

高等学校试用教材

地震地层学 解释基础

编者 徐怀大
王世凤
陈开远

中国地质大学出版社

地震地层学解释基础

徐怀大 王世凤 陈开远 编著

中国地质大学出版社

地震地层学解释基础

徐怀大 王世凤 陈开远 编著

责任编辑 耿小云 蔡桦芬

责任校对 熊华珍

中国地质大学出版社出版

(武汉市喻家山 430074)

中国地质大学出版社印刷厂印刷 湖北省新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 11.75 插页3 字数 298千字

1990年8月第1版 1990年8月第1次印刷

印数1—2000册

ISBN 7-5625-0457-1/P·151

定价：2.80 元

序

当代地球科学的发展，明显地表现出全球性和综合性的特点。它要求使用各种现代科学技术的最新成就，并使各个学科紧密结合起来，深入认识，特别是求得规律性的认识。

近三十年来，反射地震勘探的仪器设备，从光点记录，经过模拟磁带记录，发展到数字磁带记录，并利用瞬时浮点增益，可以无畸变地将反射纵波记录下来。野外观测方法中，广泛使用共深点(**common depth point**)技术采集，使有效信号得到极大的加强。利用电子计算机对反射地震资料的处理，使用包括反褶积(**deconvolution**)在内的各种数字滤波，可以将未畸变的反射地震信息显示出来。从而，反射地震勘探的发展已经跨进了一个新的阶段，即用来进行地质解释的信息，不再单纯是研究构造的运动地震学参数，同时还应利用与地层或岩性有关的动力地震学参数。

长期以来，反射地震勘探只能使用运动学参数(时间)研究地下岩层的结构形态，尽管这样已经为油气勘探作出了许多贡献。现在的技术进步能够提供弹性波传播的频率、振幅、相位等多种动力学参数，而这些地震信息都是与地层的物理性质或岩性紧密相关的。例如，瞬时浮点数字地震仪记录下来的反射地震波波形的变化，显示出地下沉积相的不同，从而可以用来判断沉积环境。再如，反射地震波的振幅异常，表示地下反射界面具有巨大的波阻抗差异，其中包括物质相态的不同，甚至可能反映出烃类的存在。此外，反射地震资料与各种测井曲线的相互补充，相互印证，可能给出岩石的某些物理性质，甚至算出其孔隙度和渗透率。

现代的地层学，已经从岩性的描述，进入对其成因的追溯与分析，而沉积模式的研究以及沉积体的成因解释，则导致层序地层学的发展，特别是与全球海平面变化有关的沉积体系的建立。

油气勘探与构造和地层的关系都十分密切，一般地说，油气勘探有三个层次的任务需要解决。首先是沉积盆地研究，即根据对其构造演化，沉积发育和油气成熟的认识，作出沉积盆地含油气性评价。重力、磁力和反射地震运动学参数的综合分析为构造演化史提供有力的依据；现代反射资料的地震地层学研究，能为某些地质时期的沉积相、沉积环境作出判断；地球化学分析，能为油气的成分及其成熟程度提供确凿的佐证。其次是圈闭的研究。大量勘探实例证明，背斜和断块往往形成良好的储油构造，但如果油气的生成及其运移与构造形成时期不相匹配，则很可能使钻探落空。然而，沉积环境给出，生物礁、底辟(盐丘与泥火山)、以及其它隐伏沉积体，如河道沙、三角洲等，可能更有利于油气的聚集，特别是在中、古生界碳酸盐岩分布的地区内。因此，圈闭类型的研究必须与沉积史的分析紧密结合起来。第三，储集层研究。在中国，高压低孔渗的储集层比比皆是，而将油气的聚集寄托在裂隙系统，则无疑将增加勘探工作的难度，或者要求打更多的钻井。这里，利用烃类指示技术，更重要的是通过地震地层学研究，对岩性提供分析依据，将会指导勘探活动并取得良好的经济效益。

总之，地震地层学极大地丰富了反射地震勘探的资料解释，使反射地震信息与地层、岩性紧密结合起来，为油气勘探提供了新的认识，思路和依据，有力地促进了油气勘探向纵深

的发展。

徐怀大等同志编著的《地震地层学解释基础》，系统而全面地论述了有关地震地层学的基本问题，其中包括地震层序划分、海平面升降、地震相分析，以及地震勘探中与油气有关的技术方法及其解释。作者占有大量的实际资料，思路清晰、观点明确，并以全球性和综合性贯串全书，目标是为油气普查勘探服务。此书的出版必将推动地质与地球物理的进一步结合，使反射地震资料解释深入发展，同时也必将丰富地层学的内容，为寻找大油气田作出贡献。因此，是值得向读者推荐的新书。

刘光鼎

1988. 3. 29

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 层序地层学与地震层序划分	(5)
一、前言.....	(5)
二、层序地层学.....	(5)
三、地震反射界面的意义.....	(13)
四、地震层序的划分.....	(15)
五、海平面升降周期分析与海平面升降曲线的编制.....	(19)
六、海平面升降分析中的校正.....	(22)
第三章 地震相分析	(28)
一、地震相的概念和地震相分析的基础.....	(28)
二、地震相划分标志.....	(30)
三、地震相分析.....	(36)
四、碎屑岩沉积体的地震特征.....	(40)
五、碳酸盐岩地震相分析.....	(52)
第四章 地震模型、分辨率和地震属性分析	(64)
一、正演模型.....	(64)
二、反演模型.....	(77)
三、地震资料的垂直分辨率和薄层分析.....	(83)
四、水平分辨率.....	(92)
第五章 地震波传播速度分析	(98)
一、地震波的传播速度及其影响因素.....	(98)
二、常用的速度概念及其提取方法.....	(107)
三、速度研究的误差分析.....	(112)
四、速度应用——岩性预测.....	(118)
五、速度分析的其它应用.....	(124)
第六章 三维地震资料解释	(134)
一、基本原理.....	(134)
二、三维地震资料的地层学解释.....	(141)
第七章 地震油气检测技术	(146)
一、经典的油气检测方法.....	(146)
二、近代油气检测方法.....	(153)
三、地震波传播速度参数在油气检测中的作用.....	(170)
主要参考文献	(178)

