

高等

学用书

高分辨率层序地层学 (第二版)

*High-resolution Sequence
Stratigraphy* (2nd Edition)

● 郑荣才 文华国 李凤杰 编著

地质出版社

研究生教学用书

高分辨率层序地层学

(第二版)

郑荣才 文华国 李凤杰 编著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

全书共分两篇：第一篇主要介绍了高分辨率层序地层学的基本概念、基本原理，基准面旋回的级次划分、结构类型、叠加样式和沉积动力学特征等基础知识；第二篇主要讨论了高分辨率层序地层学在油气勘探开发工程中的应用，包括层序单元划分和等时对比、编制等时层序-岩相古地理图和储集砂体预测和特征描述中的应用，同时引用了大量不同沉积环境下高分辨率层序地层分析的研究实例。

该书是一本针对我国陆相含油气盆地特色（兼顾海相地层）的本土化教材，既可作为研究生教学用书，也可供从事相关专业的高等院校教师和油气田勘探与开发的科研和工程技术人员作为技术手册参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

高分辨率层序地层学 / 郑荣才，文华国，李凤杰编
著. —2 版. —北京：地质出版社，2017. 7
ISBN 978-7-116-10461-7

I. ①高… II. ①郑…②文…③李… III. ①高分辨率-地层层序-地层学-高等学校-教材 IV.
①P539. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 162955 号

Gaofenbianlǔ Cengxu Dicengxue

责任编辑：徐 洋 罗军燕

责任校对：关风云

出版发行：地质出版社

社址邮编：北京海淀区学院路 31 号，100083

电 话：(010) 66554646（邮购部）；(010) 66554579（编辑室）

网 址：<http://www.gph.com.cn>

传 真：(010) 66554579

印 刷：固安华明印业有限公司

开 本：787mm × 1092mm 1/16

印 张：22 图版：8 面

字 数：500 千字

印 数：1—2000 册

版 次：2017 年 7 月北京第 2 版

印 次：2017 年 7 月河北第 1 次印刷

定 价：55.00 元

书 号：ISBN 978-7-116-10461-7

（如对本书有建议或意见，敬请致电本社；如本书有印装问题，本社负责调换）

前 言

层序地层学原理及其在实际应用中的有效性已被大多数地质学家所接受。理论上,层序地层学特别重视海平面升降周期对地层层序形成的重要影响;实践上,层序地层学通过年代地层格架的建立,可对地层分布模式做出更为合理的解释和对同时代成因地层内的沉积体系域进行划分,为含油气盆地的地层分析和盆地规模的储层预测提供坚实的理论基础和油气勘探的有效技术手段,从而有力地推动石油地质学的发展。

但是,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,以提高层序地层分析的时间-地层分辨率和储集层分布预测的准确性。正因为如此,以 Cross (1994) 为代表的成因地层研究小组提出的高分辨率层序地层学 (high-resolution sequence stratigraphy) 自问世以来,以其全新的理论、概念、技术方法和显著的实际应用效果,引起国内外广大石油地质学和沉积学、层序地层学等地质工作者的高度重视,并于我国石油勘探开发领域取得众多研究成果和显著经济效益,发表了数百篇有价值的学术论文,有力地推动了高分辨率层序地层学理论体系及其技术方法在我国沉积学和石油地质学领域的研究和发展。

目前,国内关于层序地层学研究方面的专著众多,既有系统的理论体系和技术方法,也有成功的研究实例和应用模式,并且形成了数个不同观点的学派,但针对更适合于我国陆相盆地油气勘探开发的高分辨率层序地层学理论,相关的学术论文较多而专著却很少,公开出版的系统性教材更少。早在 2000 年,《高分辨率层序地层学》已作为成都理工大学(原成都地质学院)硕士、博士研究生的专业必修或选修课程,在几年的科研实践和教学过程中,已积累了较为丰硕的基础资料和国内外成功的应用实例,先后编写了 20 余万字的讲稿和校内研究生试用教材,授课内容非常受硕士、博士研究生和工程技术人员欢迎。基于此,非常有必要编著一本针对我国陆相含油气盆地特色、兼顾海相地层和适合硕士、博士研究生教学的《高分辨率层序地层学》统编教材以适合研究生教学的需要,也可供从事相关专业的高等院校教师和油气田勘探与开发的科研和工程技术人员参考使用。

全书共分两篇:第一篇“高分辨率层序地层学理论”,主要介绍了高分辨率层序地层学的基本概念、基本原理,基准面旋回的级次划分、结构类型、叠加样式和沉积动力学特征;第二篇“高分辨率层序地层学的应用”,主要讨论了高分辨率层序地层学在油气勘探开发工程中的应用,包括层序单元划分和等时对比、编制等时层序-岩相古地理图和储集砂体预测和特征描述中的应用,同时引用了大量不同沉积环境下高分辨率层序地层分析的研究实例,其中涉及的内容大部分已在相关的学术刊物上发表,把它们编入本书是因为它们涉及了该项理论的基础、概念和实际应用,而不是其研究内容的简单复制。与国内有关高分辨率层序地层学的专著或教材不同,本书不但侧重于理论、原理和方法,而且更多

