

西安石油大学优秀学术著作出版基金资助

低渗透油藏 有利区预测及工程设计

——以西峰油田延安组油藏为例

张荣军 秦文龙 © 著

石油工业出版社

西安石油大学优秀学术著作出版基金资助

低渗透油藏有利区预测及工程设计

——以西峰油田延安组油藏为例

张荣军 秦文龙 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书利用层序地层学、开发地质学、油藏精细描述、油藏数值模拟及油藏工程等方法和技术,对西峰油田延安组油藏这一典型的古地貌油藏开展综合地质特征研究,分析油气成藏的控制因素及富集规律,预测有利的建产目标区,并对此油藏的剩余油分布规律及开发可行性进行分析研究,最终给出此类低渗透油藏注水开发的油藏工程设计。

本书适合石油勘探、石油工程相关科研和技术人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

低渗透油藏有利区预测及工程设计——以西峰油田延安组油藏为例/张荣军,秦文龙著. —北京:石油工业出版社,2013.8

ISBN 978-7-5021-9687-5

I. 低…

II. ①张… ②秦…

III. 低渗透油层—油田开发—研究—延安市

IV. TE348

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 165419 号

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: <http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部: (010) 64523693 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

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 21.5

字数: 547 千字

定价: 80.00 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

前 言

随着我国常规油藏的开发步入中后期，以及勘探技术和油层改造技术的不断提高，低渗透、特低渗透油田储量的勘探开发已经成为我国陆上石油工业稳定发展的重要保证。

我国在低渗透油田勘探开发方面积累了丰富的经验，已经建成了相当的生产能力，对保障国家的能源安全作出了重大贡献。但随着低渗透油田勘探开发的深入，发现对低渗透油藏的沉积微相分布、砂体展布、成岩作用、储层特征、成藏规律等方面的认识仍然存在不足，直接导致油气的勘探开发效果不佳。本书正是为了研究低渗透油藏油气富集成藏规律、进行建产有利区预测和工程设计而编写的。

鄂尔多斯盆地中生界石油资源丰富，存在多套储盖组合，勘探开发潜力巨大。位于鄂尔多斯盆地西南部的西峰油田是一个储量过亿吨的大型整装低渗油藏。由于对该地区的侏罗系延安组古地貌油藏缺乏系统研究，油气富集成藏规律认识不清，难以预测并确定建产有利区，使该地区进一步的评价及开发受到限制。本书虽以西峰油田延安组油藏为例，但成果中有关进行低渗透油藏有利区预测及工程设计的最新研究方法和技术，可以为相关科研和技术人员从事同类油藏研究时提供借鉴。

本书首先介绍了西峰油田延安组油藏的地质开发研究现状；然后利用层序地层学、开发地质学、油藏精细描述、油藏数值模拟以及油藏工程等方法和技术，对这一典型的古地貌油藏开展综合地质特征研究，分析油气成藏的控制因素及富集规律，预测有利的建产目标区，并对此油藏的剩余油分布规律及开发可行性进行分析研究，最终给出此类低渗透油藏注水开发的油藏工程设计。

与国内外其他同类专著相比，本书更侧重于低渗透油藏有利区预测及工程设计的背景及技术方法，并且在结合理论方法和实际应用的基础上，尽量反映该研究领域的新思维、新方法、新技术，使读者有所裨益。本书编写的具体分工如下：西安石油大学张荣军教授编写第1章、第3章、第4章、第5章、

第11章和第12章，西安石油大学秦文龙讲师编写第2章、第6章、第7章、第8章、第9章和第10章。

本书在完成过程中得到了长庆油田公司石道涵、金正谦、李建霆、李兆明、樊红旗等领导以及西安石油大学陈军斌教授的支持和帮助，笔者特致深深的谢意。在本书撰写过程中，还得到了西安石油大学高永利、高辉等同志的关心和支持，同时长庆油田公司勘探开发研究院、油气工艺研究院、第一采油厂和第二采油厂等单位给予了大力支持和帮助。研究生胡衡、袁家宝、何依林、杨镒泽、王少华等在书稿的整理上付出了很多努力，在此一并致谢。