第一章 绪 论

地质学已经诞生近200年。它的诞生起源于人们对成层沉积岩的观察,并从而产生地质学的核心——地层学。古生物学、构造地质学、岩石学、矿物学、地球化学、地球物理学、矿床学以及种种为找寻矿产资源或者为解决国计民生中重大课题的应用科学(如测井、勘探地球物理学等),就是在这个古老的地层学的基础上派生出来的。20世纪以来,地球科学发生了翻天覆地的变化。然而早年毕业的大学生们还会记得,地层学是相当乏味的。它的中心任务是按照业已成文的地层术语规范,机械地对地层进行描述、对比、划分、作图。无数的地区性命名,大量的地方性运动,把长于记忆的学生搞得疲惫不堪,甚至一些地层的命名人,在经过一段的闲置后,对自己的命名也感到生疏。地层学实际上处于停滞状态。少数地层学家甚至宁愿说自己是沉积学家。然而,在过去的20多年间,地层学发生了根本性的变革。部分地层学家会同沉积学家,开始冲破了单纯的文牍式地描述地层的旧习,致力于研究地层的成因。结果发现,现今看到的基本地层单位,都是由一些三角洲、扇体、河道、碳酸盐岩台地、礁、滩、沼泽、潮坪等沉积体组成的。它们在空间上,组合成有一定规律的沉积体系,这些沉积体系又组合成有一定分布规律的体系域。地层层序就是由一定类型的体系域构成的。而在纵向上,地层层序又以某种周期性的方式重复叠置着,象框架与砖石一样,构筑成完整的地层记录。这些最新研究成果不但把地层学从描述阶段推向成因地层学的新高度,而且为深入探索油气以及其它与沉积现象有关的金属非金属矿产的分布规律开辟了新的途径。

地层学的发展与地震勘探技术的进步及计算机的广泛应用分不开。通过数字检波器,非线性扫描,多次覆盖,及褶积、偏移、子波处理、复数变换、电测井等名目繁多的处理过程显示出的黑白和彩色剖面 and 水平切片,已经不再是单纯地用于构造地质解释了。人们从地震反射同相轴的空间形态和几何关系,从弯弯曲曲的地震迹线中,看到了丰富的地层现象和岩性变化。象X光的发现对医学的影响一样,地震勘探理论与技术的进步,给了地质人员一个透视地下的有力工具。而地震地层学就是地震勘探的高技术和成因地层学的近代理论相结合的产物。它是利用反射地震资料对地下地层和沉积现象进行解释的科学。

地震地层学这个名称是1975年在美国召开的石油地质家协会(AAPG)召开的地震地层学研讨会上定下来的。它和生物地层学、古地磁地层学、同位素地层学、事件地层学等一样,属于地层学的一个分支。依1972年国际地层划分、术语和用法报告汇编(H. D. Hedberg, 1972)所下定义:“地层学源于拉丁文Stratum和希腊文graphia,是地层的描述科学,涉及在正常顺序下,岩层(和其它共生岩体)的形状、排列、分布、年代顺序、划分以及有关岩石可以具有的任一或全部特征,成分和性质的关系。包括成因、组成、环境、年代、历史、与生物进化的关系以及不可胜数的其它岩层特征。所有的岩石类型——岩浆岩、变质岩以及沉积岩都属于地层学和地层划分的总范畴。某些非层状的岩体,因为与岩层伴生或关系密切,也置于地层学下考察。”因此,地震地层学也就是通过地震资料,在它的能力范围内、独立的或者与其它学科结合,解决上述问题。然而,正如前面所讲的那样,尽管1972年的“地层划分、术语和用法指南”较过去的“指南”有了很大进步,但是在摆脱描述性、强调成因单位方面,

还有商榷的余地。

关于地震地层学的研究范围和命名，国内外有着不同的意见。有人提出采用“石油地震地质学”这一命名（石油地震地质，1985，No.1），把地震地层学的研究范围缩小到“石油和天然气的资源勘探”，而研究的广度又扩大到构造、生油、资源评价等等方面。国内广为流行的不成文叫法是把区域性地震地层学研究称之为“区域地震地层学”，也有个别人称之为“地层地震学”，以强调地震的重要性。近年来，地震地层学的创始人之一Vail，致力于研究中显生宙以来全球统一的地层划分，提出“层序地层学”（sequence stratigraphy）一词，它是区域地震地层学的一个组成部分。在利用地震资料研究地下地层细节方面，国外曾出现两种不同叫法，即“地震岩性学”（seismic lithology）和“开采地震学”（production seismology）。国内也有岩性地震学、局部地震地层学等不同叫法。作者在本书的命名上沿用“地震地层学”这一旧称，并把区域性的地层划分、沉积体系研究与局部地区的岩性研究包容在内，其目的是避免内容过于庞大和尊重原创始人的命名。但是作者确信，随着科学的发展，一定会有新的学科分支发展起来。

作为一门独立科学，应当区别3个方面。1是它的理论基础，2是它能解决哪些问题，3是它采用哪些技术。这三者中最重要的是第一个。现就这3个方面作如下讨论：

一、理论基础：作为一门边缘科学，应当具备两个方面的理论基础，并把它们紧密结合起来。地震地层学的理论基础包括地层学（含沉积学）和地震理论。前者主要是各种地层界面的形成机制、展布特征，碎屑岩和碳酸盐岩的沉积体系和沉积体类型，与油气圈闭及其它沉积矿产有关的地质异常体的形成规律及沉积特征。后者主要指弹性波的产生、传播、反射、吸收、衰减和干扰特征，地震反射波的动力学（速度）和运动学参数（振幅、频率、相位、极性、泊松比）特征。这两方面的结合点应当放在与油气或其它矿产有关的各种地质异常体或异常界面的地震反射特征上。有人说，地震地层学解释主要是识别各种异常体，这是有一定道理的。但是，由于地质条件的复杂性，在目前条件下，许多地质现象的解释无法作出肯定性结论。因此，模型的理论在地震地层学研究中占有重要地位。此外，还应熟悉地震资料的采集和处理过程，以免落入错误解释的陷阱。