的是针对中国中、新生代陆相和部分海相含油气盆地层序发育特征，配以大量成功的研究实例强化理论概念、技术方法和实际操作，让相关专业的技术人员和研究生能更有效地掌握理论与实践相结合的专业知识。本书应该是一本通俗易懂，具有较强实用性、科学性、系统性的本土化教材或技术手册。

全书共分12章。第一章，第二章，第三章，第四章第一节、第二节，第五章，第六章由郑荣才编写；第四章第三节由李凤杰编写；第七章，第九章，第十章由文华国、郑荣才编写；第八章由郑荣才、文华国编写；第十一章由文华国编写；第十二章由李凤杰、郑荣才编写。全书由郑荣才、文华国统稿。

全书内容主要取材于成都理工大学沉积地质研究院相关科研组多年来的研究工作和科研成果，包括已发表和未发表的学术论文，硕士、博士研究生的学位论文等，同时也选编了邓宏文和王洪亮等编著的《高分辨率层序地层学——原理及应用》一书中的部分内容，汪彦和彭军等撰写的《基准面旋回与A/S比值的函数关系及地质意义》学术论文中的精华部分。

本书初稿编写完成后，曾蒙刘宝珺院士和曾允孚教授审阅并提出了宝贵建议，使本书增色不少。书稿编写过程中始终得到了地质出版社地质教材编辑室及成都理工大学研究生院的大力支持。成都理工大学沉积地质研究院博士生李云、周刚、戴朝成等，以及硕士研究生胡诚、王启宇、赵灿等为本书的编辑、审阅、制图、打印和校对付出了辛勤劳动，在此编者对他们深表谢意。