本书获西安石油大学优秀学术著作出版基金资助。

由于笔者水平有限，书中定有不当之处，敬请广大读者批评指正。

著 者

2013年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
参考文献	39
第 2 章 区域地质及开发概况	43
2.1 构造特征	43
2.2 地层特征	52
2.3 开发概况	58
参考文献	63
第 3 章 地层划分和对比	65
3.1 地层划分思路及方法	65
3.2 地层对比标志及划分依据	69
3.3 地层划分及对比	76
参考文献	82
第 4 章 沉积特征研究	84
4.1 沉积体系及沉积相分析	84
4.2 沉积相划分识别标志	85
4.3 岩电关系转换及测井相研究	90
4.4 沉积相类型及单井沉积相分析	95
参考文献	100
第 5 章 沉积相带与砂体展布特征	101
5.1 物源分析	101
5.2 沉积相与砂体展布特征	112
参考文献	116
第 6 章 储层孔隙结构研究	118
6.1 储层的岩石学特征	118
6.2 储层的成岩作用特征	123
6.3 孔隙类型	138
6.4 孔隙结构	141

参考文献	147
第 7 章 储层特征与综合评价	148
7.1 储层物性特征	148
7.2 储层分布规律	154
7.3 储层四性关系研究	155
7.4 储层非均质性分析	159
7.5 储层物性及其非均质性的影响因素	163
7.6 综合评价	169
参考文献	173
第 8 章 油源对比和成藏期次研究	174
8.1 原油、烃源岩地球化学特征与原油成因和油源对比	174
8.2 原油含氮化合物特征与石油运移方向	176
8.3 储层包裹体特征与石油运移期次	182
8.4 油气成藏时期的确定	183
参考文献	185
第 9 章 成藏富集规律及有利区预测	186
9.1 成藏地质条件分析	186
9.2 油藏类型及特征	191
9.3 油藏控制因素及油气富集规律	193
9.4 有利区预测	210
参考文献	220
第 10 章 流动单元与剩余油分布规律研究	222
10.1 马岭油田概况	222
10.2 储层流动单元研究	230
10.3 三维地质建模	238
10.4 油藏数值模拟	253
10.5 剩余油分布规律及其调整方案	260
参考文献	270
第 11 章 油藏评价与开发可行性研究	271
11.1 油藏中流体分布与性质研究	271
11.2 油藏的压力与温度	274
11.3 油藏的渗流特征	277
11.4 油藏的天然能量和驱动方式	286

11.5 油气储量计算与评价·····	290
参考文献·····	297
第 12 章 油藏工程设计 ·····	299
12.1 开发层系划分·····	299
12.2 开发方式研究·····	303
12.3 井网设计·····	311
12.4 注采压力系统·····	320
12.5 单井产能·····	325
12.6 采油速度·····	328
12.7 注水强度和注水量·····	332
参考文献·····	334

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

当前我国陆上石油工业面临后备石油储量十分紧张和探明未动用地质储量中大部分为低渗透油田储量的双重严峻挑战。根据初步统计,我国陆上已探明未动用储量中有一半以上是低渗透储量。因此,如何进一步经济有效地开发好低渗透油田,对我国石油工业持续稳定增长有至关重要的作用。鄂尔多斯盆地作为我国第二大沉积盆地,蕴藏着丰富的煤、石油、天然气等多种能源矿产,是我国的重要能源基地,就油气而言,具有油气分布广、含油气层位多、孔隙度和渗透率低等特点^[1,2]。目前,盆地中生界石油资源丰富,存在多套储盖组合,勘探潜力巨大。20世纪70年代初首先发现了马岭、华池和吴旗等大型侏罗系古地貌式油藏,随后又发现了安塞、靖安和华池等三叠系延长组三角洲相大型岩性油气藏,特别是近年来西峰油田、姬源油田、白豹油田、合水油田的发现,再次证明了盆地中生界仍有较大的勘探潜力。

研究区位于甘肃省东北角环县、华池、庆阳和镇原县区内,包括环县、木钵、八珠、郝家涧及其他邻区,总面积约为 2577.87km²,构造位置西起天环坳陷东南部,东至伊陕斜坡西南部,恰好在两个构造单元的交界处。近两年的勘探实践虽在该区延长组油层取得重大发现,但与鄂尔多斯盆地其他地区相比,该区亟待大的突破。经过近 30 年先后五次勘探之后,长庆油田公司 2004 年第六次在这一区域甩开勘探,终于拿下这个整装低渗透油田,成为长庆油田公司原油产量快速增长的又一个重要接替区。但是西峰油田姬源南斜坡侏罗系延安组古地貌油藏分布范围小,长期以来一直没有大的发展。近年的研究和生产实践表明,在姬源南斜坡的中深层研究和勘探中还有很多问题尚未完全解决,总结起来主要有以下几个方面:

(1) 姬源南斜坡地区侏罗系油藏探井成功率较低,油藏空间变化复杂,缺少大面积连片油藏,目前的研究仅局限于对各个开采的小区块进行研究,对整个油区的研究相对较弱,特别是对全区构造、沉积相和微相的研究程度较低。

(2) 由于受到了多期构造运动的改造,中深层原型盆地特征不清,在高分辨率层序地层学分析的基础上,对古地貌形态和标志层构造起伏进行了精确刻画,恢复延安组沉积相和砂体展布规律是一个急待解决的问题。

(3) 对中深层油气成藏规律认识不清。研究区已发现的油藏以地层、岩性隐蔽油气藏为主,沉积相带的展布与油气的分布具有密切关系,这要求对研究区沉积相和沉积微相进行研究,认清其与油气成藏的关系,提出有效的勘探开发策略。

近几年的勘探、评价过程中,在西峰油田姬源南斜坡内发现侏罗系出油井点,试油试采产量较好,表现出较好的增储上产前景,但是还缺乏系统的地质认识,使该地区进一步的评价及开发受到限制。因此,以整个姬源南斜坡地区为研究对象,利用高分辨率层序地层学理论原理,建立研究区的层序地层格架,探讨层序地层格架内的砂体展布和沉积微相特征,认清研究区的沉积演化和沉积模式,研究姬源南斜坡侏罗系油藏成藏规律,筛选建产有利目标

区为产能建设提供坚实的地质依据,同时为长庆油田制订以后的开发决策和部署提供科学依据。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 层序地层学研究

1.2.1.1 层序地层学的沿革及高分辨率层序地层学的提出

沉积地质学的发展经历了三个阶段。前两个阶段始于 1960 年,包括作用—响应地质模型的建立和板块构造概念在大比例尺盆地分析方面的应用。第三个阶段也就是层序地层学阶段,始于 1970 年。层序地层学的提出,把前两个阶段的成果完美地结合在一起,即把通过相分析所获得的自生作用 (autogenic process) 认识和区域性的板块运动所揭示的构造作用的认识结合在一起。地震反射资料在地层解释中的应用和全球海平面变化假说的形成使地层学的研究进入了一个崭新的阶段。

层序地层学是 1970 年末由 E. R. Vail 及其在 Exxon 公司的同行 R. M. Mitchum 和 J. B. Sargree 等在地震地层学基础上创立起来的一门新的地层学分支科学。Vail 提出的层序地层学认为,层序发育的主要控制因素是全球海平面升降,并提出它是研究一套由侵蚀面或无沉积面或与之相当的整合面所限定的、重复出现并有成因联系的、限制在一定年代地层格架内的岩石序列,从而体现了成因地层学本质。Vail 等提出层序 (sequence) 是层序地层学研究的基本单元,并定义层序是一个成因上相关、内部相对整合连续的地层单元,其顶、底被不整合面或与之相对应的整合面所限定。由于层序界面的等时性和层序内沉积的连续性,使层序体现了年代地层和岩石地层的双重属性。

由于该理论因为具有科学性、先进性、实践性和预测性,已被广大地学工作者所认可,且以蓬勃之势发展起来。J. Robert、Weimer 甚至把层序地层学理论看作是继板块构造学说之后地学的又一次革命。

继 Vail 之后, Galloway 认识到 Vail 理论中划分层序边界的不整合可能缺失,而相当于不整合的整合面也不容易定义,也就不容易识别和作图,因而创立了成因地层学理论。

成因地层学以最大海泛面作为层序边界,在露头 and 测井曲线上,最大海泛面总是有明显的标志,在有些情况下,最大海泛面由于海侵期对下伏地层的冲刷侵蚀,可能形成不整合面,使成因层序边界与 Vail 的经典层序地层学所定义的层序边界重合。

在地震剖面中,成因地层学所定义的层序边界即最大海泛面极易识别,它通常以强同向轴出现,地震解释的时间地层界面常与最大海泛面对应,极易识别和作图。在两个层序边界之间可以很好地研究沉积体系。

层序地层学应用于海相的沉积盆地分析和油气的勘探方面已经形成了完备的理论体系,取得了很大的成功,带来了巨大的经济效益。但是,形成于依据被动大陆边缘为背景的海相沉积的层序地层学应用于陆相时出现了许多问题。

陆相盆地与大陆边缘盆地的主要差别在于:

- (1) 陆相盆地与海水不连接,因此与全球海平面升降变化的关系不密切。
- (2) 构造因素在盆地的发育中居支配地位,而且在沉积盆地内部,构造分区明显,并直

接表现为沉降分异的较大变化。

(3) 陆相盆地中气候因素对沉积物供给的影响更为明显。陆相盆地碎屑沉积具有物源区近、堆积速度快的特点，沉积物中具突发性事件沉积所占比例较大。

(4) 陆相盆地沉积相变大，相带狭窄，沉积间断多，沉积体系类型较之大陆边缘盆地更为丰富、复杂多样。

针对陆相盆地与被动大陆边缘的差异，李思田等人提出了不同于国外海相层序地层学模式的陆相层序地层学。他们认为陆相层序的充填风格、沉积体系都有其自身的特点，其层序的控制因素不同于海相层序，构造作用在其层序发育过程中扮演着十分重要的角色。他们把相和沉积体系放到盆地整体地层格架内，按等时界面划分，识别并对比层序界面，划分层序，提出了盆地充填系列和构造层序。盆地充填系列指盆地充填的整体，在大型叠合盆地条件下，包括了不同原型盆地沉积充填的总和，构造层序指界于 I 级古构造界面（大区域性的不整合面及假整合）之间的沉积序列，与 Hubbard 的大层序（Megasalience）大致相当，其内部常有次级的古构造面，伴有侵蚀和间断。构造层序由界于 II 级古构造面间的层序组成。他们认为层序具有三分性，层序的顶界面是古构造运动面，下部反映了初始充填或早期充填的特征，古地貌复杂，冲积体系发育；中部为相对稳定阶段周期性的水进，主要是三角洲—湖泊发育期；顶部河流作用强化，分异性强，是新构造演化的前奏。他们认为体系域可以划分为沉积体系单元、成岩相、成因相内部单元、岩性—能量单元等一系列不同级别的建造。我国的含油气盆地以陆相地层为主，很多学者应用陆相层序地层学理论指导油气勘探开发取得了大量的研究成果。

Cross 提出了高分辨率层序地层学理论，邓宏文首次将该理论体系在国内作了较为详细的介绍。高分辨率层序地层学是近年来新崛起的层序地层学新学派。高分辨率层序地层学理论的核心是：在基准面旋回变化过程中，由于可容纳空间与沉积物补给通量比值（A/S）的变化，相同沉积体系域或相域中发生沉积物的体积分配作用，导致沉积物的保存程度、地层堆积样式、相序、相类型及岩石结构发生变化。这些变化是基准面旋回中所处的位置和可容纳空间的函数。

1.2.1.2 层序地层学和高分辨率层序地层学的研究现状

近年来，层序地层学在国内外的研究呈蓬勃发展之势，许多新的研究成果不断涌现。表 1.1 为以 sequence stratigraphy 和 high resolution sequence stratigraphy 为关键词在 Elsevier 上搜索的近几年的文章的统计，以及以“层序地层”和“高分辨率层序地层”为关键词在清华同方科技期刊数据库和重庆 VIP 全文数据库搜索的近几年的论文的统计^[3,4]。由表 1.1 可以看出，国内外近几年与层序地层学有关的文章呈明显的上升趋势。在 1995 年以前，与层序地层学有关的文章很少；1995 年之后，相关文章迅速增加。

表 1.1 三个中外学术期刊数据库与层序地层学有关文章的统计数

数据库 \ 年度	1992—1994	1995—1997	1998—2000	2001—2003	2004—2006
Elsevier science	0/9	12/263	10/261	13/280	171/857
清华同方科技期刊数据	0/0	7/319	36/346	96/419	93/528
重庆 VIP 全文数据库	0/93	0/290	3/438	29/462	76/480

注：分子代表与高分辨率层序地层学有关的文章，分母代表与层序地层学有关的文章。

贾承造介绍了 2002 年 AAPG 年会反映的层序地层学理论和应用新进展,认为层序地层学的新进展体现在三个方面,即新理论、新技术、新应用。新理论主要包括运动学层序和体系域、地球半径周期性变化引起的深海盆地千米级规模的海平面变化、深海页岩层序识别和陆架边缘崩塌基准面及崩塌层序等,提出气候变化是高频层序形成的主控因素,验证了米兰柯维奇(Hilankovitch)旋回中 40×10^4 a 离心率周期造成海平面变化的理论。新技术有古生物学分析方法、三维可视化技术、数理统计和神经网络分析、数学模拟法。新应用体现在碳酸盐岩层序地层学研究、层序地层与成岩作用、圈闭研究、含油气系统研究、油藏精细描述、油藏动态预测、烃源岩研究等方面。

