥之处,热诚欢迎读者们关心本书,指出本书的不足,并予以指正。

王 华

2007年10月1日于武汉

目 录

第一章 层序地层学产生背景、基本概念体系与研究进展	(1)
第一节 层序地层学产生的背景与研究历史	(1)
第二节 层序地层学的基本概念体系	(3)
第三节 层序地层格架及主要的层序地层样式	(11)
第四节 层序地层学研究现状与展望	(17)
第二章 层序地层学研究内容与方法系列	(26)
第一节 层序地层学的研究内容	(26)
第二节 层序地层学的研究方法与技术流程	(31)
第三章 层序及其构成样式	(36)
第一节 层序边界特征及其识别标志	(36)
第二节 层序内部构成单元——体系域的类型及其主要特征	(46)
第三节 体系域内部构成单元——准层序(组)的类型及其主要特征	(49)
第四章 层序形成的控制因素及其综合效应分析	(54)
第一节 构造活动的控制作用	(54)
第二节 相对海(湖)平面周期性升降的控制作用	(59)
第三节 沉积物供给量的控制作用	(62)
第四节 古气候的控制作用	(66)
第五节 多因素控制作用的综合分析与判别	(69)
第六节 层序形成的模拟研究	(71)
第五章 单井层序地层学	(82)
第一节 单井层序地层学研究	(82)
第二节 单井层序分析与界面的识别	(84)
第三节 测井资料在单井层序地层学研究中的应用	(100)
第四节 连井层序地层综合对比分析	(120)
第六章 地震层序地层解释	(125)
第一节 地震反射终止类型	(125)
第二节 地震相分析基础	(128)
第三节 层序界面及体系域单元的地震反射特征	(144)
第四节 地震层序分析的流程及要点	(153)
第七章 陆相盆地层序构成特征	(157)
第一节 陆相盆地类型及层序发育特点	(157)
第二节 陆相盆地层序样式的基本特征	(163)
第三节 控制陆相盆地层序样式的主要因素	(184)
第八章 构造坡折带及层序构成样式分析	(193)
第一节 构造坡折带的概念与类型划分	(193)

第二节	构造坡折带的形成机制·····	(194)
第三节	构造坡折带与层序发育模式·····	(205)
第四节	构造坡折带对沉积体系和低位扇发育分布的控制·····	(210)
第五节	构造坡折带油气地质意义·····	(220)
第九章	露头层序地层学研究·····	(222)
第一节	露头层序地层学的基本特点·····	(222)
第二节	露头层序地层学研究内容·····	(222)
第三节	层序地层单元的地表研究·····	(224)
	实例一：美国 Book Cliffs 悬崖剖面露头层序地层研究 ·····	(226)
	实例二：南阳凹陷西大岗露头高精度层序地层研究·····	(246)
第四节	露头层序地层的研究手段、方法和工作流程·····	(254)
第十章	碳酸盐岩层序地层学研究·····	(256)
第一节	碳酸盐岩层序地层学特点·····	(256)
第二节	缓坡—陆棚碳酸盐岩层序地层格架·····	(261)
第三节	孤立碳酸盐台地层序地层格架·····	(266)
第四节	斜坡—盆地碳酸盐岩层序地层格架·····	(269)
第十一章	层序划分与储层综合预测技术·····	(276)
第一节	地震—地质综合标定技术 ·····	(276)
第二节	地震沉积学·····	(280)
第三节	地震属性技术·····	(286)
第四节	储层地震反演技术·····	(300)
第十二章	层序地层学的编图系列·····	(314)
第一节	层序地层学研究中的工作流程图·····	(314)
第二节	盆地充填序列、层序垂向演化及单井层序地层学图件的编绘·····	(316)
第三节	野外露头类图件的编绘·····	(319)
第四节	剖面类图件的编绘·····	(323)
第五节	平面类图件的编绘·····	(325)
第六节	立体类图件的编绘·····	(328)
第七节	演化类图件的编绘·····	(329)
第十三章	层序地层学在能源资源勘查中的应用·····	(331)
第一节	层序地层学在油气资源勘探与开发中的应用·····	(331)
第二节	层序地层学在煤资源勘探中的应用·····	(340)
第三节	层序地层学在砂岩型铀矿勘查中的应用·····	(361)
参考文献	·····	(367)
图版		

第一章 层序地层学产生背景、基本概念体系与研究进展

第一节 层序地层学产生的背景与研究历史

一、层序地层学产生的背景与研究历史

层序地层学 (sequence stratigraphy) 是“研究由不整合面或其对应的整合面所限定的一套相对整合的、成因上具有成生联系的等时地层单元” (Mitchum *et al.*, 1977; van Wagoner *et al.*, 1988, 1990)。Emery (1996) 给了更简要的定义: “地层学中研究沉积盆地充填, 形成以不整合或相对应的整合为界的成因单元的分支学科。” 它主要是近些年来由于地层学、沉积学、大地构造学和地球物理学的相互渗透而迅速发展起来的一门新的地学分支系统。由于层序地层分析思路的先进性和资源预测的有效性, 因而其具有很强的生命力, 并引起地质学不同领域的许多学者的广泛重视。

