

“九五” 中国石油天然气总公司级重点教材



层序地层学

朱筱敏 编著
● 石油大学出版社



层序地层学

朱筱敏 编著

石油大学出版社

内 容 提 要

本书系统阐述了经典层序地层学、陆相湖盆层序地层学、高分辨率层序地层学和成因地层层序的基本原理和概念体系,详细描述了被动型和主动型盆地海相碎屑岩和碳酸盐岩层序地层、坳陷型和断陷型陆相湖盆层序地层样式,明确了层序地层学研究成果在油气田勘探开发中的应用前景,讨论了层序地层研究内容和综合研究方法,分析了控制层序地层构型的主要因素。本书不但注重不同学派层序地层研究的系统理论性,而且强调了层序地层学在油气勘探开发中应用的实践性。

本书不仅可以作为高等院校研究生及本科生的教材,而且可以供从事沉积学、石油地质学、含油气盆地分析等地质学科的科研技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

层序地层学/朱筱敏编著. -东营:石油大学出版社,2000. 4
ISBN 7-5636-1335-8

I. 层… II. 朱… III. 地层层序-地层学 IV. P53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 17368 号

层序地层学

朱筱敏 编著

责任编辑:李 锋(电话 0546—8392139)

封面设计:傅荣治

出 版 者:石油大学出版社(山东 东营,邮编 257062)

网 址:<http://sunctr.hdpu.edu.cn/~upcpres>

电子信箱:upcpres@sunctr.hdpu.edu.cn

印 刷 者:石油大学印刷厂

发 行 者:石油大学出版社(电话 0546—8392563)

开 本:787×1092 1/16 印张:13.625 字数:362千字 插页 4

版 次:2000年4月第1版第1次印刷

印 数:1-1000册

定 价:22.00元

序

20 世纪 80 年代诞生的层序地层学被认为有可能为沉积岩分析的应用提供一个完整统一的地层学概念,它像板块构造学说曾经提供一个完整统一的构造概念一样,改变了分析世界地层记录的基本原则。因此,它可能是地质学中的一次革命,开创了了解地球历史的一个新阶段。

80 年代末引入我国的由研究被动大陆边缘盆地而建立的层序地层学理论和方法,在我国陆相盆地的研究中得到了充实和完善。朱筱敏教授通过阅读大量国内外资料和亲身实践而总结编写的《层序地层学》即将问世,在付印之前本人有幸先读了朱筱敏教授的著作,颇有感想。本书以层序地层学的基本原理为主线,以在层序地层学原理指导下的油气勘探和开发为目的而层层展开,把地质(包括地下的和露头的)、古生物、同位素测年、地震、测井、油藏模拟和油藏工程等多种学科全面有机地统一起来,并娴熟地进行应用。反映出编者功底的扎实和有关层序地层学知识的广博,并体现出编者对层序地层学研究的独到深入的见解。而且编者以其科学合理的思维和深刻的了解从浩如烟海的文献中进行重点选取并加以去粗取精、去伪存真地筛选、整理和组合,通过精湛的笔调和流畅的语言文字把深邃的层序地层学理论阐述得通俗易懂,读来朗朗上口。

本书包括第一章绪论、第二章至第九章、结论和参考文献等十一个部分。绪论提纲挈领地介绍了层序地层学的发生、发展的历史过程,对国际地学界的影响及其理论性和实践性,对当前层序地层学研究中所面临的问题和争论的症结作了综合的分析;对层序地层学发展的未来进行了展望,特别是对中国层序地层学研究的进展作了实事求是的分析和乐观的预测,这对广大层序地层工作者是一个鞭策和鼓励。

第二章“层序地层学基本原理”以 Vail 等学者的沉积层序地层学理论为依据,抓住了层序地层学的基本原理、概念体系这个核心,对大量新名词、新概念进行了严格的定义和解释,概念清晰,保持了原汁原味;对全球海平面在地质历史过程中的变化情况及其周期性以及由此而产生的层序级别进行了分析,提出了一些值得商榷的问题。

第三章“准层序和准层序组”中,编者抓住了层序地层学研究中最重要而且易出问题的结点和基本单元单列一章进行论述,可见编者的用心良苦。在这一章中细致地论述了准层序和准层序组的沉积特征、准层序边界识别、空间相变关系,特别强调了准层序(组)概念应用在地层对比中的作用及其准确性、客观性,对指导地层对比具有重要意义。

第四章至第六章是本书的重点,也是层序地层学理论和概念具体在海相碎屑岩、海相碳酸盐岩和陆相湖盆沉积中的应用,检验理论在解决实际问题中的效果。由于不同环境中层序地层形成的主控因素的不同、概念格架的差异,需要全面考虑各种因素,通过不同的方法,建立不同的模式,有针对性地去解决不同的问题,不能生搬硬套,而是要依据实际情况作创造性的总结和升华。

第七章“高分辨率层序地层学”和第八章“成因地层层序分析”是在全面介绍沉积层序地层学的基础上对不同学派的理论进行介绍和分析,实事求是地介绍了高分辨率层序地层学和成因地层层序分析的理论基础和基本概念及在油气勘探中的意义,使读者开阔眼界,增长知识。