二、应用范围：地震地层学方法既可以用于找油、找气，也可以用于寻找煤、水、沙、沉积式铁铝、锰、磷等沉积矿产。甚至还可用于工程地质、水文地质和考古事业。地震地层学所能解决的地质问题很多，主要有：

1. 查明地层界面，它们的接触关系，并进而划分地层。
2. 研究区域构造发育史、沉积发育史、海面升降史、热演化史。
3. 恢复古水流体系、古沉积体系、推断古沉积环境。
4. 研究古地貌、确定古河道、三角洲、扇、礁、各种刺穿体（火成岩、盐丘、泥岩刺穿），并研究它们的成因和分布规律。
5. 确定有利构造特别是地层圈闭的位置、类型、规模，指导勘探部署。
6. 判断地层的岩性、物性、所含流体类型、直接检测油气的存在、判别死油区，预测地层压力、判断流体运移方向，进行油藏评价和提高开发效率。
7. 找寻另一种蕴藏量巨大的天然气资源——天然气水化物。
8. 为找水、找沙、找其它沉积矿产、工程地质、海底工程服务。

地震地层学是应油气勘探的需要逐步发展起来的一门科学。其中心任务是找寻可能储存油气的圈闭，尤其是隐蔽圈闭。油气勘探工作是由三个层次的工作构成的一项系统工程，它

们是：①对沉积盆地进行全面的构造运动史、沉积发育史、油气形成史的分析，确定有利的油气聚集带；②在有利油气聚集带上确定有利构造和非构造圈闭的位置、类型、规模；③详细解剖有利圈闭的储油物性、含油气性、压力系统，作出油气评价，提出具体钻探方案。衡量一个地区勘探形势好坏的标准，除了已出油的井外，就看它的后备圈闭、后备井位和后备储量准备得是否充分。当然，指导这项系统工程的理论基础是石油地质学。然而，就目前的技术水平来说，地震地层学则是统领这一系统工程的核心或中枢。这一方面是由于地震地层学的研究包容了从区域地层划分到油气圈闭评价的各个方面，另一方面又通过地震地层学研究提出的问题，把各项研究工作有机地联系起来，统一到找油、找圈闭、定井位这一中心任务上来，以达到加速油气勘探、提高探井成功率的目的。下表说明了地震地层学在油气勘探系统工程中的地位和它与其它科学的关系。

油气勘探系统工程

阶段	任 务	与其它学科的关系	
普查 (定有利地带)	查明区域构造背景	地 震 地 层 学	地 层 学 古 生 物 学 构 造 地 质 学 沉 积 学 矿 物 学 石 油 地 质 学 石 油 有 机 地 球 化 学 油 层 物 理 学 地 震 勘 探 重 、 磁 、 电 法 勘 探 测 井 计 算 机 科 学 钻 井 工 艺
	划分地层、研究构造发展史、海平面升降史，确定有利层位		
	重塑沉积体系、查明总体岩性分布确定有利沉积体		
	研究热力史确定有利生油区段		
	研究压力系统、建立压力场，确定有利聚油部位		
精查 (评价圈闭)	确定有利圈闭的部位、类型	地 震 地 层 学	地 层 学 古 生 物 学 构 造 地 质 学 沉 积 学 矿 物 学 石 油 地 质 学 石 油 有 机 地 球 化 学 油 层 物 理 学 地 震 勘 探 重 、 磁 、 电 法 勘 探 测 井 计 算 机 科 学 钻 井 工 艺
	确定圈闭边界		
	检测圈闭中是否有油气存在		
	评价圈闭中的储油物性		
	定出风险最小的探井井位		

三、地震地层学所采用和涉及的主要技术包括有：1.地震资料的采集、处理和显示技术。2.野外露头、岩心、测井等资料的地层学、沉积学研究技术。3.三维地震、垂直地震剖面、横波勘探技术。4.计算机的资料处理、显示、自动解释、地震模型技术等等。

计算机科学使地震勘探技术发生了革命性的变化，促成了地震地层学的诞生。这种地下成象的科学把地质学推向高技术的阶梯。使地震勘探不再满足于构造解释，而进一步用于确定地下的岩性、物性和含油性。同时使地质学家在油气勘探的推理解释中，减少了许多主观猜测的成分，并通过地下图象更直观地判断地下地层，构造和油气藏的形成条件。

然而，地震地层学也不是万能的，它还是个十分年青和不成熟的学科。一方面受着天然条件的限制（有些是无法克服的），一方面在技术上还有待提高。例如，分辨力上的限制，讯噪比有待提高，更多的参数有待开发和利用，数据的采集、处理、显示和自动解释技术有待改善。因此，我们应当对这种情况有清醒的估计，以谨慎的态度，积极地推动这门科学向前发展。

最后谈一下学习问题。一本书自然要讲些技术方法，而人们又习惯于看重方法的学习，以为学会方法就可以应付一切了。但作者认为，方法的学习固然重要，但更重要的是学会科学的思维，或者说“创造性思维”。Sheriff (1977) 曾经谈到：“地震资料的地层学解释究竟是一种技巧呢还是一门科学？目前它主要是技巧——识别反射图案并且发挥想象力。但是，它是一种有约束的技巧，受一些基本因素的限制。对地震资料做出成功的地层学解释必须是3个要素的结合：原理、经验和想象力。”一个成熟的石油地质家是充分理解这几句话的价值的。所谓原理应当是地质学（特别是地层学、沉积学、石油地质学）和地震勘探的理论。所