由于书中内容繁多，编写时间较仓促，加之编者水平有限，书中难免有不少疏漏，敬请广大读者批评指正。

编 者

2017年2月

目 录

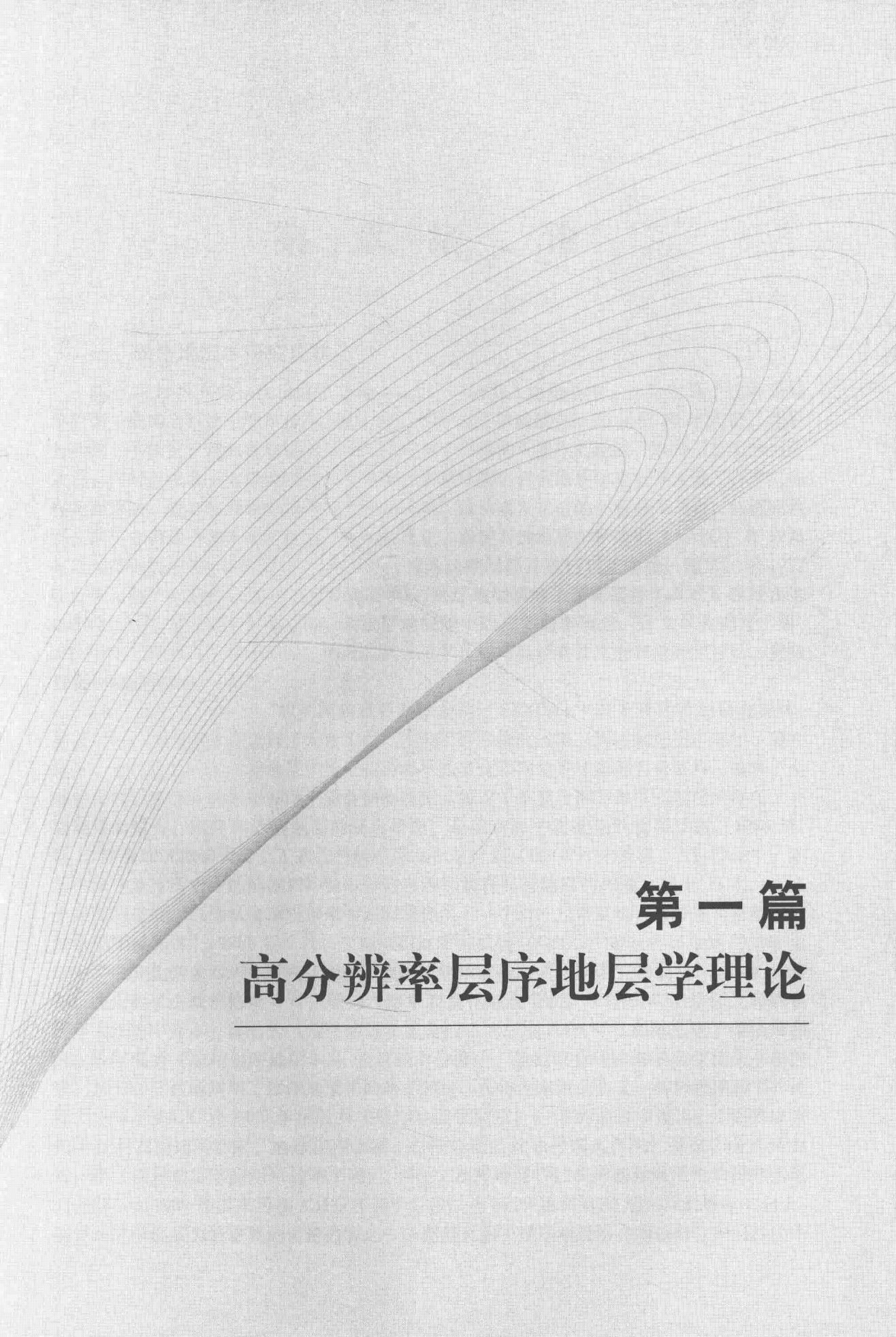
第一篇 高分辨率层序地层学理论

第一章 绪论	(3)
第二章 高分辨率层序地层学理论基础	(21)
第一节 基本原理	(21)
第二节 可容纳空间机制对层序发育的控制	(36)
第三章 界面类型及基准面旋回的级次划分	(50)
第一节 层序界面成因类型、级别和识别标志	(50)
第二节 旋回成因类型、级次划分和控制因素	(66)
第四章 基准面旋回结构和叠加样式沉积动力学	(82)
第一节 基准面旋回的沉积动力学特征	(82)
第二节 基准面旋回与 A/S 值的函数关系	(95)
第三节 基准面旋回的小波和频谱分析	(102)
第五章 基准面旋回基本特征	(108)
第一节 基准面旋回结构类型	(108)
第二节 不同级次的基准面旋回特征	(114)

第二篇 高分辨率层序地层学的应用

第六章 油气勘探开发工程中的应用	(141)
第一节 基准面旋回级次划分和等时地层格架	(141)
第二节 在小层砂体等时追踪和对比中的应用	(164)
第三节 编制等时层序-岩相古地理图	(177)
第四节 在储集砂体特征描述中的应用	(181)
第七章 河流体系高分辨率层序地层分析	(199)
第一节 苏里格地区盒 8 段河流体系高分辨率层序分析	(200)
第二节 阿尔及利亚韦德迈阿次盆地三叠系河流相储层预测	(210)
第三节 大庆萨葡 I-2 油层曲流河边滩砂体内部建筑结构描述	(223)
第八章 湖泊三角洲体系高分辨率层序地层分析	(231)
第一节 鄂尔多斯盆地志丹长 6 油层组湖泊三角洲高分辨率层序分析	(232)
第二节 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8 油层组浅水三角洲高分辨率层序 分析	(242)

第三节	川西坳陷上三叠统须家河组 2 段高分辨率层序分析和储层预测	(252)
第九章	湖底扇体系高分辨率层序地层分析	(260)
第一节	鄂尔多斯盆地白豹地区长 6 油层组湖底扇高分辨率层序分析	(261)
第二节	百色盆地仑 35 块古近系那读组 2 段湖底扇高分辨率层序分析	(273)
第十章	海相碎屑岩体系高分辨率层序地层分析	(284)
第一节	俄罗斯科维克金气田海相三角洲高分辨率层序地层学特征	(285)
第二节	惠州凹陷古近系珠海组海相三角洲高分辨率层序地层学研究	(292)
第三节	长北气田下二叠统山西组 2 段海相三角洲高分辨率层序分析 与砂体预测	(300)
第十一章	碳酸盐岩高分辨率层序地层分析	(310)
第一节	川东上二叠统长兴组海相碳酸盐岩高分辨率层序地层分析	(311)
第二节	四川盆地下侏罗统自流井组大安寨段湖相碳酸盐岩高分辨率层序 地层分析	(319)
第十二章	高分辨率层序分析在其他方面的应用实例	(330)
第一节	高分辨率层序在城壕地区延长组小波分析中的应用	(330)
第二节	泌阳凹陷双河油田核 3 段 II 油组流动单元划分	(337)
参考文献及参考资料		(340)
图 版		(347)



第一篇 高分辨率层序地层学理论

第一章 绪 论

一、层序地层学研究现状

Sloss 在 1949 年第一次将层序 (sequence) 一词引入地质学中, 认为它是“比群和超群更高一级的岩石地层学单位”, 而非现代层序地层学的概念。20 世纪 70 年代初, 北美和西欧一些国家, 把地震地层学方法广泛应用于石油和天然气的勘探, 取得了显著的经济效益, 同时也积累了大量地震资料的分析和解释经验。许多地质学家从中发现了许多以往在地面露头、岩心和测井资料研究中忽视了的, 或从未发现过的一些重要现象, 认识到他们长期信守的某些基本地质概念需要加以修正。美国石油地质学家协会 (AAPG) 在 1975 年以地震地层为中心内容召开年会, 专门讨论这些问题并进行理论总结, 随后, 于 1977 年公开出版了由佩顿主编的《地震地层学》。层序地层学的主要奠基者 Vail P R 教授在这本书中发表了他的两篇经典论文, 对层序地层学中的众多基本概念、定义和关键性术语, 首次做出了明确和系统的说明, 因此, 从 Vail P R 的两篇经典论文发表的时间开始, 意味着层序地层学的正式诞生。