第九章“层序地层学研究方法”明确地提出了层序地层学的研究内容和必须采用的方法。

内容丰富,条理清晰,方法新颖科学,涉及的学科面广,确实能解决实际问题,使读者感到虽身处波涛连天的岸边,但对到达彼岸却毫无畏惧,充满信心。

总之,该书资料丰富详实,定义论述科学正确,语言表达简明流畅,理论与实例紧密结合,图表精美,是一本全面、系统地论述和介绍层序地层学原理与实际资料的优秀著作。是从事沉积学、石油地质学、沉积盆地分析以及一切从事沉积矿藏勘探的研究人员和研究生研究和学习的良师益友。该书的出版必将推动我国海陆相层序地层学的发展,为沉积矿藏的勘探发挥重要作用。

中国石油天然气集团公司勘探开发科学研究院

顾 家 裕

1999 年 11 月于北京

前 言

当代地球科学正在不断地朝着全球化、科学化、综合化和数量化的方向发展,这就要求人们不断地修改传统的地质观点,充分地利用多种信息,使众多地学分支学科相互交叉渗透,产生新的边缘学科,以满足或适应地球科学的迅速发展。20 世纪 80 年代末期诞生并被人们广为接受的层序地层学正是顺应了地球科学发展的历史潮流,它的出现在沉积学、地质学以及一切与沉积岩相关的科学领域引起了极大的震动。层序地层学概念在沉积岩分析中的应用有可能提供一个完整统一的地质学概念,就像板块构造学说曾经提供一个完整统一的构造概念一样。层序地层学改变了分析世界地层记录的基本原则,因此,它的出现可能是地质学中的一次革命,开创了了解地球历史的一个新阶段。

层序地层学是研究以侵蚀面或无沉积作用以及可对比的整合面为界的、具有成因联系并具有旋回性的、地层年代格架内岩石关系的一门地质学科。它不但提出了一套全新的概念体系,而且所划分确定的层序和体系域与特定的沉积体系、岩相和油气富集地区密切相关。它能提供一种更准确的年代地层对比框架,通过恢复古地理面貌,在钻前预测烃源岩、储集层和盖层的组合关系,预测潜在的地层岩性油气藏分布区和可能的成藏组合。很显然,尽管层序地层学发展历史很短,但它已在地质理论研究和寻找沉积矿产等诸多方面展现出了强大的生命力,已在全球范围内掀起了层序地层学研究的热潮。因此,有必要总结国内外不同学派层序地层学的研究成果,结合中国海陆相盆地具体地质特征,编著《层序地层学》教材,以发挥层序地层学在推动地球科学发展、产生新兴边缘交叉学科、提高沉积矿产勘探开发效率等方面的积极作用。

基于上述多方面原因,本教材不仅介绍了不同学派层序地层学的基本理论和概念体系,而且强调了如何利用露头、钻井、测井和地震资料以及大量室内分析资料进行层序地层分析,建立层序地层样式,寻找地层岩性圈闭的勘探方法和技术,努力使层序地层学基础理论与生产实践紧密结合起来。本书共由九章构成。第一章简明介绍了层序地层学的形成和发展,以及层序地层学面临的问题和发展趋势;第二章阐述了层序地层学的理论基础和概念体系,指出了全球海平面变化特征及其与层序之间的关系;第三章表述了层序内部准层序和准层序组的基本特征;第四章从被动型和活动型边缘盆地类型出发,详细讨论了不同地貌形态盆地的层序地层样式及其与油气勘探的关系;第五章根据碳酸盐岩沉积背景,阐明了缓坡型、斜坡型和孤立台地型碳酸盐岩的层序地层特征;第六章在总结对比海陆相盆地地质特征的基础上,讨论了坳陷型和断陷型湖盆层序地层样式及其与油气勘探的关系;第七章和第八章分别介绍了高分辨率层序地层学和成因地层层序的理论基础和基本概念,以及在海陆相地层研究中的应用;第九章介绍了层序地层学的基本研究内容、层序边界识别标志和层序年代标定的方法,阐述了海(湖)平面升降变化、沉积物供给、盆地沉降和气候变化及可容空间的分析方法,明确了层序地层的综合研究方法。总之,本书的编著注意反映国内外层序地层学的前沿动态;注重介绍层序地层学理论与研究方法,强调不同类型盆地层序地层特征和主控因素的差异性;努力阐明层序地层学与油气勘探开发、提高油气勘探效率的关系。作者希望该书的出版对我国层序地层学研究的进一步深化起到积极作用。

承蒙中国石油天然气集团公司石油勘探开发科学研究院博士生导师顾家裕教授级高级工

程师审阅了书稿并提出了许多宝贵意见。该书的出版得到了中国石油天然气集团公司教材编译室、石油大学出版社、石油大学教务处和地球科学系领导和专家们的大力支持和帮助,在此深表谢意。并感谢黄欣在书稿录入过程中所做的工作。

尽管作者尽力编著这本教材,但由于作者知识水平有限,在编著该书过程中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