徐强概括了中国层序地层研究现状,把层序地层学的发展分为三个阶段:萌芽阶段、快速发展阶段、成熟发展阶段。在中国,区域层序地层研究、层序地层理论体系、层序地层与矿产控制作用、层序地层与油气勘探、高分辨层序地层和米兰柯维奇旋回及米级旋回层序地层、陆相层序地层(包括冲积体系和沙漠体系)、新技术及新方法在层序地层中的应用(包括地震、测井、计算机模拟、中子技术、宇宙核素等)、盆山转换和动力层序地层、青藏高原层序地层及造山带层序地层、成岩层序地层和化学层序地层、构造层序地层、层序地层岩相古地理编图等各个方面都有很大发展,取得了丰硕的成果。

1.2.1.3 层序地层学和高分辨率层序地层学的最新进展

贾承造指出层序地层学可能向以下三个方向发展:

(1) 总趋势是多学科综合。国内外许多层序地层学研究已将古生物学、地层学、岩石物理学、有机地球化学以及岩石学等综合应用。

(2) 研究手段日益更新,在传统的露头及岩心描述、测井/地震资料处理与解释的基础上,应用三维可视化技术、数理统计、人工神经网络分析、模式识别、数值模拟等许多新技术。

(3) 层序地层学与含油气系统研究、成岩作用、油气田开发生态、油藏描述、储层精细描述、烃源岩预测等结合,逐步解决实际问题,在油气勘探中的应用领域将不断扩大。

层序地层学领域的最新进展集中在如下三个方面:

(1) 评价各种沉积环境和海平面变化历史期间的层序—建造模型。

(2) 探索各种各样的层序形成机制,尤其是构造作用和地球轨道力对层序形成的控制作用。

(3) 提高地层对比的精度,改进地质年代表,以其作为鉴定全球海平面变化模型的标准。

计算机的应用以及物理作用、化学作用的知识使地质工作者能够用一种全新的方式来研究地球的演化历史。现在,复杂地质作用的数学模型和数值模拟已经成为可能,它要求地质工作者收集和综合大量的定量的和定性的资料和数据。应用包括沉积盆地地球动力学演化的研究、层序地层和全球气候变化的模拟、米兰柯维奇旋回的研究(旋回地层学)和孔隙介质中流体的模拟。全球沉积地质计划(The Global Sedimentary Geological Program)的实施运用多学科和全球规模的地球沉积历史的研究,并把这些方面结合在一起。这些结果被广泛地应用于与人类活动有关的许多方面,包括过去的全球气候的变化和其他环境问题。地层学的研究已处在了新的地球观的中心位置,称之为地球系统科学(earth-system science),它把地球看作是岩石圈、生物圈、水圈和大气圈之间“有机的”相互作用。

1.2.1.4 鄂尔多斯盆地侏罗系层序地层学及沉积体系研究现状

层序地层学本身是一门新兴的学科，鄂尔多斯盆地层序地层学的研究只是近年来才刚刚兴起。侏罗系是鄂尔多斯盆地多种能源矿产共存富集的重要层位，具有油气、煤、铀共存富集的特点。煤的形成和富集直接与沉积环境和沉积作用密切相关。油气由于具有运移的特点，有自生自储、下生上储和上生下储等多种生储组合，侏罗系的油源是其下伏的三叠系延长组泥岩。姚素平用实验研究了三叠系、侏罗系的煤成烃潜力，认为侏罗系的煤系生油潜力低，不能形成工业性油藏，侏罗系泥岩是否具有生油潜力及潜力如何，还需要进行系统的研究。但是，侏罗系油藏的储集砂体和封盖组合无疑与沉积环境和沉积作用直接相关。砂岩型铀矿虽然可能不是沉积时直接形成的，它的形成可能与油气的运移和后期的氧化淋滤有关，然而，砂岩型铀矿明显具有“层控”的特点。研究表明，砂岩型铀矿与沉积体系具有密切的关系。