20 世纪 80 年代初期, 以美国埃克森石油公司 (EXXON) Vail P R 为首的研究集体, 在这一新的思想指导下进行了大量工作, 发表了许多研究成果, 同时利用层序地层、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, 编辑了全球中生代以来的年代地层和海平面旋回曲线图, 厘定了不整合面与海平面变化的概念, 并强调地面露头、测井和地震剖面的综合研究, 是识别海平面变化的重要手段。1986 年, 第 12 届全球沉积学大会上正式公布的全球沉积学计划 (GSGP) 中指出, “长期以来, 地质学家对地球历史中的韵律和特殊事件的发现和解释具有浓厚的兴趣, 近 10 年来, 有几个方面的进展, 已为从全球规模来考虑问题提供了一个新的超常良机, 其中最希望的进展是层序地层学”。1988 年 9 月, 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 GSGC 研究计划中, 层序地层学被推向“学科研究的前沿”, 并在 1988 年正式出版了由威尔格斯 C K 主编的《海平面变化综合分析》(1993 年由徐怀大和魏魁生等人译为中译本, 译名为《层序地层学原理》), 之后在 1989 年又相继出版了桑格瑞和维尔等主编的《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, 系统和全面地阐明了层序地层学的基本理论、关键性术语的定义、解释程序和工作流程, 以至于 AAPG 在 1989 年出版的《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。”当前, 层序地层学已成为国际地质科学研究的热门课题, 如 1989 年以来历届 AAPG 年会中, 1992 年第 29 届和第 30 届国际地质学大会上, 层序地层学都成为最重要的讨论内容之一, 充分显示了层序地层学在理论研究和实践应用

中所取得的长足进展,以及该理论对发展基础地质学科,如地层学、沉积学和构造地质学的重大贡献,大幅度地提高了矿产资源普查勘探工作效率和经济效益。

当前,层序地层学已成为国际地质科学研究的热门课题,充分展示了它在理论、实际以及在研究的深度和广度上所取得的长足进展。这些重要的进展主要表现在研究领域的扩展、基本理论的深化、新理论和技术的应用,以及新的分支学科的涌现等方面。

1. 研究领域

在石油勘探领域,应用这一新的理论体系和方法,已经给储集砂体的预测带来了战略性的变化,取得了重要成就,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,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,从而发现了一批有经济价值的油气圈闭;联合太平洋公司在东科罗拉多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上的转变。因此,前 AAPG 主席 Weimer P 指出:自层序地层学应用到实践中以来,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用于沉积、层控矿床和油气藏的研究与预测上,并已取得一些新的认识。

2. 基本理论的应用

在层序地层学的基本理论研究方面,对北美和西欧及其他一些地方的经典露头地区进行的细致层序地层分析,对碳酸盐岩层序地层以及混积层序地层的深入研究,对于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,都有着长足进展。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,如对密西西比河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等因素和参数的选择是正确的。层序地层学的思路和方法也正在不同类型的沉积盆地中应用,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 Kazusa 群中的弧前盆地);既有伸展型盆地(北海裂谷、Neuquen 弧后盆地),也有挠曲型盆地(如 Alberta、Denver 等前陆盆地),应用结果都可证明其有效性。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探索,提出了湖盆的层序地层学模式。

3. 新理论和新技术

一些新的理论和技术方法正被引入到层序地层学研究中来。Kauffman (1998) 等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武器。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层序地层学研究中。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科维奇旋回,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 等(1986)提出了用高精度的 TIMS 铀系统(^{230}Th - ^{234}TU)年龄测定方法研究海平面的变化,Patwilde 等在贫碳酸盐的还原岩石中,利用全岩的铈(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。

4. 学科分支

促进相应学科发展,形成了一些新的学科分支。这方面表现最为突出的是在沉积相的研究方面,Walker 和 James 在其《沉积相模式》的第三版(1992)中,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 及 Walker (1990),Fairbairns, Davic, Eerl, Ginsburg 和 Tucker 等沉积地质学家,成功地运用层序地层学中的基本观点进行生物礁、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*)和 Braithwaite (1993)的《胶结物层序地层学》(*Cement Sequence Stratigraphy*)等研究的内容。

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》的部分文章和摘要也广为流传,从此,层序地层学在我国地学界逐渐流传开来。徐怀大、魏家庸、李思田、刘宝珺等研究者,在石油勘查、区域地质调查、煤田和盆地分析方面,都引用这一理论并做了许多开拓性的工作。有关地质院校也开始讲授有关内容。1992 年底,国家科委正式批准了以我国著名地质学家王鸿祯教授为首席科学家、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,即以地面露头追索研究为主,而不是以地下地震资料为主;以古生代和新元古代为主,而不是局限于中、新生代;以多学科相互结合的综合研究为主,而不是局限于以油气资源为目的的盆地分析。结果证明,在我国优越和丰富多彩的地质背景条件下,这项研究已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蓬勃发展做出重要贡献。