早在 20 世纪 50 年代末和 60 年代初, “Sequence” 这个词在层序地层学鼻祖 Sloss (1963) 的文章《北美克拉通内的层序》中就被强调和使用了。很明显, Sloss 将层序定义为以不整合面为界的岩石地层单元, 是构造旋回的岩石记录。从 Sloss 的这篇文章之后到 Vail 等 (1977) 的《AAPG Memoir 26》出版前, 几乎没有什么文献再论及 Sequence。但是在 20 世纪 60 年代末期到 70 年代早中期, 与 Vail 同在 Exxon 研究小组工作的 Frazier (1974) 研究了密西西比河三角洲复合体的沉积学和地层学。Frazier 根据三角洲复合体中的多个朵叶体的特征认为, 与退覆充填的碎屑盆地一样, 这些地层是由相层序及沉积幕形成的沉积复合体, 一个相层序就是单个三角洲朵叶体被朵叶体迁移和废弃形成的海侵面所限制, 一个沉积复合体是一个以进积型式堆叠的相层序的联合体, 它被以退积式堆叠的相层序所限定和覆盖。Frazier 的术语强调了由海进面限定的地层组, 因为它符合三角洲和三角洲复合体沉积, 朵叶体的废弃是常见的过程。Frazier 的经验是来自他对第四纪密西西比河三角洲沉积的研究, 因为在那里海泛面常见, 而不整合面少见。该阶段可以说是层序地层学发展的萌芽阶段, 以 Sloss (1963) 的工作为代表。

层序地层学的前身是地震地层学, 它同时也受益于生物地层学、年代地层学和沉积学的快速发展。Vail 工作组以地震资料的地层学解释技术发展了 Sloss 以不整合面限制的层序。其中, 以 1977 年发表的地震地层学标志, 表明层序地层学研究进入了新阶段。20 世纪 70 年代中期到 80 年代中期, 蓬勃发展的地震地层学给后来的层序地层学打下了坚实的理论和方法基础, 《海平面变化——一种整体性的研究》(Welgus *et al.*, 1988) 和《测井、岩心、露头研究中的硅质碎屑岩层序地层学》(van Wagoner, 1990) 的出版, 标志着层序地层学的真正诞生。

国际沉积学会 (SEPM) 第 42 集特刊 (1988)《层序地层学原理》(海平面综合分析) 作为系统的层序地层学论著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。在 1989 年 AAPG 第 74 届年会上, Sangree 和 Vail 发表了《应用层序地层学》一书, 在油气勘探领域引起了巨大的反响, 从而使层序地层学分支得以真正形成。进入 20 世纪 90 年代, 随着层序地层学的发展, 相继出现了许多分支, 例如, 构造层序地层学、成岩层序地层学、碳酸盐岩层序地层学、储层层序地层学、高分辨率层序地层学等, 标志着层序地层学的发展进入理论的系统化、概念体系的完整化阶段。

层序地层学作为一门新兴的边缘交叉学科, 其优势具体表现在: ①层序的形成受控于全球海平面升降、构造沉降、气候和沉积物供给等因素, 并表现出不同的级别、规模和不同的时间间隔。②提出了相

对海平面变化控制了层序的形成与发育,确定了层序内部与层序之间的成因联系。③建立了地层分布模式,提高了预测性。每个体系域在一个层序中都有一定的几何形态和展布方式,可以利用已经建立的模式预测未钻地层的年代、体系域的分布方向和范围,预测有利的“生储盖”地层组合。④依据地震勘探技术和计算机技术,定量模拟层序的充填过程,人们便可半定量地了解地层划分、相带分布,恢复古地理、构造发育史、成藏史和油藏开发监测等。⑤实践性强,较易操作,在地震剖面上利用深切谷的特点和地层上超的特征,容易确定层序的边界,利用下超特点确定最大海泛面,从而将层序及其内部构成的体系域一一确定。

因此说,层序地层学提供了一种精确的地质时代对比、古地理再造和在钻井前预测储集体、生油岩和盖层的有效方法(Vail *et al.*, 1991)。它提高了地质学家的预测能力,包括理论和实际的预测能力。从理论预测上讲,通过海(湖)平面相对变化的研究,预测某些应有的体系域的展布方向、范围、可能的岩相及其分布,从而对盆地发育史作出科学的预见。从油气勘探实践上讲,可以通过体系域和岩相的分布规律,预测能源资源及其他沉积矿产的有利分布区带。

就在层序地层学问世以后,原来曾经在 Exxon 研究小组工作过的科罗拉多矿业学院的 Cross,自 20 世纪 80 年代至 90 年代中期,创立了自己的基准面旋回高分辨率层序地层学。Cross 领导的成因地层研究组的工作代表了美国高分辨率层序地层学的出现,他们的工作力图反映高分辨率层序地层学的新概念、新方法、新进展,运用过程-响应沉积学原理进行高分辨率层序的划分与对比技术、正演与反演数值地层模拟技术、地层对储层中流体流动速度与流体单元控制的研究等(邓宏文, 1995),逐渐建立了一套以 Base-level Cycle 为基础的高分辨率层序地层学方法体系。