李思田等发表了论文《大型陆相盆地层序地层学研究——以鄂尔多斯中生代盆地为例》，李宝芳等出版了著作《鄂尔多斯盆地中侏罗统沉积体系和层序地层》。这些学者的论文和著作可能是鄂尔多斯盆地最早的层序地层学研究成果，开创了鄂尔多斯盆地层序地层学研究的先河。随后，有关鄂尔多斯盆地层序地层学的研究呈蓬勃发展的趋势。魏魁生进行了鄂尔多斯盆地北部奥陶系碳酸盐岩层序地层研究。陈波探讨了鄂尔多斯盆地中部三叠系延长组层序地层学。张周亮研究了鄂尔多斯盆地山西组的层序地层。蔡忠贤探讨了鄂尔多斯盆地南缘寒武系层序地层和海平面变化。翟爱军等研究了上古生界层序地层及煤层在层序地层中的位置。樊太亮论述了鄂尔多斯盆地北部上古生界层序地层特征。杜春彦等研究了长 6 油层的短期旋回与储层非均质性的关系。汪泽成建立了鄂尔多斯盆地含油气区构造层序地层。郑葆英对鄂尔多斯盆地中部石炭系进行了层序地层分析。陈洪德探讨了鄂尔多斯盆地晚古生代沉积层序地层学与盆地构造演化。侯中健进行了鄂尔多斯盆地晚古生代陆相沉积层序地层学研究。郑荣才等对鄂尔多斯盆地上古生界高分辨率层序地层进行了分析。姜焯等进行了鄂尔多斯盆地东北部太原组上部灰岩段高分辨率层序地层分析。赵俊兴等研究了鄂尔多斯盆地中部延安地区中侏罗统延安组高分辨率层序地层。李文厚研究了苏里格庙地区上古生界层序地层学。唐海发进行了高分辨率层序地层学研究及其在大牛地气田山一段地层对比中的应用。赵宏刚进行了鄂尔多斯盆地南部上三叠统层序地层学研究。王超勇等研究了鄂尔多斯盆地西缘延安组层序地层划分。章贵松进行了鄂尔多斯盆地西缘晚古生代层序地层划分。韩美莲进行了鄂尔多斯盆地南缘晚古生代层序地层分析。梁积伟进行了鄂尔多斯盆地东北部山西组高分辨率层序地层学研究。还有很多的研究工作主要集中在近 5 年来发表的博士和硕士论文，主要有《苏里格庙地区上古生界沉积相与层序地层学研究》、《鄂尔多斯中东部上古生界层序地层与深盆地储层研究》、《鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组沉积体系与层序地层学研究》、《鄂尔多斯西缘地区二叠系太原组、山西组沉积体系研究》、《鄂尔多斯盆地东北部上古生界测井层序地层研究》、《鄂尔多斯盆地桥镇地区三叠系延长组和侏罗系延安组沉积相与储层特征研究》、《鄂尔多斯盆地西南部长 8 油层组高分辨率层序地层学研究》、《鄂尔多斯盆地榆林—延安地区侏罗系沉积体系与主要砂体研究》、《鄂尔多斯盆地上古生界层序地层研究》。

这些研究工作以层序地层学理论为指导，探索了在鄂尔多斯盆地建立层序地层格架的方法和途径。这些成果不仅填补了鄂尔多斯盆地层序地层学研究的空白，其中的一些观点和结论已经成为研究鄂尔多斯盆地层序地层学的经典研究成果，成为后来盆地层序地层学研究的

指南和参考。但是,由于鄂尔多斯盆地层序地层学研究仅仅开端于10年前,其兴起主要在近5年内,通过以上学者研究内容的列述可以看出,这些研究工作具有如下特点:

(1) 古生界研究较多,中生界研究相对较少。中生界的研究大多限于含煤和油气的三叠系延长组和侏罗系延安组。对于盆地的侏罗系来说,层序地层学研究只是在延安组进行了尝试,对富县组、直罗组和安定组研究很少,几乎为空白。

(2) 专题研究多,综合研究少。

(3) 小区域研究多,整个盆地的研究少。

(4) 研究范围不同,得出的结论各异。

(5) 应用的层序地层学原理不尽相同。这一方面是由于鄂尔多斯盆地早古生代和晚古生代早期为海相地层,晚古生代晚期为海陆交互相和陆相地层,而中生代全部为陆相地层等差异造成的;另一方面也是由于各研究人员分别属于不同的层序地层学流派,从不同的层序地层学理论原理出发得出各自的认识。

所以,鄂尔多斯盆地层序地层学的研究远非成熟和完善。如今,鄂尔多斯盆地层序地层学研究呈蓬勃发展之势。从层序地层学的角度,把侏罗系作为一个整体进行盆地尺度的研究还没有进行过。

层序地层学作为一门年轻的学科,已经被广泛应用于海相盆地的石油勘探开发中,并取得很好的效果,但在其理论体系中还存在着不少问题,特别是目前的层序地层学理论和模式都起源于海相地层,对于更为复杂的陆相地层很难应用。我国的地质工作者们早已意识到这一点,并且经过不懈的努力,已经在海相层序地层学的基础上发展了陆相层序地层学,而且在陆相层序地层学的研究领域走在了国外学者的前面。当然,目前我国陆相层序地层学的研究仍处于摸索阶段,尚未产生系统的、完善的理论和公认模式。总体来说,层序地层学在油气勘探中的应用是大有可为的,关键是要在深刻理解层序地层学理论精髓的基础之上,建立适合鄂尔多斯盆地的层序地层学模式。