二、层序地层学研究的流派

层序地层学是 30 多年来地学领域所取得的一项意义重大的革命性进展,它凝聚了半个世纪的研究成果,是继“莱伊尔之后在地层学和沉积学领域的最大贡献”。层序地层学使古老的地层学领域自 20 世纪 80 年代以来充满活力,形成地层学与沉积学高度综合的新概念和前缘研究热点。在生产与科研实践中,层序地层学已作为一种非常有效的理论和技术方法被广泛应用于沉积地层分析和矿产资源勘探开发等诸多领域,由于其研究思路的先进性及其在生产实践中的有效性已被众多地质学家接受,成为一种被公认的新理论、新技术、新方法,特别是在油气勘探开发领域已成为最重要的研究方法和技术手段之一,因此,它被认为是地层学的一场革命(Brown, 1990)。纵观目前国内外层序地层学的研究动态和主流思想,大体上可归结为海相学、陆相学和高分辨率层序地层学 3 个主要方面的流派,其中海相学流派以国外学者为主,陆相学流派以国内学者为主,高分辨率层序地层学流派以美国科罗拉多矿业学院的 Cross T A 为主。

(一) 海相学派

该学派特别重视海平面升降周期对地层层序形成的重要影响,通过年代地层格架的建

立,可对地层分布模式做出更为合理的解释,对同时代成因地层内的沉积体系域进行划分,从而为含油气盆地的地层分析和盆地规模的储层预测提供坚实的理论基础和油气勘探的有效手段,有力地推动了地质学,特别是石油地质学的发展。根据其层序划分方案可将海相学派的研究者分为三个学派:

(1) 以 Exxon 公司为代表的 Vail P R 学派 (1987),将地表不整合面或与此不整合面可以对比的整合面作为划分层序的边界;

(2) 以 Galloway W E 为代表的学派 (1989),采用最大洪泛面作为层序边界;

(3) Johnson 等 (1985) 所强调的层序,是以地表不整合或海进冲刷不整合为边界的海进-海退旋回沉积层序。

虽然上述划分层序类型的 3 种方法各不相同,但均强调海平面变化是控制层序成因和相分布的内在机制,可用于全球范围内的地层对比。在层序控制方面将构造运动、全球海平面变化、沉积物供给、气候变化作为影响层序产生和发展演化特征的四大控制因素,但对于构造沉降作用、成岩作用的影响考虑较少,这是其局限所在。

(二) 陆相学派

层序地层学已成功地应用于河流、湖泊、沼泽、冰川等板块内部的陆相环境中,由于陆相盆地所具有的沉积充填作用的特殊性及其与海相盆地之间所存在的沉积环境与构造背景的巨大差异性,层序地层学在陆相盆地中的应用被 Weimer (1992) 称为现代地球科学的一场革命。我国中、新生代含油气盆地以陆相地层为主,油、气储层绝大部分属于陆相沉积的砂岩储层,不仅在半个世纪的勘探开发史中积累有丰富的经验、资料和科学研究成果,而且已形成了系统和完整的“陆相生油理论”与勘探开发技术,在有关陆相盆地的油气地质研究方面处于世界领先地位。然而,在陆相盆地中,由于受层序地层发育条件、控制因素和沉积作用的特殊性因素影响,存在相变快、厚度变化大和层位不稳定等复杂的地质因素,在油、气成藏条件和成藏规律等方面有着不同于海相盆地的特点,因此,研究陆相层序地层学特征及其层序地层格架中的生、储、盖组合规律和控制因素,已成为预测评价陆相含油、气盆地中油气聚集规律与油气藏类型的重要研究思路和技术方法之一,也是当前我国层序地层学研究的前沿课题之一。

我国地质学家们对陆相盆地层序地层学理论体系的建立和完善做出了突出贡献,主要表现在陆相层序地层学概念与理论术语体系、陆相层序地层研究技术方法、陆相层序地层学应用研究三个方面。按层序形成时的控制因素不同,陆相层序地层研究可分为四个学派。

1. “类海相”学派

认为湖泊和海洋类似,是陆相沉积的主导控制体,其不仅控制自身的沉积发展,也控制毗邻的河流及风成沉积,湖平面的变化类似海平面的变化,控制整个盆地的发育,因此, Vail P R 海相学派源自被动大陆边缘的经典层序地层学理论可同样应用于陆相地层的层序分析。如, Shanley 和 McCabe (1990, 1991, 1993) 在描述美国犹他洲南部 Kaiparowits 高原与海相地层可追踪对比的冲积相层序地层时,使用的是海进体系域及高位体系域术语; Mancilla 等 (1988, 1991) 在研究阿根廷内陆盆地的冲积相时使用的是低位体系域、海进体系域及高位体系域术语; Havholm 和 Kocurek (1990, 1991) 在其风成沉积层