二、层序地层学的基本原理

层序地层学从 Vail 等为代表的“由一套有成因联系的,相对整合的地层组成的地层单元,顶底以不整合面或与之相对应的整合面为界”的沉积层序学派,发展到现在的多种学派,如以 Galloway 创立的以洪泛面为层序边界的成因层序地层学学派及 Cross 以基准面旋回与过程-响应原理为理论依据,并以地质、地球物理方法为手段的高分辨率层序地层学派。这些理论基础均是建立在地震、测井、岩心、露头等资料的综合分析和层序的成因机制的计算机模拟基础之上,综合研究层序的形成与演化特点。层序地层学的基本原理主要有:①地质历史中发生过多次海平面、湖平面或沉积基准面的周期性变化。这些变化是由构造运动、全球海(湖)平面变化、沉积物供应和气候变化综合结果引起的。②沉积基准面(上限)与沉积物表面(下限)之间的空间称为可容纳空间,沉积物只能在这个空间中沉积下来。③基准面的周期性变化会造成可容纳空间的周期性变化。④通过傅立叶变换,将可容纳空间的周期性变化分解成时间跨度或频率大小不同的若干级次。⑤层序(sequence)为相对整合的、成因上有联系的、其顶底以不整合面或它们的相对整合面为界的一套地层(Mitchum, 1977),其内由低位体系域、海侵体系域和高位体系域组成(Vail, 1977)。这些体系域由准层序组成,因此准层序和准层序组是组成层序的基本单元(van Wagoner, 1990)。它们是寻找和构成油气藏的基本单位。⑥密集段(condensed section)为沉积作用极为缓慢、水深最大的条件下形成的一种富有机质、富自生矿物和古生物组合的地层。⑦体系域为一系列同时期的沉积体系,根据其在层序边界面附近的地层几何形态、在层序内部所处的相对位置以及构成体系域的准层序的叠置方式可分为低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)、湖扩展体系域(EST)和高位体系域(HST)。⑧准层序(parasequence)为以湖泛面或与其对应的面为界的相对整合、成因上有联系的层或层组所组成的地层单元。准层序厚度一般为几米至几十米,通常只能在测井曲线、岩心或露头中识别。⑨准层序组(parasequence sets)为以主要海(湖)泛面及其对应的面为界、成因上有联系的若干准层序叠置而成的地层单元,根据其叠置方式分为进积、加积和退积准层序组。

层序地层学理论的出现是基于数字地震技术的应用,地震野外数据采集质量大量提高,使原来地震构造成像变为成因地层成像,使我们可以直接从地震剖面上进行等时地层划分与对比,从根本上改变了古老地层对比的观念与原则,解决了原来地层对比的穿时问题。层序地层学建立了一整套概念体系及技

术支撑体系,它的思想精华表现为综合露头、钻井、测井和地震资料进行地层层序叠置样式研究。地震方法识别出的地层界面被认为具有等时性意义,可以用来建立等时地层格架。测井资料的垂向高分辨率是识别高频层序的基础,经岩心资料刻度的不同类型测井曲线的形态及其组合,提供了岩性、岩相的叠置形式,同时也提供了识别高频层序界面、划分准层序组、准层序以及研究准层序叠置样式的基础。生物地层技术和同位素测年技术的发展提供了准确进行层序内部不同级别界面年代标定的可能,为最终建立绝对地质时间的等时层序地层格架起着至关重要的作用。因此,层序地层学是建立在地震地层学、测井地质学、过程沉积学、古生物学、同位素地质学等多个学科基础上的研究等时年代地层格架中具有成因联系的、旋回岩性序列间相互关系的综合学科,是现代地质学中具有强大生命力的一个前缘分支学科。

第二节 层序地层学的基本概念体系

作为一门独立的学科体系,层序地层学有其独立的概念体系和研究方法。下面主要介绍来源于 Vail 及其同仁依据被动大陆边缘盆地的海相地层所建立起来的 Exxon 层序地层学模式相关的概念体系。

一、层序地层单元级别划分中涉及的基本概念

对于各级层序地层单元的涵义、划分准则,地质学家们已取得基本的共识 (Wilgus, 1988; van Wagoner, 1988)。基于大量实践所作的统计,对各级层序地层单元均给定了大致持续的时限 (表 1-1),但其摆动的幅度较大。尽管如此,层序地层单元持续的时限对确定其级别有重要意义。在油气勘查中也用以衡量研究工作的精度,如三级层序一般持续时间为 1~3Ma,若划分的时间间隔过大则常反映研究工作的精度不足。