谓经验，除了地震勘探经验外，很重要的是多研究些地层和各时代沉积的特征。所谓想象力，绝不是幻想、空想。而是在综合大量实际资料基础上的科学的联想、推理和判断，与前二者比较，它是个更重要的创造和升华过程，这个过程是任何科学研究中所不可少的。只不过在地震学研究中对它的要求更多而已。我国自1979年大规模开展地震地层学研究以来，取得了长足的进步，把石油地质研究提高到一个更高的水平。但在个别地区至今未能摆脱单纯的构造物探的局面，除了技术条件、资料质量不能满足要求外，不能正确地领会地震地层学的研究内容和思维方法也可能是一个重要因素。

作为一本教材，不可能包罗万象。因此，本书是按照地震地层学解释基础这一思路编写的。它包括地震地层学研究中涉及的地质理论基础和地球物理基础两个方面。我们力图以这两个基础为基本线索组织我们的内容，而把一些具体方法溶化于它们当中。但是当我们着手编写时碰到了很大的困难。为此，我们把它分成两大部分，第一部分是区域地震地层学，它是在简单地介绍一些物理原理的基础上，着重从地质、特别是从地层学和沉积学的概念出发，研究一个盆地、一个较大地区的研究方法。第二部分是局部地震地层学，或者叫圈闭地震地层学。着重从速度、振幅、频率、泊松比、极性和衰减等物理概念出发，研究局部地段的岩性、所含流体性质等方面的问题。我们有意把较多的物理概念放到这一部分讲授。并没有否定地质概念的重要性。而是力图在了解物理原理的基础上，把它们的地质情况研究得更深入。

有人曾建议，把构造地震解释囊括到教材中。但是考虑到份量太重，我们只对和地层有密切关系的构造现象（盐丘、泥岩刺穿、重力滑动等）略加阐述。由于种种原因，有些章节我们无法引用更多的国内资料、实例和图件，深感遗憾。我们相信这种状况今后会得到改善。

本书编写的分工是：绪论、层序地层学与海平面升降曲线的编制、碳酸盐岩地震相分析、地震模型、分辨率和地震道属性分析、三维地震资料解释由徐怀大编写。层序划分、碎屑岩地震相分析由王世凤编写。地震速度分析及碳氢检测由陈开远编写。初稿中还有徐怀大编写的地震剖面的形成和地震地层学研究对地震数据采集和处理的要求两章，由于篇幅及经费的限制，不得不忍痛割爱。读者如有需要，可参考有关书籍。此外，由于经费有限，许多彩色插图，不得不用黑白图代替。本书由徐怀大定稿。

初稿完成后，中国科学院地球物理所所长刘光鼎教授和中国石油大学张厚福教授仔细审阅了全书，并提出了很好的修改意见。刘光鼎教授还为本书作了序。作者对他们的帮助深表谢意。作者还要感谢为本书的编审、绘图、打字等出版工作付出辛勤劳动的蔡挥芬、耿小云、龙祥符、王润斋、张咏梅、王小川、杜宁平、唐核之、张红波、王香莲、文丽丽等同志。

地震地层学是一门涉及面广、发展迅速的边缘和前沿科学。我们深知自己的知识不足，力量有限。书中不足之处，望读者多加指正，以便再版时修改补充。

第二章 层序地层学与地震层序划分

一、前言

地层学是地质学的基础。地层划分是地质学研究的基础。地质学是因地层学的诞生而发展起来的。最古老的是生物地层学。后来发展出岩石地层学、同位素地层学、古地磁地层学、年代地层学、旋回地层学、事件地层学、测井地层学、地震地层学。最近几年,又发展出层序地层学(sequence stratigraphy)。更有人(Brenner, 1988)推出综合地层学(integrative stratigraphy)一词。其实质是将所有地层学的新进展结合起来,从成因上和分布规律上重新认识不同类型地层的形成与分布特点。地层学近年来的进步,将推动地质学的向前发展。其重要意义不亚于板块学说对地质学的影响。

二、层序地层学

(一)层序地层学的定义

层序地层学是P. R. Vail等人于1987年在地震地层学的基础上提出的。据P. R. Vail和J. B. Sangree (1988)定义,层序地层学是“根据地震、钻井和露头资料,结合伴生的沉积环境和岩相特征,对地层分布模式作出的综合解释。层序地层学的解释过程推出一个旋回式的、在成因上有联系的年代地层格架(chronostratigraphic framework),这些地层以侵蚀作用或者无沉积作用造成的不连续地层界面为界,或者以与这些不连续面可以对比的整合面为界。在这个年代地层格架中,在解释过程中得出沉积环境及与之相伴的岩相分布。这些岩相单元可以是以地层表面为界的同时代的地层间段,也可以以斜穿地层表面的穿时地层间段方式产出。”

层序地层学中有4个最基本的变量,它们控制了地层单元的几何形态、沉积作用和岩性。它们是:

变量	控制作用
构造沉降	可供沉积的空间
全球海平面升降	地层和岩相分布模式
沉积物供应	沉积充填和古水深
气候	沉积物类型

以上诸变量中,由构造沉降与全球海平面升降导致的海平面相对于盆地边缘的位置,是地震地层学的基础。

(二)构造沉降、沉积物供应、全球海平面升降三者间关系

一个地区的构造沉降速度、沉积物供应速度和全球性海平面升降速度三者之间相互影

响，最终导致该地区海平面相对于该地区陆棚边缘的相对变化速度，即相对海平面的升降变化。Vail等人（1974，1977，1985）先后提出过几个模式，并从中导出几个重要的基本概念。