1999 年 12 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 层序地层学的形成和发展	1
一、概念萌芽阶段	1
二、地震地层学形成发展阶段	2
三、层序地层学综合发展阶段	3
第二节 层序地层学面临的问题和发展展望	7
一、层序地层学面临的问题	7
二、层序地层学发展展望	9
第二章 层序地层学基本原理	11
第一节 理论基础和概念体系	11
一、层序地层学定义和理论基础	11
二、层序地层学基本概念	13
第二节 全球海平面变化周期	23
一、全球海平面变化曲线特征	23
二、全球海平面相对变化周期与层序级别	25
第三章 准层序和准层序组	29
第一节 准层序特征	29
一、准层序边界和准层序沉积特征	29
二、准层序空间相变关系和形成机理	32
第二节 准层序组特征	36
一、准层序组类型	36
二、准层序组空间相变关系和年代地层对比意义	38
第四章 海相碎屑岩层序地层学	42
第一节 被动型边缘盆地层序地层学	42
一、层序边界及识别标志	42
二、具陆棚坡折的盆地的层序地层样式	49
三、具缓坡边缘和生长断层边缘的盆地的层序地层样式	58
四、海相碎屑岩层序地层与油气勘探	64
第二节 活动型边缘盆地层序地层学	72
一、前陆盆地层序地层学	72
二、前弧盆地层序地层学	79
第五章 海相碳酸盐岩层序地层学	82
第一节 碳酸盐岩沉积背景及其控制因素	82
一、碳酸盐岩沉积背景	82
二、碳酸盐岩沉积控制因素	85

第二节 碳酸盐岩层序地层学	87
一、层序类型和层序边界	87
二、体系域类型及其特征	90
三、碳酸盐岩缓坡层序地层样式	93
四、碳酸盐岩斜坡层序地层样式	96
五、碳酸盐孤立台地层序地层样式	99
六、海相碳酸盐岩层序地层与油气勘探	101
第六章 陆相湖盆层序地层学	108
第一节 陆相湖盆地质特征	109
一、湖盆构造作用与气候变化	109
二、湖平面升降变化	116
三、湖盆的沉积旋回特征	118
第二节 陆相湖盆层序地层学	119
一、坳陷型湖盆层序地层样式	120
二、断陷型湖盆层序地层样式	133
第七章 高分辨率层序地层学	147
第一节 高分辨率层序地层学理论基础	147
一、地层基准面原理	147
二、沉积物体积划分原理和相分异原理	152
第二节 高分辨率层序地层学研究	154
一、海陆相地层高分辨率层序地层学研究	154
二、高分辨率层序地层学与油气勘探	156
第八章 成因地层层序分析	158
第一节 成因地层层序理论基础	158
一、基本概念	158
二、沉积幕与成因地层层序	160
三、沉积层序与成因地层层序对比分析	162
第二节 成因地层层序研究	164
一、海相成因地层层序研究	164
二、湖相成因地层层序研究	166
第九章 层序地层学研究方法	172
第一节 层序地层学研究内容	172
一、层序地层学研究内容和程序	172
二、海平面升降变化分析	172
三、沉积速率、古气候和构造沉降分析	177
四、层序地层构型主控因素分析	180
第二节 层序地层学研究方法	185
一、沉积层序年代标定方法	185
二、可容空间分析方法	189
三、层序地层时频分析方法	191

四、层序地层构型建模方法 196

五、层序地层综合研究方法 197

结语..... 202

参考文献..... 203

第一章 绪 论

第一节 层序地层学的形成和发展

层序地层学是根据露头、钻井、测井和地震资料,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的地层学分支学科。它是划分对比和分析沉积岩的一种新方法。当它与生物地层学及构造沉降分析相结合时,便提供了一种更为精确的以不整合面或与之可对比的整合面为边界的地质时代对比、岩相古地理再造和钻前预测生储盖地层的方法。从本质上讲,层序地层学分析提供了被称为层序和体系域成因地层单元的年代地层格架。这些层序和体系域的几何形态及地层叠置样式是由海平面相对变化造成的,它们与特定的沉积体系和油气产出具有密切的联系。对于油气勘探来说,层序地层学具有良好的理论和实际预测作用。从理论上讲,通过对海(湖)平面相对变化的研究,可以预测尚未钻探地层的年代,预测某些体系域的地层叠置样式和分布范围,科学地推测盆地沉积充填历史和地质发展史。从实际情况来看,通过体系域和沉积岩相分布规律以及高分辨率地震勘探研究,可以预测形成油气藏及其它沉积矿产的有利地区,预测钻前油藏类型和油层产量及已开发油田的扩边和开发效率。因此,层序地层学受到了人们的广泛关注。

层序地层学是一门相对新兴的地层学分支学科,它是在 20 世纪 70 年代地震地层学的基础上发展起来的,它的发展历史大体可以划分为概念萌芽阶段(1949~1976 年)、地震地层学形成和发展阶段(1977~1987 年)及层序地层学综合发展阶段(1988 年以后)。