表 1-1 不同级别层序的时间跨度及旋回性的成因解释

层序 级别	持续时间/Ma				层序 性质	旋回性的成因解释
	Vail <i>et al.</i> , 1977	Mitchum, van Wagoner, 1991	Vail <i>et al.</i> , 1997	Miall, 1995		
一级	25~300	100	>50	200~100	巨层序	超大陆形成和解体导致的构造海平面波动
二级	10~80	9~10	3~50	10~100	超层序	①扩张洋脊导致的构造海平面波动; ②区域性伸展挠曲和陆壳负载
三级	1~10	1~2	0.5~3	1~10	层序	①未知地质过程导致的构造海平面波动; ②板内应力引起区域地壳变形导致的相对海平面变化; ③球外星体的影响; ④壳幔或幔核边界过程的影响
四级	未定	0.1~0.2	0.08~0.5	0.2~0.5	准层序组	①米兰科维奇冰期海平面波动, 天文因素; ②区域挠曲构造
五级	未定	0.01~0.02	0.03~0.08	0.01~0.2	准层序	①米兰科维奇冰期海平面波动, 天文因素; ②区域挠曲构造
六级	未定	未定	0.01~0.03	未定		①米兰科维奇冰期海平面波动, 天文因素; ②区域挠曲构造

不同类型的盆地内部均可划分出不同级别的层序地层单元。一级和二级层序被公认为受全球性和区域性构造因素控制,其界面常属区域性的不整合面,代表着重要的间断。此种情况在海相及陆相地层中均很明显;三级层序是层序地层单元中的基本层序,在陆相地层中作为层序边界古间断面常较海相地层更为显著。

1. 巨层序 (Megasequence)

巨层序的形成受控于全球性板块运动的最高级别的周期性, 最典型和公认的即古大陆会聚和离散的周期。最著名的是 Pangea 超大陆 (supercontinent), 其会聚成整体的时间在 250Ma $\pm$; 重新裂解和开始离散则在 160Ma $\pm$, 即大西洋开始形成的时期。可见其持续时间之长, 跨越了不同的地质时代。王鸿祯先生根据地球历史的记录分析建议巨层序的大致时限为 60~120Ma (王鸿祯等, 2000)。在含油气盆地的层序地层研究中对层序地层单元的划分的要求日益精细, 一般不涉及高级别层序; 但在大型叠合盆地中, 如塔里木和准噶尔等盆地, 沉积充填跨越多个地质时代, 仍可划分出巨层序。

2. 超层序 (Supersequence) 和超层序组 (Supersequence set)

在地层序列中超层序也是持续时间很长的层序地层单元, Michum 和 van wagoner 等均建议其时限为 9~10Ma。超层序的形成受控于构造演化的周期性, Galloway 等对巨层序、超层序等高级别层序地层单元曾称之为“构造层序” (tectonic sequences)。超层序的界面常常是较为明显的区域性的不整合面或与之相对应的整合面。在我国陆相盆地分析的实践中超层序常对应于盆地构造演化的阶段性。在我国东部裂陷类盆地中裂陷期的多幕伸展是普遍存在的特点, 此种特点主要受控于地幔深部过程和板块的相互作用。在沉降史分析中每一个裂陷作用幕对应于沉降速率由快速到衰减的过程。例如我国东部陆上和海域, 早第三纪裂陷期普遍可以划分出 3 或 4 个裂陷幕, 与之相应的层序地层单元正相当于超层序。

超层序组 (王鸿祯等, 2000) 是成因上相关的几个超层序的组合。由于巨层序与超层序的时间间隔相差悬殊, 其间常存在着可识别的中间性单元。Vail 等用时限为 27~40 $\pm$ Ma 的超层序组做为这种介于巨层序与超层序之间的单元。20 世纪 90 年代许多中外学者发现此级别的层序具有大范围的可对比性并与天文周期相吻合。现已了解太阳系穿越银河系的银道面的半周期可能是较稳定的天文周期, 其时限约为 32~38Ma, 对地球系统的演化可能产生重大影响, 做为对此种构造周期性的沉积响应, 即对应于一定级别的层序地层单元——超层序组。

3. 层序 (Sequence) (或称三级层序, Third-order sequence)

层序已经被定义为由一套相对整一的、成因上有联系的地层, 其顶底以不整合面或与之对应的整合面为界 (Mitchum *et al.*, 1977; van Wagoner *et al.*, 1988, 1990)。层序是层序地层分析中的基本单位, 其时限一般常为 0.5~5 Ma。此种不整合常常是低角度的侵蚀不整合。在与海相相关的地层中, 层序的内部由低位体系域 (LST) 或陆架边缘体系域 (SMST)、海侵体系域 (TST) 和高位体系域 (HST) 三种体系域组成, 其间无不整合面。三级层序是层序地层研究中最基本的单元。三级层序内部的体系域构成也是确定三级层序的重要标记, 正常情况下三级层序内部具有三个体系域, 但其中的高位体系域有时可能被侵蚀, 低位体系域在某些情况下也可以不发育, 因此有些层序只有两个体系域。对于三级层序的成因迄今尚无明确共识, 多数沉积学家推断认为是气候周期导致的基准面变化控制了三级层序的形成和旋回式交替 (van Wagoner, 1995)。

4. 体系域 (Depositional system tract)