图2-1表示海平面相对于陆棚边缘的关系。设一盆地的陆棚边缘以均速缓慢下沉，设陆源碎屑沉积物的供应能够及时充填由于海平面变化所腾空的空间，则当海平面上升时，开始沉积物以海岸上超（coastal onlap）的形式（海进形式）逐渐超覆到陆棚边缘上。随着海平面的继续上升以及上升速度的减缓和停滞，开始出现沉积物及陆棚边缘逐渐向海向方向推进（前积现象或海退现象），这一时间统称高水位期（图2-1(a)）。随后，当海平面快速下降到陆棚边缘以下时，陆棚暴露水面，陆源碎屑只能以海岸上超的方式沉积到陆棚边缘以外的盆地内，此为低水位期（图2-1(b)）。

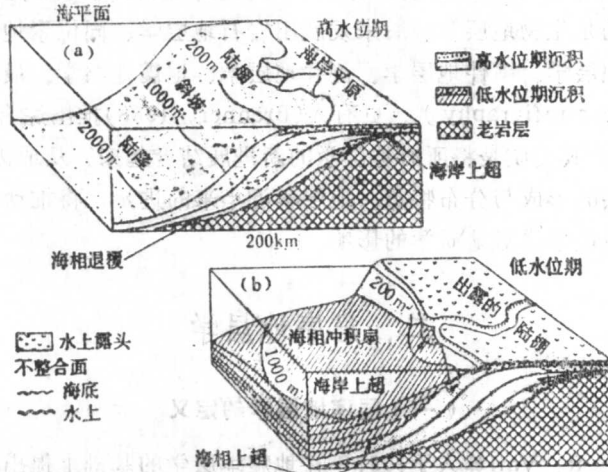


图2-1 海平面变化相对于陆棚边缘的关系
(a)高水位期 (b)低水位期(据Vail等, 1974)

大量的实际资料表明，地质历史中海平面相对于陆棚边缘的升降变化是频繁出现的。因此，必然导致沉积物类型和它们所处位置在三度空间（特别是相对于陆棚边缘而言）的有规律变化。而研究沉积物在三度空间中的展布模式，恰恰是层序地层学的核心任务。

图2-2、2-3为一沉降的被动大陆边缘在周期性海平面升降影响下的沉积层序和沉积物类型的分布模式。图中数字0至25代表和沉积表面的地质时代。设海平面变化为规则的两个半周期。由图可以归纳出如表2.1所示的沉积特征。

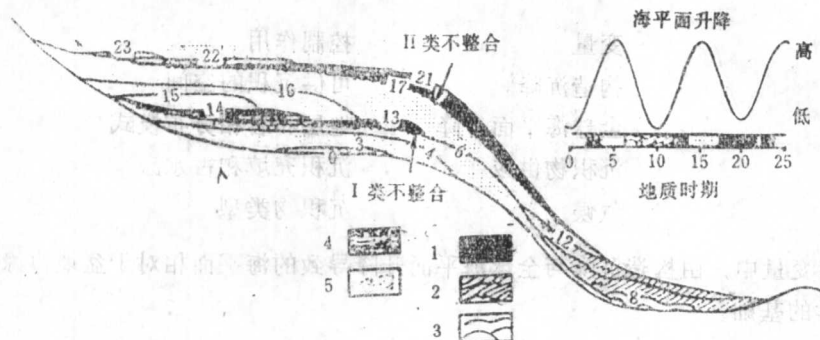


图2-2 沉降型被动大陆边缘沉积层序分布模式
(据Vail等, 1985)

1. 陆架边缘楔状体 2. 低水位期楔状体 3. 低水位期扇 4. 海进海岸沉积 5. 高水位期海退沉积

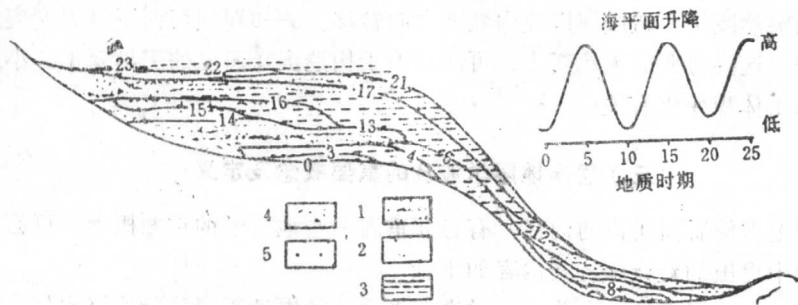


图2-3 沉降型被动大陆边缘沉积物类型分布模式

(据Vail等, 1985)

1. 冲积砂岩和页岩 2. 三角洲平原, 三角洲前缘和海岸砂层 3. 三角洲斜坡页岩, 海相陆架页岩
4. 低水位期楔状体, 夹有薄层浊积岩和深海页岩 5. 低水位期扇体

表2.1 海面升降周期对沉积的影响

地质时代	海面升降状态	海岸线移动	沉积特征
1-3	迅速上升	以上超方式迅速海进	相对海平面从陆架边缘开始, 而后相对陆架表面迅速上升。在陆架上发育了海进沉积
3-6	上升缓慢, 之后转向缓慢下降	继续上超, 但开始海退, 之后加速海退	跨过陆架依次分布为三角洲、海岸、河流及冲积沉积物的海退沉积
6-8	迅速下降	极快地降落到陆架边缘或更低	河流下切至陆架, I型不整合发育。沉积物局限于深水中。沉积物为典型的远离陆架边缘沉积的砂、砾深水流
8-12	下降缓慢, 之后反转为缓慢上升	海岸线停留在或接近陆架边缘	沉积物包括: 陆架边缘三角洲, 陆架上的凹穴和峡谷, 充填在陆架或跨盆地相邻部分分布的重力滑塌、滑动和浊积岩
12-14	迅速上升	以上超方式迅速海进	与1-3期类似。海进作用以上超到陆架上的最大延伸程度的海相沉积楔而告结束。14期后开始发育密集段
14-17	上升缓慢, 随后转为缓慢下降	继续上超, 但海退开始, 之后加速海退	与3-6期相似。跨过陆架继续前积, 并最终可能使三角洲前缘沉积物溢注到深水中
17-21	迅速下降, 之后处于低水位并缓慢上升	极快地下降到陆架中部并停留在该处附近	海退式三角洲沉积物前积到陆架中部和外部。如果海退的足够远, 有些三角洲前缘沉积物可以溢流到盆地斜坡上
21-23	迅速上升	以上超形式迅速海进	与1-3及12-14期相似
23+	上升缓慢, 之后转为缓慢降落	海退开始	与3-6及14-17期相似