一、概念萌芽阶段

众所周知,作为地质学发生、发展的核心和理论基础的地层学已有 200 多年的历史了。在全球许多地质学家的努力下,相关的地层学分支学科,如年代地层学、生物地层学、岩石地层学、磁性地层学、同位素地层学、旋回地层学、事件地层学、生态地层学以及定量地层学都得到了迅速、系统的发展。这些地层学分支学科的出现和发展极大地推动了地层学的理论发展和技术进步。在地层学不断发展完善的背景下,与地层学相关的学科,如古生物地史学、沉积学、构造地质学、石油与天然气地质学、煤田地质学、地球化学等学科也得到了快速发展。反过来,它们又促进了地层学的发展与深化。地层学,特别是地层学的核心——国际地层表(或国际地质年代表)成了讨论任何与沉积学有关问题的准绳和尺度。为了维护这一准绳和尺度的权威性,地层学家于 20 世纪 30 年代就推出了国际地层命名和分类指南。为了完善这些地层命名和分类,国际地球科学联和会还在世界各地寻找地层标准剖面,作为最完善的地层对比标准。1960 年,中国地层委员会编著了《地层规范草案及地层规范草案说明书》。1981 年,中国地层委员会又出版了《中国地层指南及中国地层指南说明书》,作为地层划分对比的指南。但是,若深入分析现有国际地层年代表及其指南,就会发现以下两个根本性的问题:①地层表中各代、纪、世、期的命名是人为的、主观的,没有反映出各地质时代的地质特征和它们的内在成因联系。②地层划分指南中提出的生物地层、年代地层和岩石地层是一个三元分类系统,而没有把此三元分类系统统一到带有纵向成因演化特征的年代地层单元这一最根本的客观标准上,从而造成了

各地区地层划分和对比的矛盾以至混乱。当然,在当时的科技水平下,要消除这些矛盾是困难的或者是不可能的。然而不彻底解决上述根本性的两个地层问题,则将会阻碍地质科学的发展,特别是地学在预测性和定量化方面的发展。而 20 世纪 80 年代末期发展并不断完善的层序地层学则试图来说明不同地质时代的地层成因关系。

层序地层学的诞生和发展首先得益于层序概念的提出。早在 1788 年,Hutton 首次指出不整合面是区分隆起、剥蚀和沉积旋回的物理界面。19 世纪中叶,在 Lyell 和 Agassiz(1835, 1840)提出的冰川理论中就初步讨论了海平面变化与构造作用之间的关系。1906 年,Suess 发展了冰川理论并进一步讨论了海平面升降与沉积物上超和下超之间的关系。1909 年,Chamberlin 发表文章,论述了地壳运动控制了世界范围内的海平面变化。从这个意义上,可以认为 Chamberlin 是当代层序地层学的先驱。后来,几位美国地质学家继承发扬了 Chamberlin 的思想,以全球不整合为边界来恢复地质历史时期的沉积环境。令人不可思议的是,L. Sloss、Krumbein 和 Dapples 于 1949 年在同一次学术会议上提出了地层层序的概念,即“层序是以主要区域不整合为边界的地层集合体”,并利用北美克拉通地质资料,在寒武系至侏罗系 8 个系的地层单元中识别划分出了 4 个地层层序,从而开始了以层序作为地层单元来研究地层特征的新阶段。1963 年,L. Sloss 等人又将北美克拉通前寒武纪最晚期到全新世地层划分成以区域不整合为边界的 6 套层序并以印第安部落名称进行命名,以强调层序研究起源于北美。L. Sloss 认为,层序是比群和超群更高一级的岩石地层单位,它不一定适用于克拉通以外和大陆以外地区的岩石地层学和年代地层学研究。尽管克拉通层序概念为当今层序地层学的诞生和发展奠定了基础,但 L. Sloss 的思想,仅被他的学生和朋友 P. Vail 和 Wheeler 等人所接受。所以,在 1975 年,国际地层分类委员会把“层序”从岩石地层系统中分了出来,并命名为构造层(Synthem)。

二、地震地层学形成发展阶段

在这个阶段,许多地质理论和方法得到了迅速发展。例如,人们可以利用同位素年代测定、古地磁测量和超微生物分带研究成果确定地层的地质时代;可以利用沉积学、古生态学、碳氧同位素的理论方法判断古沉积环境、古水深、古气候、古水温和沉积基准面的变化;利用板块构造理论、地球物理和盆地分析方法分析地壳的垂向升降、横向伸缩以及各种构造活动、火山活动、重大地质事件发生的时代和规模;特别是由于高分辨率数字地震勘探技术的发展,地质学家可以得到比较精确的能够反映地下地层形态、岩性、物性、流体性质的不同维数的图像。这些不同类型的地震图像极大地扩大了人们对地下复杂地质现象的透视视野,为人们提供了以前难以想象的地下地层三维展布及地质体之间的相互接触关系。例如,人们可以从地震剖面中识别为数众多的地层之间的不整合关系,以及反映不同沉积体成因类型的多种地震反射的内部结构和外部形态,从而促使人们更加深入地研究世界各地的地震反射剖面特征,并把它们与露头、钻井和测井资料结合起来。人们开始发现,地震反射终止关系是有周期性的,据此促使 P. Vail 等人(1977)提出了一门新的学科——地震地层学。