1.2.2 沉积体系研究

沉积学的研究历史源远流长,从地质学出现就开始了沉积学方面的研究,其概念起源于19世纪初。19世纪中期以前,莱伊尔、达尔文、葛利普、裴蒂庄、克鲁宾、克里宁、史洛斯等地质学家对早期沉积学的研究作出了重要贡献。到20世纪中期以后,沉积学和岩相古地理学进入现代研究阶段,主要出现了以道格拉斯的《沉积岩石学到沉积学》、布拉特等的《沉积学成因》、里丁的《沉积相与沉积环境》等为代表的沉积学研究理论著作,他们把沉积学研究从最初的沉积岩石学、沉积学推进到沉积地质学阶段。近些年来,随着沉积学研究的深入,在大地构造沉积学、资源沉积学、层序地层学、储层沉积学、全球变化沉积与环境沉积学等方面取得了重大的进展^[5-7]。

沉积体系是指成因上被沉积环境和沉积过程联系起来的三维组合,其概念和研究方法主要由北美学者Brown和Fisher等提出并完善,后来在沉积学领域得到广泛的应用。沉积体系类型主要受控于盆地构造背景与古气候等因素,目前较常见的有冲积扇沉积体系、河流沉积体系、三角洲沉积体系、湖泊沉积体系以及海洋沉积体系。

20世纪90年代以前,我国沉积学发展主要处于向国外学习和自身理论充实与完善阶段。20世纪90年代以后,随着层序地层学理论的引进、油气沉积学的快速发展,以及地震、测井、录井、实验与测试分析、盆地沉积模拟、计算机等技术的发展与应用,我国沉积

学的发展已经和油气等沉积矿产资源生产相结合,在此阶段出版和发表了大量关于油气等沉积矿产的书籍和文章。

目前,沉积学及盆地构造分析理论相对比较完善,研究技术和手段日益先进,且与其他学科交叉渗透出现了一系列的相关学科,如沉积动力学、沉积岩石学、层序地层学、构造沉积学、地震构造学、测井沉积学等。随着沉积学、构造分析的发展,目前已从对局部沉积、构造的研究扩大到了整个盆地范围。认识各种类型的沉积相,建立相应的相模式,已成为当前沉积学研究盆地的重要方面,而且已经建立起了相对比较完善的各种构造背景下的沉积模式,并在油气勘探中得到了广泛应用;而对于盆地构造分析学来说,经过前人的研究和我国地质工作者的努力,已经建立起了基本能够适应我国各类陆相沉积盆地的构造解释模式。

此外,随着计算机技术日新月异,对沉积学进行定量分析、构造解释自动完成已呈大势所趋,目前国外在这方面已有较大进展,大型研究分析软件层出不穷,而国内尚停留在半量化、半自动化阶段。充分利用计算机和数学知识更好地为地质研究服务,使地质研究有更大发展,是我国广大地质工作者努力的方向。

1.2.2.1 关于沉积学的研究

沉积学的概念最早是由 Wadell 于 1932 年提出的,当时只是简单地定义为“研究沉积物的科学”。1978 年 Friedman 等才对其研究领域给予了较为完整的定义,即“研究沉积物、沉积过程、沉积岩和沉积环境的科学”。1980 年美国出版的《地质学术语》(Glossary of Geology)一书中将其定义为“对沉积物的来源、沉积岩的描述和分类以及沉积物形成过程进行研究的学科”。

自 20 世纪 50 年代以来,沉积学的研究不断取得新的进展,成为地球科学中最活跃的学科领域之一。除了碳酸盐岩和浊积岩外,在蒸发岩、磷块岩、沉积构造、河流沉积作用、三角洲沉积作用、湖泊沉积作用、生物礁沉积作用、深海沉积作用和风成沉积作用等方面,都取得了令人瞩目的进展。沉积模拟实验也普遍受到重视,水槽实验的重大突破为定量沉积学研究奠定了基础。这一时期也是沉积学在理论上进行升华的时期,出现了一大批重要著作,如 Potter 和 Pettijoh 的《古水流和盆地分析》、Allen 的《水流波纹》、Reading 的《沉积环境与相》、Walker 主编的《相模式》等。比较沉积学的诞生是沉积学进一步趋向成熟的重要标志。20 世纪 60 年代,相模式的出现使比较沉积学的认识论发生了一次意义深远的质的飞跃。当代的比较沉积学已不是岩石类型或成因标志的简单类比,而是模式的对比。沉积学家已经通过地质记录的观察、现代沉积作用的研究和实验模拟,建立了诸沉积相的标准模式或一般模式。因此,比较沉积学已经成为具有独立的、完整的理论和方法学科体系。