序地层研究中使用的是低位期、高位期等术语; Scholz (1991) 在其半地堑式湖盆层序地层模式中使用的是低位体系域和高位体系域术语; Olsen (1990) 和 Olsen 等 (1991) 在其断陷湖盆层序地层模式中使用的是低位体系域、水进体系域及高位体系域术语; Shanley 等 (1994) 在描述荷兰湖泊盆地时使用的也是低位体系域、水进体系域及高位体系域等术语。类似的研究成果在我国有着非常广泛的应用, 与此相关的文献资料的发表亦不在少数, 同时这些成果在我国的科研和生产实践中都发挥了重要的作用。但在上述众多研究成果中, 大多数研究者简化了陆相沉积盆地的复杂性, 淡化了陆相沉积盆地与海相沉积盆地之间的巨大差异性, 在描述复杂的陆相沉积层序的特征时, 在认识上同样存在局限性。

2. “单一”成因学派

主要针对河流相地层进行层序地层学研究 (张周良, 1996), 提出低位体系域主要由辫状河流的砂砾质沉积物组成, 低位体系域后期可能出现曲流河沉积, 水进体系域有利于网状河流沉积, 高位体系域主要是由曲流河沉积物组成, 也可能发育有网状河沉积。这一学派更加强调了以河流为主的控制因素, 忽略了构造和气候因素, 将沉积物供给速度与河流作用的重要性相等同, 而将湖相或海相沉积归为夹层, 为次要因素。由于该学派没有考虑到在同一个地区不可能出现仅由一系列河流相沉积所组成的、包括各个沉积体系域在内的地层层序, 或仅由单纯的河流相沉积所组成的完整的沉积层序, 因而在使用中存在更大的局限性, 主要适用于大型冲积扇和河流沉积体系的层序地层分析。

3. “构造”学派

认为构造活动在陆相盆地发育及演化历史中占有最重要的支配地位 (李思田等, 1992; 解习农等, 1996), 构造旋回就是层序的基本成因, 主张层序分析是把相、沉积体系放在盆地的整体地层格架中进行研究。由于这种地层格架主要是根据具有等时地层意义的界面来划分的, 因此, 层序地层分析的核心是建立全盆地等时的构造-地层格架, 在此基础上将盆地充填序列解析为不同级别的建造块体。李思田等 (1992) 在对鄂尔多斯盆地东北部进行层序地层学研究时, 提出了盆地充填序列和构造层序的概念, 这一认识突破了经典层序地层学的束缚, 全面考虑了盆地构造发展史和沉积演化史, 强调了构造作用与沉积作用的相互关系, 并从不同级别的构造旋回角度对沉积层序和沉积体系域进行了划分, 大大突出了陆相盆地沉积层序的发育特征, 促进了陆相层序地层学的发展。这一研究思路在我国中、新生代断陷湖盆的层序分析中有着非常广泛的应用, 虽然对不同成因类型的陆相沉积体系层序地层分析都适用, 但因其仅强调了构造对较长时间尺度的层序发育和演化过程的控制作用, 而缺乏考虑气候因素和沉积物供给速度与较短时间尺度的层序之间的关系, 因此, 主要适用于煤田和油气田勘探阶段粗框架的层序地层分析, 而不能满足开发阶段的精细地质研究要求。

4. 综合学派

认为陆相湖盆层序的形成及特征受构造运动、气候变化、沉积物供给和湖平面变化的控制, 以前两者为主导因素, 后两者为影响因素 (纪友亮等, 1996), 并明确指出气候的变化只是对湖盆的敞流和闭流产生影响, 其中闭流湖盆的湖平面不受盆地基底整体构造沉降因素的影响。据此可将层序划分为构造层序和气候层序两种成因类型, 其中构造层序又分为简单断拗层序、同生断拗层序和多期断拗层序。简单断拗层序只发育厚的湖泊萎缩体系域; 同生断拗层序由低位体系域、湖泊扩张体系域、湖泊萎缩体系域和非湖泊体系域组

成;多期断拗层序由多期进积式准层序构成。气候层序由低位体系域、高位体系域和湖泊扩张、湖泊萎缩体系域组成。由于这一分类方案适用于不同性质的陆相沉积盆地和沉积体系,因此为大多数学者所接受。