地震地层学是层序地层学发展的第二个重要时期,是以 P. Vail 等人提出地震地层学概念体系和出版《地震地层学》(C. E. Payton 主编,1977)为标志。地震地层学是一种利用地震资料进行地质综合解释的学科。它认为,由于岩层中产生地震反射的物性界面主要是具有速度—密度差异的层面和不整合面,所以可将这类界面作为划分年代地层单位的主要依据。地震地层学的核心是海平面升降旋回变化的周期性,基础是以不整合为边界的沉积层序的识别。根据

Mitchum(1977)的定义,“沉积层序是由相对整合、连续的,在成因上有联系的地层组成的、顶底以不整合面或与之相对应的整合面为界的地层单元”。一定的沉积层序代表的时间段可以因地而异,但某个层序的范围却限于等时界面之间。因此,它可以为地层对比和沉积相分析提供一个理想的年代地层格架。

P. Vail 的层序地层学思想起始于他在 Sloss 指导下读研究生期间,他在自己的层序地层学理论中对 Sloss(1949)提出的层序作了两个方面的重要修订。第一,Vail 和 Mitchum(1977)的层序比 Sloss(1949)的层序包容的时间更短,北美显生宙 6 个克拉通层序可以被划分得更细。Sloss 的层序相当于 Vail 和 Mitchum 所提出的超层序(Supersequence)。第二,Vail 等认为,全球海平面升降是层序形成演化的主要驱动机制。1987 年,Haq 等人再次发表了全球海平面旋回变化图表。对于海平面升降变化曲线的“锯齿状特征”,人们进行过大量热烈的讨论,尽管仍然有人对于把沉积层序与全球海平面变化联系在一起的概念性模式持怀疑态度(A. D. Miall,1986),但是,不管怎么说,随着地震反射技术的日臻完善,层序可作为一种可行的以不整合面为边界的地层单元进行地层综合分析,这要比 Sloss(1949)最初的克拉通层序概念更加细致合理,是一次理性概念的飞跃。

地震地层学多在盆地规模上利用地震资料,对地层结构、沉积相类型和分布进行盆地综合分析,但很少利用露头、钻井和测井资料进行层序地层综合分析,因此,不能在油气藏范围内为沉积地层分析提供必要的精度。

三、层序地层学综合发展阶段

尽管地震地层学理论解决了层序形成问题,但并未明确层序内部地层的彼此关系和空间展布特征,并且地震地层学主要应用地震资料在盆地范围内进行盆地分析工作,所以,Vail 等人在吸取其他地质学家建议的同时,进行了大量的露头、测井、海洋地质和地震资料的综合研究,利用层序地层、磁性地层、年代地层以及生物地层中所反映的海平面变化和同位素年龄等大量资料,编制了中生代以来的年代地层和海平面旋回曲线图,厘定了不整合面、海平面变化的概念,并强调地震剖面、测井和地面露头的综合研究是识别海平面变化的重要手段。

1988 年,正式出版了由 Wilgus 主编的《海平面变化综合分析》(1993 年中译本更名为《层序地层学原理》)。1989 年,随继出版了 Sangree 和 Vail 等的《应用层序地层学》。在这两本专著中,他们以全球性海平面变化为主导因素,系统、全面地阐明了层序地层学的基本理论、关键性术语的定义、解释程序和工作步骤。1991 年,Vail 等又在 Einsele 等主编的《层序旋回和事件》一书中,发表了《构造运动、全球海平面升降及沉积作用的地层标志综述》,再次强调,地层层序是由于构造运动、全球海平面升降、沉积作用及气候变化等地质作用相互作用而产生的。同时,也突出了不同级别构造作用对地层层序的影响,提出了一整套将层序地层分析、沉降史分析和构造地层分析相结合、互为补充的综合地层分析方法,特别将构造地层分析概括为 9 个步骤,突出构造沉降史与不整合面的研究,注意沉积充填史、构造型式与古应力条件的分析,高级别构造运动、构造条件与板块构造运动的关系等。1991 年,由 D. I. Macdonald 主编的《活动边缘的沉积作用、构造运动和全球海平面变化》一书,进一步把层序地层研究扩展到活动大陆边缘。

进入 90 年代以来,层序地层学进入了理论研究和生产应用全面发展的时期。理论上出现了多种学派,如以基准面旋回与过程——响应原理为理论依据,以地质、地球物理方法为手段的 T. A. Cross 高分辨率层序地层学学派,以及由 W. E. Galloway 创立的、在国际学术界与石