体系域是同一时期内具有成因联系的沉积体系组合 (Brown, Fisher, 1977; Vail, 1988)。以 Vail 等为代表的研究集体在海相为主的地层中概括出了三级层序的构成模式, 并划分了低位体系域 (LST) 或陆架边缘体系域 (SMST)、海侵体系域 (TST)、高位体系域 (HST)。在三级层序内部这三种体系域的界限是初始海泛面和最大海泛面, 这两个关键性的界面均可在地震剖面和钻井资料中识别。

由于陆相盆地中湖泊的演化过程对古气候、古构造、物源补给等诸因素均十分敏感。从地质历史演化的角度看, 大多数湖泊是较为短命的地貌景观, 由于湖泊规模的局限性在层序地层分析中可以看到其整体的扩展和萎缩。李思田等 (1992) 指出在湖泊体系中套用进积 (transgressive) 和退积 (regressive) 并不妥当。已故 Kelts 教授曾建议用扩展 (expanding) 和收缩 (retracting) 来表现湖泊水体的变化, 并建议在湖盆条件下用湖扩展体系域 (EST) 取代源于海相地层的 TST 更为合理。

在层序地层分析中, 体系域作为层序构成单元, 每个体系域都解释为与全球海平面变化曲线的某一特定段相对应。如在大陆边缘盆地中, 低位体系域的盆底扇代表快速全球海平面下降早-中期的产物,

低位体系域的斜坡扇代表全球海平面下降晚期或全球海平面上升早期的产物；海侵体系域代表全球海平面快速上升时期的产物；高位体系域代表全球海平面上升晚期及全球海平面停滞和全球海平面下降早期的产物（图 1-1）。

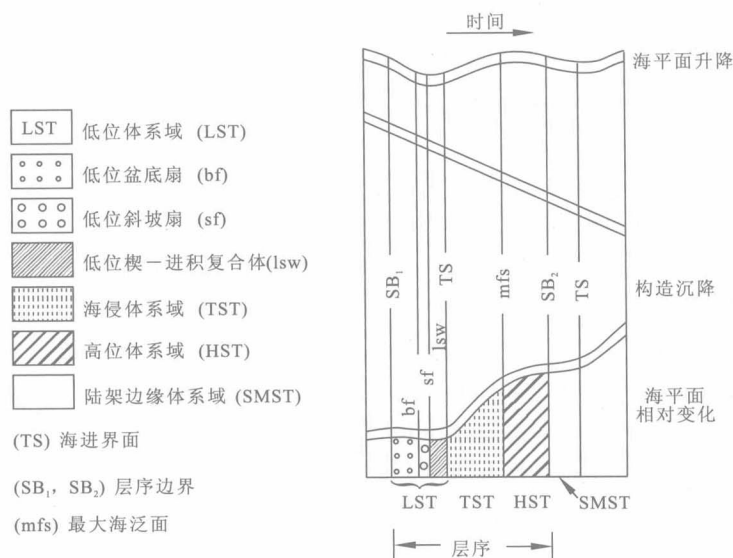


图 1-1 海平面变化与体系域关系

(据 Vail *et al.*, 1987)

1) 低位体系域 (Lowstand systems tract): 低位体系域下由层序界面限定, 上由第一次海泛面 (称初始海泛面) 限定。它可由盆底扇、斜坡扇和低位楔组成 (van Wagoner *et al.*, 1988, 1990; Posamentier, Vail, 1988)。

2) 陆架边缘体系域 (Shelf margin systems tract): 是在一个海平面相对上升时形成的海退地层单元, 为一楔形体覆盖于 II 型层序界面 (详见本节第二部分的术语解释) 之上, 在下伏前积拐点向陆一侧的陆架上沉积而成, 以微弱前积和加积为特征。它由陆架和斜坡碎屑岩或碳酸盐岩组成, 其陆上部分一般为向海增厚的陆相楔状体, 而海相部分与低位前积复合体相似 (Posamentier *et al.*, 1991)。

3) 海侵体系域 (Transgressive systems tract): 下由初始海泛面、上由下超面或最大海泛面所限定的体系域。它由退积准层序组组成, 向上水体逐渐变深 (van Wagoner *et al.*, 1988, 1990; Posamentier, Vail, 1988)。

4) 高位体系域 (Highstand systems tract): 下部由下超面限制, 上部由下一个层序界面限制的体系域。早期的高位体系域通常由加积准层序组组成, 晚期的高位体系域由一个或更多的进积准层序组组成 (van Wagoner *et al.*, 1988; Posamentier, Vail, 1988)。

5. 四级层序 (Fourth-order sequence)

四级层序具有三级层序的基本特征, 但时限很短, 在海相地层中大约 0.1~0.15Ma, 因此属于高频层序的范畴 (Mitchum, van Wagoner 1991; van Wagoner *et al.*, 1995)。四级层序概念的提出虽已有很长时间, 但其应用涉及地震反射成果的精度, 在地震分辨率不高的情况下很难划分。随着地震勘探采集与处理技术的提高, 国际上一些著名的大公司要求在生产上力求划分出四级层序以更精确地进行储层预测。在陆相地层中, 目前地震探测精度在多数场合尚难划分出四级层序。胜利油区的东营凹陷发育了大型的三角洲体系——东营三角洲, 在其发育区划分出多个四级层序, 在每个四级层序中成功地预测了含油的前缘滑塌浊积体。