三、高分辨率层序地层学的诞生和发展

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细和准确的技术,以提高层序地层分析的时间-地层分辨率和储层预测评价描述的准确性。正因为如此,以 Cross T A 为首的美国科罗拉多矿业学院成因地层研究小组(1994)在对浅海环境沉积层序进行分析研究的基础上,首次提出利用基准面旋回和可容纳空间与沉积物供给量比值(以下简称 A/S 值)进行层序地层划分和描述的理论与技术方法,即高分辨率层序地层学(high-resolution sequence stratigraphy)。该学派认为,在基准面旋回升降过程中,由可容纳空间与沉积物供给量比值的变化和相同相域(或沉积体系域)中发生的沉积物体积分配过程,可导致沉积物的保存程度、地层堆积方式、相序、相类型及岩石结构发生变化,这些变化是基准面旋回过程中所处位置的可容纳空间与沉积物供给量比值的函数,因而由基准面旋回所控制的等时地层单元在三维空间中的保存程度、堆积样式、沉积物类型和相序的演化不仅是有规律可循的,而且是可以预测的(邓宏文,1995)。该学派以其全新的理论、概念、技术方法和显著的实际应用效果,业已引起国内外广大石油地质学和沉积学、层序地层学等地质工作者的高度重视,并在我国石油勘探开发领域取得众多研究成果和显著经济效益,发表了一大批有价值的学术论文,有力推动了该理论体系的发展及其技术方法在陆相含油气盆地层序分析中的应用。

(一) 高分辨率层序地层学的诞生

自从 Sloss 在 1948 年提出将层序作为以不整合为边界的地层单位以来,在 50 多年的时间里对层序概念的理解有了飞速的发展,而以 Vail P R 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”的层序地层学概念提出以后,层序地层学在不断地发展和应用。到现在,已产生了多个分支学科和新学派,如生物层序地层学、成岩层序地层学、高频层序地层学、层序充填动力学、高分辨率层序地层学等。尽管经典的层序地层学理论还存在一定的问题,但由于其理论在学术上的先进性和实践中的适应性,已广泛应用于石油勘探和盆地分析中,不仅有力地推动了地质学,特别是石油地质学的发展,而且在生产实践中取得了巨大的经济效益。然而,随着盆地油气勘探与开发向更复杂、更隐蔽和更深入的方向发展,以及岩性-地层油气藏勘探风险的不断增加,众多进入高含水期老油田的剩余油调查,二次、三次开发工程的井位部署和注、采井调整等复杂地质问题的解决需要更精确的技术来提高层序分析的时间分辨率精度和储层描述与定量预测的准确性。在这种背景下,应运而生的高分辨率层序地层学以其全新的理论、概念、技术方法和显著的实际应用效果,引起了国内外广大石油地质学、沉积学和层序地层学等地质工作者的高度重视。这一理论体系及其技术方法在我国石油勘探开发领域逐步得到推广,获得了显著的经济效益,取得了众多的科研成果,有力地推动了高分辨率层序地层学理论体系及其技术方法在我国沉积学和石油地质学领域的研究和发展。

(二) 高分辨率层序地层学的定义、优势及意义

需指出的是,不同的学者对高分辨率层序地层学中所谓的“高分辨率”定义有不同的理解,有的学者将其作为高分辨率地震地层学的代名词,或将其等同为高频层序,认为在岩性、测井或地震剖面中将层序尽可能地划分为最小成因地层单元即可达到“高分辨率”的目的。作者依据近几年应用该理论体系对多个陆相盆地进行层序分析的体会,结合 Cross 提出的基准面旋回的概念范畴、级次划分和等时对比原则,认为所谓的“高分辨率”的实质,系指“对不同级次地层基准面旋回进行划分和等时对比的高精度时间分辨率”,它既可应用于油气田勘探阶段长时间尺度的层序地层单元划分和等时对比,也适合于开发阶段短时间尺度的地层单元划分和等时对比,所强调的是大幅度提高被对比地层单元的高时间精度分辨率的旋回性和等时性。如前所述,在经典层序地层学中有关层序划分主要有 3 种方案:①以不整合面或相关整合面为层序边界 (Vail, 1987);②以最大洪泛面作为层序边界 (Galloway, 1989);③以地表不整合面或海侵不整合面为层序边界 (Johnson et al., 1985)。以 Cross 高分辨率层序地层学倡导的层序划分类似于“Vail”学派,以不整合面或与之相关的整合面为层序边界,但在层序划分中更多地强调了包括海平面变化、构造沉降、沉积负荷、沉积通量和沉积地形等因素在内的综合作用所制约的基准面升降过程,因而该理论的重要贡献还在于摆脱了经典层序地层学关于海平面变化控制层序形成这一思想对陆相层序地层研究的束缚,从而可以通过对基准面的分析实现高分辨率陆相层序地层格架的构建。更重要的是,高分辨率层序地层学理论及其技术方法的提出,不仅有可能将地层定量研究的精度在时限上提高到万年至千年级、甚至更小的时间尺度,而且由体积划分和相分异原理所决定的地层空间展布也变得可以更加精准地预测,从而为不同时间尺度和厚度规模的地层等时对比和砂体分布的精确描述与预测、评价提供了强有力的分析工具。正因如此,高分辨率层序地层学问世以来,很快受到地质学家们,尤其是石油地质学家们的重视,并在实际应用中取得了巨大成功。