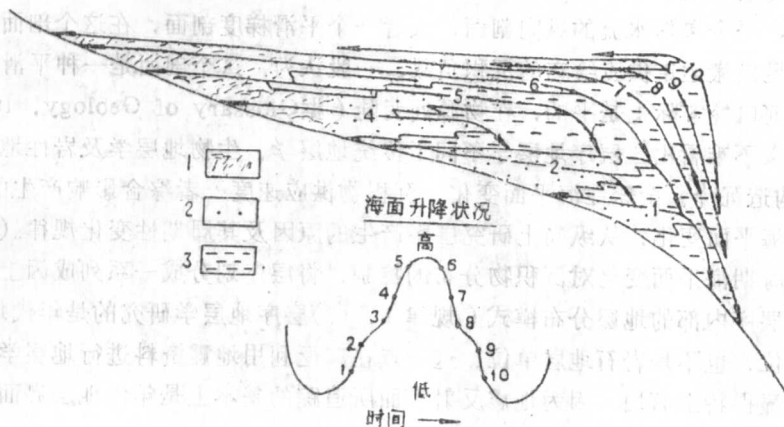


图2-4 海面升降速度变化的影响示意图

1. 冲积沉积 2. 海岸—三角洲沉积 3. 前三角洲到深海沉积

图2-2与2-3中的海平面升降是圆滑的。当海平面升降不是圆滑而是突然变动时,海岸线的位置也将突然转移,从而出现复杂的海平面升降周期曲线。如图2-4所示。图中2—3期间,海平面上升速度突然减慢,造成海岸线向盆地方向转移。8—9期间海面下降速度突然减慢,造成短期的海进。这些短期的突然变化,可能起因于构造沉降速度的突然变化。小规模的变化可能与冰川体积变化有关。

(三) 层序地层学涉及的重要概念及定义

为了更好地理解后面所讲的内容,有必要重温一些地层学的重要概念,更有必要明确一些层序地层学中提出的新概念。其内容如下:

层序地层学:地层学的一个分支。讨论海平面升降周期不同阶段(高水位、低水位、海进期)形成的成因上有联系的沉积层序(据Haq, Hardenbol, Vail, 1989)。

层序:一套相对整合的、成因上有联系的、其顶和底面以不整合面或者与这些不整合面可以对比的整合面为界的地层(据Vail等, 1977)。层序是在海平面升降周期曲线上相邻的两个下降速度转折点之间沉积的,它由一套体系域所组成。

不整合:一个重要的时间间断面,这个面的特征是暴露到水上和具有水上(有时为水下)侵蚀削截现象(据Vail, Hardenbol, Todd, 1977)。

沉积体系:一串在现仍积极作用的(现代的)或者推测的(古代的)沉积作用和沉积环境(三角洲、河流、障壁岛等)从成因上联系到一起的岩相组合(据Brown, Fisher, 1977)。

体系域:一串同时期的沉积体系(据Brown, Fisher, 1977)。每个体系域都与海平面升降周期曲线上的特定段相伴生(海平面迅速下降期——低水位扇,海平面上升——海进体系域,等)。

密集段:以沉积速度极低为特征的一种薄的海相地层层段(沉积速度小于1—10mm/1000年)(据Vail, Hardenbol, Todd, 1984)。它们是半远洋和远洋沉积物组成,缺乏陆源碎屑物质,是在海平面相对上升最大、海岸线海侵最大时期在外陆架、陆坡和盆地底部沉积的(据Loutit, 1986)。

可容纳空间:可供潜在的沉积物堆积的空间(据Jervy, 1989)。

平衡点:沿一剖面上的一个点,这点上海平面变化速度与沉降速度相等。它把海面相对上升带与相对下降带分开。

平衡剖面:一个递降水流的纵向剖面,或者一个平滑梯度剖面,在这个剖面上的每个点处的水流,都足以搬运走供应给它的沉积负载。一般认为,这个剖面是一种平滑的、向上凹的抛物线,在河口处实际上是平的,在物源处变陡(据Glossary of Geology, 1974)。

由上述定义不难看出,层序地层学不同于传统地层学、生物地层学及岩性地层学之处,在于(1)通过构造沉降、全球性海平面变化、沉积物供应速度三者综合影响产生的相对(相对于陆架边缘)海平面变化,从纵向上研究层序产生的原因及其周期性变化规律。(2)通过研究一个层序沉积时期海平面变化对沉积物分布的控制,将层序划分成一系列成因上有联系的体系域,建立了层序内部的地层分布模式(规律)。(3)层序地层学研究的是年代地层单位,不是生物地层单位,也不是岩石地层单位。这一点在广泛利用地震资料进行地层学研究和油气勘探时,尤其显得特别有用。因为地震反射界面所追踪的基本上是年代地层界面(将在后面讨论)。

在上述诸概念中,最重要的是体系域和密集段,

(四) 层序内部结构及体系域的配置关系

为了解层序的内部结构，首先需要明确沉积物沉积时的地形特征。图2-5为碎屑岩层系在高水位晚期（亦即层序底界面的低水位期开始前的古地形剖面。图中最重要的地段是沉积海岸转折点（depositional coastal break），或者称作陆架边缘、陆架边角，它是区分体系域的关键部位。