油工业界有重要影响的成因地层学派等。实践上,层序地层学开始深入到油气勘探开发的各个阶段,如油田开发层序地层学研究用于采油,细粒岩层序地层学研究用于地球化学(S. Greaney 和 Q. R. Passey, 1993)等。层序地层学已成为油气勘探开发各个阶段不可缺少的内容。以最大的石油公司 Exxon 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到层序地层学的理论、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新区勘探开发的指导模式。所以,全球沉积地质委员会(GSGC)正式将层序地层学和全球海平面变化纳入全球沉积学计划,将层序地层学推向学科前沿。1989年,AAPG 在《层序地层学应用》一书的前言中提出:“你要成为 90 年代的石油地质学家、地球物理学家、石油公司经理和管理人员吗?那么,务必请你读一读《层序地层学应用》这本书吧”。Vail 等人认为:“层序地层学概念在沉积岩分析中的应用有可能提供一个完整统一的地层学概念,就像板块构造曾经提供了一个完整统一的构造概念一样。层序地层学改变了分析世界地层纪录的基本原则,因此,它可能是地质学中的一次革命,它开创了了解地球历史的一个新阶段”。前苏联科学院主席团对层序地层学给予了很高的评价,认为层序地层学对发展地层学、沉积岩石学和构造地质学有重大贡献,而且可以大大提高油气普查勘探工作效率,预计可以得到数以十亿卢布计的经济效益。

当前,层序地层学已成为国际地质科学研究的热门课题。1989 年以来的历届 AAPG 年会以及 1992 年第 29 届国际地质学大会上,它都成为重要的讨论内容,充分展示了其在理论上、实践上以及在研究的深度和广度上所取得的长足进展。这些进展主要表现在:

① 在层序地层学的基本理论研究方面,对北美—西欧及其它地方经典露头地区进行细致的层序地层分析、对碳酸盐岩层序地层以及混积的层序地层的深入研究、对高频旋回的地面及地下分析,以及对海平面变化的认识和精确计算等方面,都有了长足的进展。在被动大陆边缘条件下,沉积层序的计算机模拟也取得了很大的进展,如对密西西比三角洲以东地区的计算机模拟结果与真实断面有相当高的拟合度,表明对控制层序形成的主要因素——海平面变化、构造沉降、沉积物补给速度以及初始深度的分析和参数的选择上是正确的。层序地层学的研究思路和方法,也正在不同类型的盆地中得到应用,并证明了其有效性。这些盆地既包括被动边缘盆地,也包括活动边缘盆地(如日本 BOSO 半岛上 Kazusu 群中的前弧盆地);既有伸展型盆地(如北海裂谷、Neuquen 弧后盆地),也有挠曲型盆地(如 Alberta、Denver 等前陆盆地)。除了与海相沉积盆地有关的盆地外,不少学者(包括我国的许多学者)还在近海湖盆和内陆盆地中进行了探索,提出了湖盆的三维地层模式。

② 一些新的研究方法正被引入到层序地层学研究中来。Kauffman(1991)等人提出的包括物理事件、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,为层序地层分析的年代地层学研究提供了新的工具。与之相近的 Moutanri 的综合地层学(Integrated Stratigraphy)方法,以及古生态学和埋藏学也被引入。Kominz 及 Boud 利用伽马方法较准确地测定了更新统及白垩系旋回沉积中的米兰柯维奇旋回,进一步证实了旋回沉积中时间的相对性和旋回的周期性这一假说。Edwards(1986)提出用高精度的 TIMS 轴系统(^{230}Th — ^{234}U)年龄测定方法来研究海平面的变化,Patwilde 等利用贫碳酸盐的还原岩石中全岩的铈(Ce)异常来研究海平面的变化。这些方法的引入将进一步充实和完善层序地层学的理论系统。

W. Walter 等人(1992)明确提出,高分辨率生物地层、测井分析和地震解释是层序地层分析中相互依赖的 3 个组成部分。将高分辨率的生物地层资料、古水深资料、测井曲线特征和地震反射剖面结合起来,形成一种测井-地震层序地层学分析的新方法,用这种方法可以详细对

比层序边界及层序内部细小的沉积单元,确定它们的空间展布特征。

③ 促进了相应学科的发展,形成一些新的学科分支。这方面表现最为突出的是在沉积相的研究方面。James 和 Walker 在其《沉积相模式》的第三版中(1992),按照海平面变化控制沉积相及相模式的思路,重新改写了这一名著。1993 年,由 Posamentier 等人主编的《层序地层学与相分析》也是在这一思想的影响下完成的。Opdyke(1990)、Fairbairns、Davies、Eberl、Ginsburg、Tucker 等,也运用层序地层学中的基本观点,进行了生物礁、碳酸盐台地以及碳酸盐层序地层模式的研究。此外,以层序地层学为生长点,一些新的学科分支正在出现,如 Akihiro Kano 的《成岩层序地层学》(Diagenetic Sequence Stratigraphy)、Braitwaite(1993)的《胶结物层序地层学》(Cement Sequence Stratigraphy)等。

④ 在层序地层学发展过程中,提出了强制性海退的概念。层序地层学认为,地层的几何形态和发育基本上受控于相对海平面的变化。强制性海退不同于正常海退,它被定义为在海平面相对下降时期,与沉积物输入量无关的、滨线向盆地方向的迁移。强制性海退通常与一个过水区、地表出露和新老岸线之间的可能河流侵蚀有关,是在早期低位体系域中形成低位前积楔的主要机制。强制性海退的解释具有较大经济意义,它能提供地下地层对比关系,为老油田的增储上产提供储层几何形态。