高分辨率层序地层分析以地表三维露头、钻井岩心、测井和高分辨率地震反射剖面为主要研究对象,其中以钻井岩心和测井剖面资料为最重要的研究基础。通过各种资料的精细层序划分和对比技术,将钻井或露头以及地震剖面中的一维或二维信息转化为三维地层关系的信息,从而建立区域、油田乃至区块或油藏级规模储层的等时地层对比格架,大大提高储层、隔层及油层分布的预测和评价精度。实践证明,高分辨率层序地层学的原理和方法是进行含油气盆地中地层成因解释和油砂层对比的一种有效的新方法。它不仅实现了高时间精度的等时地层对比,而且将原来的组合对比结果从感性认识阶段上升到理性认识阶段,研究方法更科学,结果更可靠,信息也更为丰富。诸如在油田范围内运用构造-地层过程的沉积学响应特征进行高分辨率层序划分、对比,建立等时地层格架,在此基础上编制短时间尺度、大比例尺的砂体等厚图及砂岩百分含量等值线图 and 等时沉积微相图,可大幅度提高储集砂体的几何形态、非均质性、储隔层结构等特征的精细描述,从而为储层的三维预测评价,储层建模和流体流动单元划分、数值模拟、剩余油分布状况分析,以及加密井和扩边井部署,注采工艺调整等勘探开发工程中的深层次的精细地质研究,提供更为可靠的地质模型。

(三) 对高分辨率层序地层学的不同认识

这里讨论的高分辨率层序地层学概念 (high-resolution sequence stratigraphy), 是由 Cross 教授提出的源于经典层序地层学的一门重要的分支学科, 其高分辨率层序地层学的概念最初是由 Posamentier 等 (1989) 在研究小型阿伯塔东坷里三角洲时提出的, 是指形成于“大水坑”边缘、在暴雨季节发育的“高分辨率”经典层序地层学。但国内学者对“高分辨率层序地层”有着不同的理解, 特别是在 90 年代中后期, 有些学者在引用“高分辨率层序地层学”的同时, 在概念上存在着将其与“高频层序地层学”和“高精度层序地层学”概念相混淆的问题, 因此有必要对“高频层序地层学”“高精度层序地层学”“高分辨率层序地层学”的概念进行甄别。

1. 高频层序地层学

高频层序地层学 (high frequency sequence stratigraphy) 概念最初由 Van Wagoner 等 (1990) 提出。相当于 Miall (1990) 和 Posamentier 等 (1989) 的四一五级甚至六级旋回, 周期为 $0.01 \sim 0.2 \text{ Ma}$, 是米兰科维奇循环驱动的气候变化和高频短周期海平面变化的综合产物, 属行星轨道参数 (偏心率、偏度和岁差) 不规则变化所产生的旋回层序。最早的高频层序研究可以追溯到对北美中部大陆晚宾夕法尼亚世碳酸盐岩地层进行旋回划分的研究, 当时共划分了 55 个相当于四至六级的高频旋回。后来大量研究也证实了在碳酸盐岩地层中普遍发育四至六级高频层序。Van Wagoner 等还认为: 这种高频层序横向追踪范围最小仅数平方千米, 最大可达数百平方千米, 具局部或区域性对比意义, 在特殊条件下可进行全球对比。国内倡导这种提法并进行研究的学者主要有魏魁生等 (1997a, b)。

2. 高精度层序地层学

高精度层序地层学和高分辨率层序地层学两个名词的英语术语相同, 都是由 high-resolution sequence stratigraphy 翻译而来的, 其中高精度层序地层学为纪友亮等 (1998)、魏魁生等 (2001) 和林畅松等 (2000, 2002) 所倡导的储层规模级的层序地层学。其理论源于 Jervey (1988)、Posamentier 等 (1993) 和 Van Wagoner 等 (1990) 的研究成果, 他们提出了“可容纳空间”“相对海平面变化”“基准面变化”“强制性海退”等重要概念, 不断提高层序和沉积体系域的划分精度, 发展和完善了层序地层学理论。林畅松认为相对于以有限的钻井、露头及地震剖面等资料为基础的低精度层序地层分析而言, 具有密集的钻井、岩心、露头、生物地层、二维和三维地震资料控制的层序地层学称为高精度的层序地层学。因此, 利用岩心、钻井和露头资料, 将作为地层格架的三级层序尽可能划分成更小的四级、五级甚至六级层序, 并依此建立高精度层序地层格架来进行地层对比, 即可达到“高精度”的目的。如魏魁生等 (2001) 根据地震、钻井、古生物、同位素等资料综合分析, 借助于琼东南盆地与全球海平面升降频率和变化趋势的相似性, 共识别出了 19 个三级层序、57 个体系域、57 个以上的准层序组、196 个以上的准层序, 并将高精度层序地层学译为 high-precision sequence stratigraphy。

3. 高分辨率层序地层学

高分辨率层序地层学同样是由 high-resolution sequence stratigraphy 翻译而来。其理论是由 Cross (1994) 所提出的, 在国内的倡导者主要以邓宏文、郑荣才和张昌明等研究者为代表。需要指出的是, 不同的学者对“高分辨率”的含义各有不同的理解, 或将其视