6. 五级层序 (Parasequence)

在 Vail 等人研究集体的名词系统中以 Parasequence 做为层序地层序列中的五级单元。在高精度储层层序地层研究中需要划分对比到五级单元。

Parasequence 被定义为由海泛面或其对应面限定的有成因联系的层的组合。Vail 和 Mitchum 等将其时限定为 0.03~0.08Ma。多个成因上相关的 Parasequence 以一定的叠置样式（进积的、退积的和加积的）组合构成了 Parasequence set。

我国早期的层序地层译文将其译为准层序，但在汉语中“准”与“正”不是级别的含意，因此有人提出另外的译法：小层序。王鸿祯等更建议在英文中用 Microsequence 取代 Parasequence（王鸿祯等，2000）。为了避免名词不统一造成的混乱，本书用五级层序地层单元（李思田，2003）或直接称之为准层序。

在油气勘查中根据反射地震剖面通常只能划分出三级层序及其内部的体系域，四级层序只有在特定条件下能够划分，五级单元则只能在钻井资料中划分和使用。层序地层序列是一种旋回式交替，旋回地层学在地质学史上则已有很长的历史。层序地层与旋回地层最大的区别是前者对古间断面和其他关键性物理界面的重视，并以其为划分层序地层单元的界限。这在三级及其以上级别的层序划分中很有效。在四级或五级层序地层单元的研究中，多数情况下难以找到不整合间断面，因此在划分和对比上实际是使用近代旋回地层学和事件地层学的原理（Einsele，2000），但在界限选定上有所差异。van Wagoner 等以海泛层作为五级单元的起点，这对多数海相沉积体系和湖泊三角洲体系适用，但在河流体系中则应以河道的底冲刷面为界。总之在划分和对比五级单元时应考虑沉积体系的类型。在陆相地层大量存在的河流体系中，五级单元的下界不是湖泛面，而经常是水道底冲刷面。在陆相三角洲体系中则以湖泛面为下界（图 1-2）。

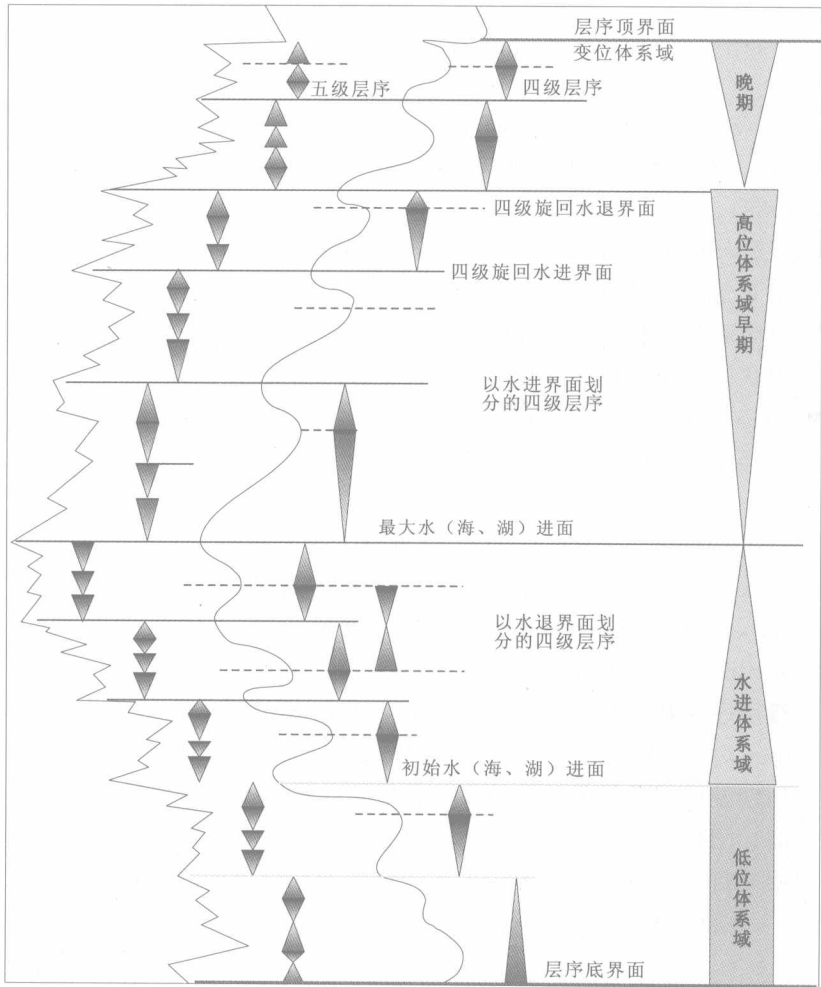


图 1-2 一个三级层序内的四级和五级高频层序单元划分
(据林畅松，2002)