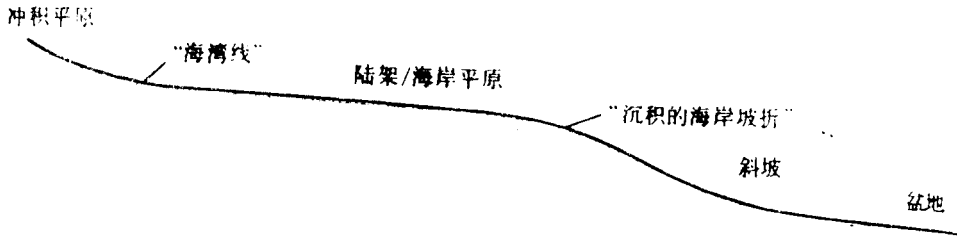


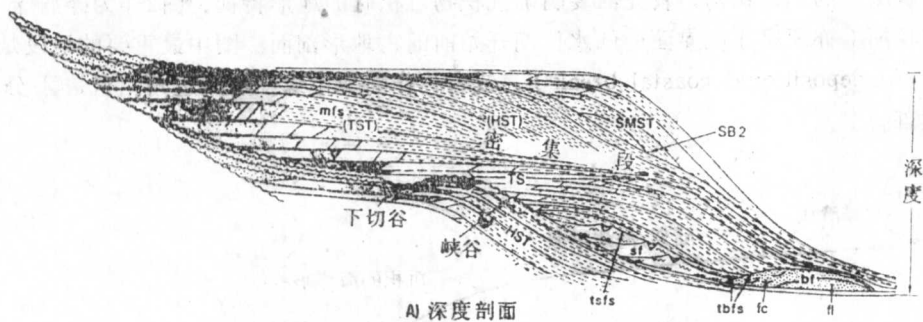
图2-5 碎屑岩层系高水位沉积期晚期的沉积地形

陆架	水深(m)
沉积的海岸坡折	0—10: 非海相, 半咸水, 海湾
平均砂边界: 三角洲前缘	10 晴天浪基面
最大风暴三角洲前缘砂	30 平均风暴浪基面
前三三角洲和盆底浊流的深水砂	50 最大风暴浪基面
	半深海—深海

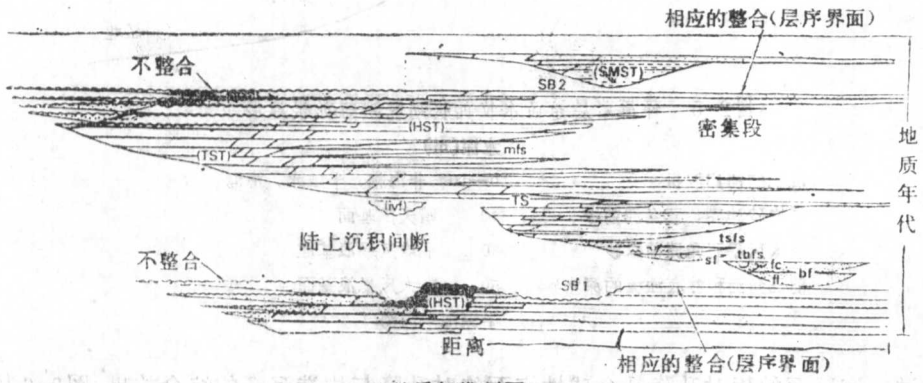
前面讲过，海平面的相对升降是全球性海面绝对升降与构造沉降的综合效果。图2-6为三者的关系。根据定义，每个层序都是从一个不整合面（图2-6中SB1）或者说从一个海平面急剧下降（下降速度最大的转折点处）产生侵蚀的时刻开始形成的。而结束于下一个海面急剧下降的转折点（图2-7中SB2）。在SB1与SB2之间，依据沉积物展布范围是局限于陆架边缘以下，还是陆架边缘以上，划分为低水位体系域（LST）、海进体系域（TST）和高水位体系域（HST）。注意，层序顶底不整合界面有两种形式。当侵蚀范围延续到陆架边缘以下时，称作Ⅰ型不整合或Ⅰ型层序界面。当侵蚀范围局限于陆架以上没有延续到陆架边缘以下时，称作Ⅱ型不整合或Ⅱ型层序界面。图2-7中SB1为Ⅰ型界面，SB2为Ⅱ型界面。Ⅰ型层序界面之上为低水位体系域。Ⅱ型层序界面之上为陆架边缘体系域（SMST）。因此，由LST、TST、HST组成的层序称Ⅰ型层序。由SMST、TST、HST组成的层序称Ⅱ型层序。

图2-6为层序内部结构的立体模型。图中低水位体系域分布在陆架边缘以下的低处，它包括有盆底扇、带有天然堤的斜坡扇、楔形前积复合体，有时还有滑塌扇、滑移体等沉积体。低水位体系域的另一特征，是在陆架上出现切割谷（incised valley），在陆坡的上段出现海底峡谷（canyon）。它们通常下切到较老的下伏层序的高水位体系域内。下切谷和峡谷中可以充填着海进体系域的沉积或者低水位体系域上段的沉积，通常缺失低水位体系域下段沉积物。海进体系域沉积物以海进方式，逐步向陆地方向进侵，在朝海方向迅速减薄（非补偿沉积）。海进体系域中的每个层面都代表一次海进，称海泛面。当海泛达到最大后，开始了高水位体系域。由于高水位期的海平面上升速度逐渐减缓，因此，高水位体系域的特征是逐步向海推进的前积型海退沉积，直至第二次海平面迅速下降、产生新的不整合（可以是Ⅰ型，也可以是Ⅱ型，但在地质历史中，多数是Ⅰ型），并开始下一个层序的低水位体系域为止。