⑤ 在碳酸盐岩层序地层模式、泥岩层序地层学和深水区层序地层学及陆相层序地层学研究等方面取得了长足进展。研究表明,海平面变化的规模和速率对礁体的发育、碳酸盐台地中的水动力状态、沉积速率和沉积物分布起着控制作用。Tucker 认为,碳酸盐岩主要发育在海平面旋回的海侵和高位体系域中,而且不同海平面旋回时期发育着不同的碳酸盐岩沉积体系。Dernald、Carpentiner (1992)等人通过露头、钻井、测井和地震资料的综合分析,认为盆地内烃源岩的分布具有不均一性。在三级旋回盆地中,有机质分布受控于海平面变化,在四、五级旋回层序中,则受控于气候变化。许多学者认为,可以通过旋回地层学的方法,研究深水和浅水区海进、海退旋回的频率、幅度、速度和相位参数与斜坡及其相邻区层序、体系域和准层序旋回的频率、幅度、速度和相位参数的异同点,来确定、追踪对比不同相区相对海平面的变化特征。要成功地将层序地层学理论用于陆相地层,就必须全面仔细地考虑基准面和沉积物供给的变化特征。对于近海非海相环境来说,相对海平面可以被认为是地层基准面或地形基准面;对于内陆盆地,决定可容空间变化的地层基准面更加复杂多变,如河流地层为倾斜剖面,某些风成地层为潜水面,山间盆地沉积物为湖平面。在陆相层序地层中,构造活动和气候不仅影响了沉积物供给,而且决定了层序地层构型。

⑥ 总结了层序地层格架中源岩质量和有机碳总量的分布模式。海相源岩常规钻井、测井剖面揭示,有机碳总量垂向分布模式可以用层序地层学概念来解释。有机碳总量与陆源碎屑注入量成反比。若可容空间很大,远源位置的碎屑注入量就很低,使盆地沉积物中的有机碳总量百分比增大。因此,在海相层序剖面中有机碳总量的最大值可能与最大海平面对应。

在石油勘探领域,应用这一新的理论体系和方法,已经为储集砂体的预测带来了战略性的变化,取得了重要的成就。特别是低位体系域底界面上的深切谷充填砂体的预测和发现,为寻找发现地层岩性圈闭提供了有利靶区。如 Amoco 石油公司根据层序地层研究,在 Beaufort 海和阿拉斯加发现了新的靶区;在尼日尔三角洲地区应用墨西哥湾盆地的模式和经验,在新的地震、钻井资料的基础上完成了一系列层序地层大剖面,从而发现了丰富的、有经济价值的油气圈闭;联合太平洋公司在东科罗拉多州和西堪萨斯州的工作中,应用层序地层的方法重新进行整体评价,发现了长距离延伸的深切谷充填砂体,从而在找油目标上进行了战略转变。因此,前

AAPG 主席 P. Weimer 指出:层序地层学应用以来最重要的找油新领域之一是层序界面上的谷地充填砂体。此外,我国部分研究者已经开始把这一理论应用于沉积和层控矿床的研究和预测上,并取得了一些新的认识。

在我国,早在 20 世纪 80 年代后期,地震地层学的理论和方法已在石油部门率先使用。1990 年,钱凯翻译的《层序地层学应用》公开出版,贵州区调队魏家庸等(1991)翻译的《海平面变化综合分析》的部分文章也广为流传。从此,层序地层学在我国地学界逐渐流传开来。徐怀大、李思田、刘宝珺等研究者,在石油、区调、煤田和盆地分析方面,都引用了这一理论并作了许多开拓性的工作。部分地质院校也开始讲授层序地层学有关内容。1992 年底,国家科委正式批准了以我国著名地质学家王鸿桢教授为首的、以层序地层及海平面变化为主要研究内容的国家基础性重大研究课题——中国古大陆及其边缘层序地层和海平面变化的研究。这项研究一开始就显示了它所具有的中国学派的特色,即表现为以地表露头追索研究为主,而不是以地下地震资料为主,也不是局限于以油气资源为目的的盆地分析。可以预言,这项研究在我国优越的地质背景条件下,必将取得重大的突破和创新,从而为丰富层序地层学的基础理论和推动地质基础学科的发展作出重大贡献。

层序地层学之所以能在不长的时间取得如此巨大的进展,获得这样高的评价,被认为是“地层学正在进行的一场革命”(Brow . L . F . Jr, 1990),其原因在于:

① 从 60 年代初板块构造学说问世以来,地球科学不同领域的共同发展趋势是强调全球性的对比研究,强调地球演化的整体性,以及不同作用过程的相互制约性,把地球甚至天体作为一个整体来加以研究。这一趋势是人类对地球科学长期思索的结果,层序地层学的基本指导思想正是强调地层层序的形成受到构造运动、全球海平面升降及沉积作用的相互影响和作用,并表现为不同的级别、规模和时间间隔。可见,层序地层学的观点和当前人类的地球观是一致的,因而受到广泛的支持和重视。