二、层序地层学的主要概念和关键术语

(1) 不整合 (Unconformity) 与层序边界 (Sequence boundary)

不整合是分隔年轻地层和年老地层的界面，沿此面有明显的陆上侵蚀截削，并且在一些地方，有对应的海底侵蚀、往盆向位移、上超、削蚀或陆上暴露，伴随有明显的沉积间断。

一个层序边界是以不整合面或与之相对应的整合面为特征，不整合面或与之相对应的整合面为一个分开新老地层的界面，沿着这个面存在陆上侵蚀削截（在某些地区为可与之对比的海底侵蚀面）的证据，或者存在明显的重要沉积间断的陆上暴露的证据 (van Wagoner *et al.*, 1988)。层序界面常可分为平行不整合和角度不整合。整合面是分开新地层和老地层的界面，在界面上没有发生侵蚀作用和无沉积作用的物理证据，也没有重大的沉积间断标志 (Mitchum *et al.*, 1991)。沉积间断为一特定的位置上沿某一地层界面上没有代表的地层（即地层缺失）的地质时间的总间隔 (Mitchum, 1991)。

应用层序边界的概念时是以部分地震剖面，结合测井、岩心和岩性资料而展开的。不整合界面可以在地震相上识别出来，地层与层序界面的底部和顶部的关系在地震剖面上的反射特征有所不同 (图 1-3、图 1-4)。

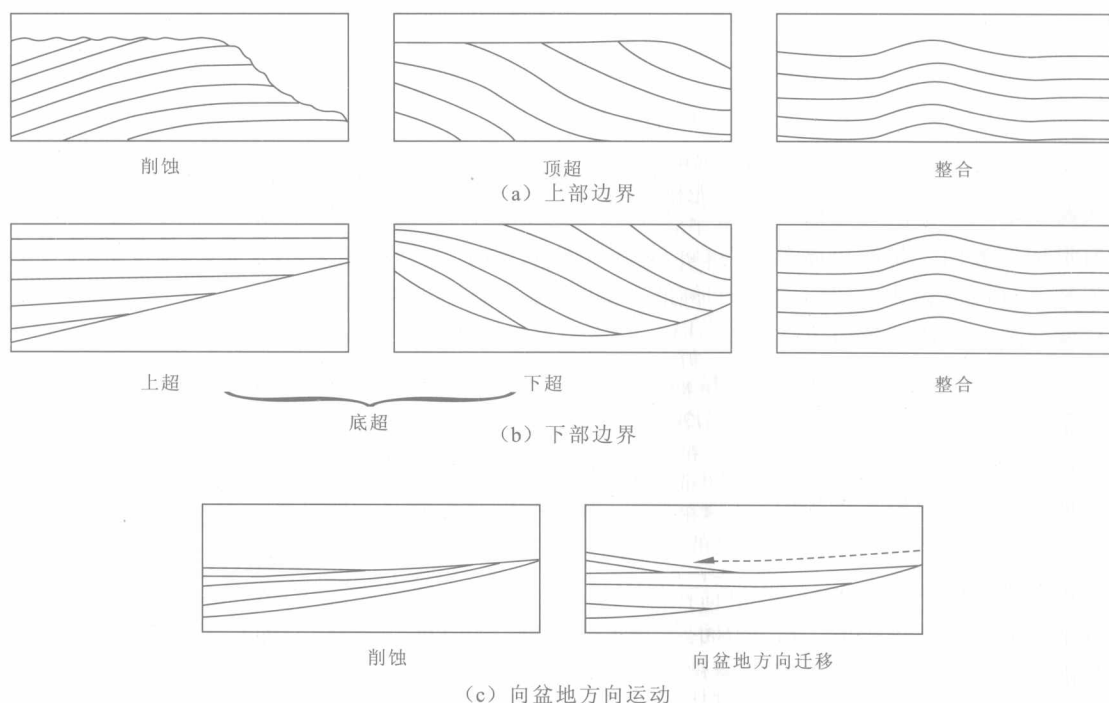


图 1-3 地层与层序边界之间的关系示意图

(据 Allen, 1990)

识别底部边界可以通过地层与沉积层序边界接触关系来进行，主要有上超和下超两种类型：上超是一套当初是水平的地层对着一个原始倾斜界面超覆尖灭，或是一套原始倾斜地层对着一个原始倾斜角度更大的倾斜界面的超覆尖灭；下超是一套原始倾斜的地层对着一个原始水平界面或倾斜界面顺下倾方向的底部超覆。识别顶部边界可通过地层削蚀和顶超来进行：顶超是在一个沉积层序的上界面处的超覆尖灭现象，顶超是无沉积作用和沉积间断的标志；削蚀则是因地层遭受剥蚀作用而引起的侧向消失，它既可以出现在沉积的顶部界面，也可以出现在一个较大的区域性范围，还可以是局限在一个河道和一个小型凸起的部位。

(2) 海泛面 (Flooding surface)