图2-7中另一个重要现象是密集段，出现在高水位期沉积与海进及低水位期沉积间的下超



A) 深度剖面



B) 地质年代剖面

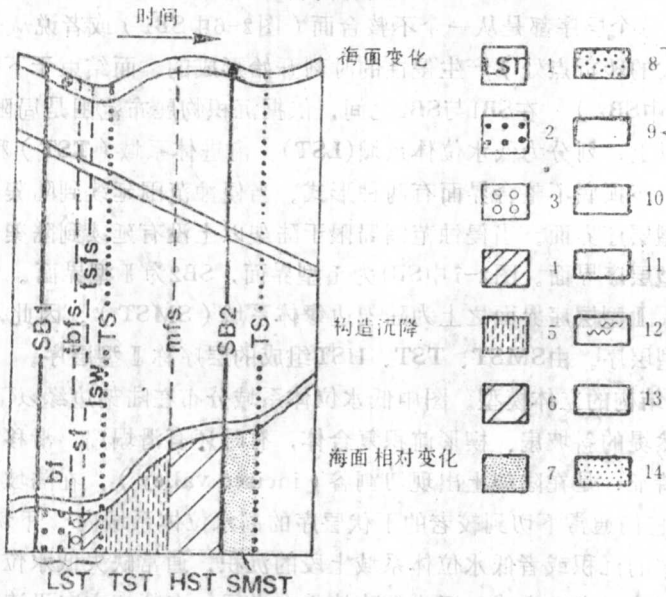


图2-6 陆质碎屑岩层序地层学沉积模型及层序分布框架

(据Haq等, 1986)

1. 低水位体系域 2. 低水位盆地洪积扇 3. 低水位陆坡扇 4. 低水位楔状—前积复合体 5. 海进体系域 6. 高水位体系域 7. 陆架边缘体系域 8. 冲积相 9. 海岸平原相 10. 河口湾/河流相 11. 滨岸/三角洲相 12. 海相粉砂、泥岩 13. 海相页岩 14. 深水砂岩

面上。密集段有两层重要性。一是它所代表高水位期沉积体系域的前三角洲细粒沉积往往作为重要的生油岩覆盖下伏的海进及低水位储油岩上，可以形成各种类型的油藏。一是由于高水位沉积覆盖在年龄不同的海进和低水位沉积上，因此，在朝海或深水方向，同样可以形成年代跨度不等的沉积间断。这点在理解复杂的地层缺失原因上极为重要。为了深入理解这一点，请参阅图2-7，2-8，2-9。

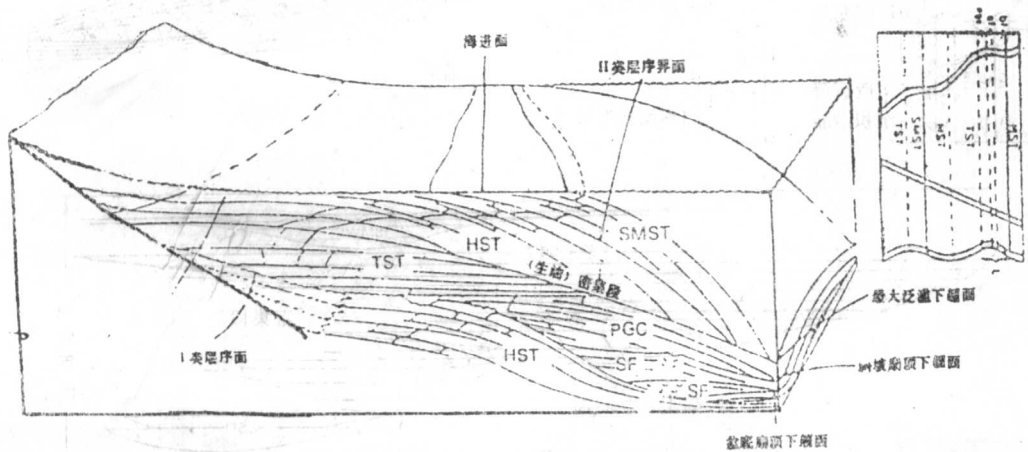


图2-7 硅质碎屑层序模型立体图解

体系域	低水位体系域
陆架边缘体系域(SMST)	进积复合物(pgc)
高水位体系域	斜坡扇(sf)
海进体系域(TST)	盆底扇(bf)

密集段的出现并不仅限于图2-7中所示的位置上。在其它的下超面（如海进体系域与低水位体系域之间，低水位前积楔与低水位斜坡扇之间、斜坡扇与盆底扇之间）上，都有密集段存在，但其规模较小。

密集段代表时间跨度很长但沉积速度极慢条件下的非补偿缺少物源的沉积。由于沉积物与海水的长期接触引起的各种原生作用与成岩作用，因此，在硅质碎屑岩层系的密集段中，常常出现纸状页岩、丰富的海相微古或超微古生物、自生海绿石、菱铁矿、海绿石、磷灰石、原生的白云岩、极低的电阻，高的自然伽玛，它的部位常常处在大段泥岩的底部（我国东部油田常称作泥脖子段，如沙一段的泥岩段，沙三段的泥岩段，阜宁组四段的泥岩段等）。

由图2-7可以看出，密集段实际上是不断前积的穿时的前三角洲细粒沉积。深入分析密集段内的分层，对于打破传统概念正确对比地层具有极其重要的意义。

上述图2-7至2-9都是在具有陆架边缘的构造和古地理背景下的层序特征。除陆架边缘外，还有两种背景：斜坡背景和拉张型半地堑生长断层背景。后者在中国东部尤为普遍。这两种背景下的低水位体系域层序地层模型如图2-10B、C所示。

实际的层序划分工作，需要把露头研究、测井曲线分析与地震剖面解释三者结合起来。在结合的过程中，还需要古生物（特别是微古和超微古生物）、古地磁、同位素年龄测定的配合。同时，还要通过合成记录的编制，把测井资料与地震资料联系起来，确认每个反射同相轴的地层层位和其它地质属性。关于地震反射界面的地质意义将在下节讨论。关于古生物、古地磁、同位素年龄的研究请参阅有关文献。