② 层序地层学是一种新的地层学体系,层序地层单元的界面是可以通过地下(地震和测井)和地面露头识别的客观存在,它具有物理性界面和生物界面的双重意义,而且层序地层内部和层序之间,又是有成因联系的有序的三维岩相组合的集合体。因此,层序地层学消除了地层学中长期存在的年代地层、岩石地层与生物地层单位三重命名的混乱现象。同时,地震反射近似地逼近等时面本身,为地层的划分与对比(至少在准层序级以上)提供了有力的武器。像板块构造学说提供了全球统一的构造概念一样,层序地层学也有可能提供一个全球统一的地层学概念。

③ 第一次提出了全球统一的成因地层划分方案(成因地层年表)。过去人们根据某一项或两项标志,提出过地层划分方案(地层年表),有古生物的、岩性的、放射性同位素年龄的、古地磁的等。但是,由于没有从根本上、从地层的成因和发展方面进行研究,因此,出现了许多相互矛盾、无法解释的现象。层序地层学通过对控制地层形成的 4 个要素(构造沉降、全球海平面升降、气候、沉积物供应)的综合分析,得出相对海平面(或基准面)控制层序形成与发育的概念,并将层序内部和层序之间的成因联系确立下来,把层序地层学从描述阶段提高到有完整系统的理性阶段。

④ 强调了海平面变化对不整合面和层序的形成及其内部沉积体系域的作用。以往的地质工作者较为熟悉的是构造不整合和假整合。而实际上,海平面造成了更多的、更为重要的关键性界面,如低位体系域底部的不整合、海侵面和最大海泛面。如果说以往的地质学中,更多地被认识的是规模较大的构造因素对沉积充填的控制,那么,层序地层学的贡献是更好地揭示了海

平面变化的重要影响。

⑤ 建立了地层分布模式。层序地层学是将研究地层分布模式作为重要内容之一的一门科学,它把层序定义为“顶、底以不整合面或可以与这些不整合面对比的整合面为界的、成因上有联系的一套地层”。层序地层学定义中所说的“地层分布模式”就是这里所指的“成因上有联系的一套地层”。具体到每个层序来说,这“一套地层”就是指在一个海平面相对变化周期(两个相邻下降翼拐点或拐点附近)沉积的地层。即每个层序都包括3个体系域,它们是低位体系域、海进体系域和高位体系域(指Ⅰ型层序),或者陆架边缘体系域、海进体系域和高位体系域(Ⅱ型层序)。这些概念是层序地层学的核心,是许多理论和实际工作的依托。

⑥ 层序地层学的理论和方法是,在沉积盆地分析中首先建立等时地层格架,并将沉积相和沉积体系的研究置于构造沉降、海平面升降和沉积物供给的复合制约和整体的统一格架中,因而能有效地揭示其三维配置关系。在含油气盆地的研究中,能够有效地阐明生、储、盖层的配置规律,提高地质学家的理论和实际预测能力。从理论预测上讲,通过海平面相对变化的研究,可以预测尚未钻探地层的年代,预测某些体系域的展布方向、范围,可能的岩相及其分布,从而对地质发展史、古地理状况作出科学的预见。从实际上讲,可以通过体系域和岩相的分布规律,预测有利于形成油藏、气藏以及其它沉积矿产的有利分布带。再进一步,通过高精度高分辨率的地震勘探(尤其是三维地震)、油藏描述、碳氢检测等手段,可以进行钻前油藏、油层质量预测,以至开发油田的扩边和开发效率的预测。

⑦ 把地球科学的研究从定性推向定量。总的来讲,地质科学与其它科学相比,是比较偏于推理性的、定性的、描述性和经验性的。其根本原因,是无法了解地下地质条件的时间和空间这四维参量的真实情况和细节变化。近年来,由于计算机技术和地震勘探以及其它有关科学的发展,已经在盆地模拟、构造史恢复、油气运移、资源量评价、储量计算、储层质量预测等方面积累了不少经验,提出了一些定量研究的方法。然而,由于对地层及其所代表的岩相在三度空间和时间上的分布不够了解,影响了上述评估的确定性,并造成不同评估值之间的重大差异。现在,层序地层学的出现基本上解决了这个问题。层序地层学研究成果可以使人们更充分地了解地层的时空展布,依据地震勘探技术和计算机技术来量化模拟层序地层的充填过程,在和与其它一切与沉积岩有关的科学和技术配合的基础上,构成一个从地层划分、相带分布、古地理环境恢复、构造发育史、油藏形成史、油藏预测、油藏质量预测到油藏开发效果监测的一套完整的、比现在精确得多的量化研究全过程。

第二节 层序地层学面临的问题和发展展望

一、层序地层学面临的问题

层序地层学是在地震地层学基础上不断完善和发展起来的一门地层学分支学科,它非常强调综合利用多种资料对盆地充填序列进行等时年代地层格架划分,进而研究各等时地层格架内沉积成因单元的地层叠置样式和几何形态,指出有利于发育生油层、储集层、盖层和地层圈闭的地区,为寻找沉积矿产资源指明方向。实践业已证明,无论是海相层序地层学研究,还是陆相层序地层学研究,层序地层学的研究成果的确已在勘察沉积矿产资源、开拓人们的思路 and 推动地质学科进展诸方面发挥了十分积极的作用。

层序地层学的发展是迅速的,但它的理论和方法也和任何新兴的学科分支一样,并不是一