海泛面是一个将新老地层分开的界面，跨过这个面有水深突然增加的证据。这种水深增加通常与小的侵蚀作用和无沉积作用伴生，而且有小规模的沉积间断 (van Wagoner *et al.*, 1988, 1990)。海泛面

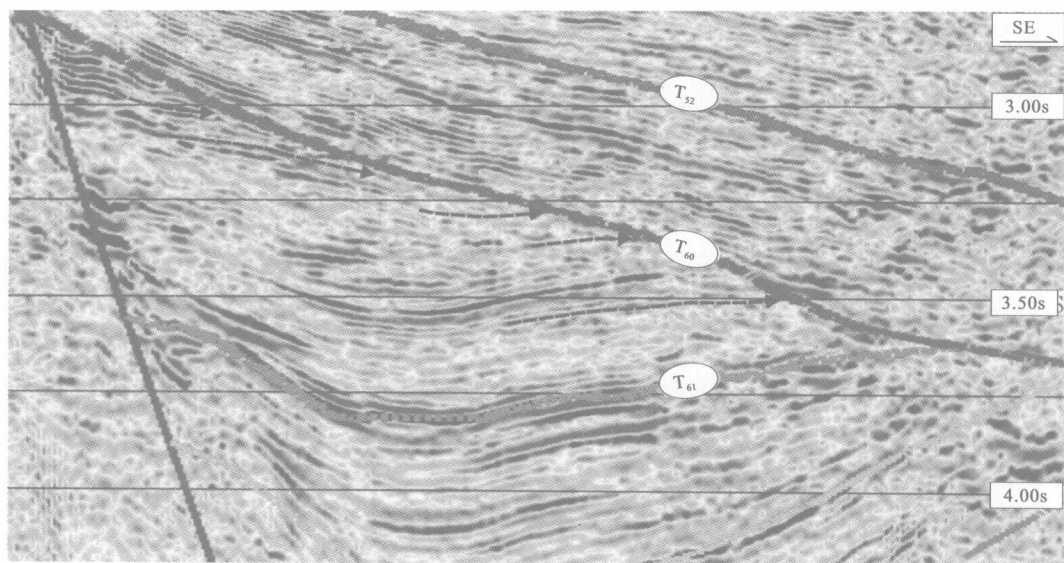


图 1-4 琼东南盆地 97D1023 测线示 T_{60} 界面，一个不整合层序边界与其他层序边界之间的接触关系
(据王华等，2005)

通常是平整的，不会发生上覆地层的上超现象，除非这个面与层序边界相重合。初始海泛面是 I 型层序内部初次跨越陆架坡折的海泛面，也是低位体系域与海侵体系域的分界面。最大海泛面是一个层序中最大海侵时形成的界面，是海侵体系域与高位体系域的分界面。一般在最大海泛面的顶界面被上覆的高位体系域下超，且以退积式准层序组变为加积式和进积式准层序组为特征。

(3) 密集段（或称凝缩段，Condensed section）

密集段是指在极缓慢速度下沉积的地层段，沉降速率一般为 $10 \sim 100 \text{ mm/万年}$ 。密集段也称凝缩段，一般很薄，缺乏陆源物质。密集段可能以丰富的、多种多样的浮游和底栖微生物组合、自生矿物（如海绿石，磷灰石和菱铁矿）、有机物质为特征。它是海平面相对上升到最大、海岸线海侵最大时期在陆架、陆坡和盆地平原地区沉积的。尽管凝缩段薄，堆积的速率低，跨时长，但凝缩段中的沉积是连续的（Louit *et al.*, 1986）。

(4) 可容纳空间（Accommodation space）

可容纳空间指可供沉积的、潜在的沉积物堆积空间（Jervey, 1988），即在沉积盆地存在一个基准面，在基准面之上将出现侵蚀作用。在大陆边缘基准面受海平面的制约，并大体上相当于海平面。实际上，可容纳空间是海平面升降变化和构造沉降二者的函数，是全球海平面变化和构造沉降的综合表现。

(5) 海平面（Sea level）、全球海平面变化（Eustasy）

海平面是平均海平面的大众化同义词。海面的平均高度是 19a 里各潮汐阶段的平均值。它被认为是基准面或测量高度的潮汐基准面（Gary *et al.*, 1974）。全球海平面是指一个固定的基准点，常指地心到海表面的测量值，这个测量值随着洋盆和海水的体积变化而变化。

全球海平面变化是由地理同步卫星测得的洋面的变化，是海平面升降变化，也是一个海平面相对变化。

(6) 相对海平面变化（Relative sea level change）

相对海平面是指海平面与局部基准面（如基底）之间的测量值。一个地区相对海平面的变化与沉积物堆积无关。如果海面与基准面距离增加，在这种情况下，基准面则选择海底，即出现海平面相对上升，如果海面和海底的距离变小，则海平面相对下降。沉积物沉积在基准面上，海底在这种情况下不会改变基准面与海面的距离，因此，单独的沉积不会引起海平面的相对下降。

海平面的相对变化既可以由沉降作用和上升作用引起，也可由全球海平面升降引起。术语在使用