沉积体系的提出是相分析理论的进一步发展。这一概念首先由 Fisher 和 McGowen 提出。沉积体系的思想是 Walther 相律的进一步延伸和深化。一个沉积体系是由不整合或相的间断面限定的一个沉积地质体。即使它有自己的确定的横向环境序列和纵向剖面序列,但相邻的沉积体系之间却没有相序上的必然联系。

从 20 世纪 80 年代至 20 世纪末,高新技术的发展和运用以及各学科间的相互渗透使沉积学家逐渐认识到,地质记录中存在各种规模不一,在纵向上呈规律分布,侧向上可进行大陆内、大陆间或全球对比的沉积旋回或韵律事件,由此进入“沉积地质学”发展阶段。沉积地质学强调古气候在沉积记录中的意义,注重沉积记录的全球的同时性研究,强调各种事件在沉积作用中的意义,强调全球海平面变化在沉积记录中的作用;研究的内容不是一组地层

的沉积学特征，而是地壳某一个地段的沉积环境、沉积作用及其物质表现在时间和空间上的变化，包括性质、规模和速率的变化，进而探讨这种变化的原因和驱动力。它与传统地层学有交叉之处，但它的主体还是沉积学以及沉积作用在时空上的演变。因此，应当把它看作是沉积学的新发展，是沉积学和地层学在新的形势要求下和更高层次上的交叉，是沉积地球科学发展的一个新阶段。

沉积地质学的另一重要发展是盆地分析理论的提出及其在油气勘探、资源评价中的应用。沉积学与地层学、构造地质学相结合，利用地球物理等先进手段，在时空四维格架内研究盆地的演化历史和油气生成、运移、聚集和保存的规律，这就是盆地分析。沉积学的发展、板块构造理论的出现、沉积体系的提出、地震地层学和层序地层学的发展、年代地层学的发展以及计算机模拟技术的成熟，为盆地分析奠定了理论和方法基础。

沉积学经过几十年的研究历程，以及多学科交叉渗透，有了很大的发展，研究内容从早期的沉积物的物质组分、结构、构造以及岩层间相互接触关系、沉积岩的形成机理、沉积环境分析，向多学科、多信息方向发展。

随着油气勘探的需求，逐渐发展出地震沉积学与碳酸盐岩储层缝洞雕刻技术、沉积学露头实验室技术、沉积学实验新技术以及新一代油藏新技术、结合低渗透碎屑岩储层大型压裂技术、碳酸盐岩缝洞体系分段选择性酸压改造技术以及火山岩储层改造技术，使得精细刻画沉积环境、分析沉积相空间展布、预测砂体分布规律在技术上做好了准备。

沉积学研究在国内外取得了重大进展，主要表现在层序地层学、事件沉积学、矿床沉积学、实验沉积学、大地构造沉积学、储层沉积学、全球旋回地层学等的诞生和发展。特别是在油气勘探和开发的带动下，沉积相研究有了飞速的发展。研究人员按照新的地球观发展了沉积学和岩相古地理学，通过研究全球变化问题，从整个地壳演化的角度认识了沉积—岩相古地理的规律及各种地质现象，并以活动论为指导，重建古地理和古环境。这些全新的观点和理论，推动了科研和生产的发展，特别是对油气勘探和开发起到了重要的指导意义。进入 21 世纪，长庆油田在鄂尔多斯盆地的石油勘探取得了一系列令人鼓舞的成绩。

1.2.2.2 关于层序地层学的研究

层序地层学是一种划分、对比和分析沉积岩系的新方法。这种方法极大地帮助了人们对地层成因和盆地构造的认识，为建立等时地层格架提供了一个强有力的手段。作为油气勘探与开发研究的新理论，层序地层学为综合研究油气成藏组合提供了一种科学而有效的新方法。20 世纪 70 年代，P. R. Vail 等学者将层序概念引入地震勘探领域，出版了《地震地层学在油气勘探中的应用》论文集，创立了地震地层学。1988 年，P. R. Vail 进一步提出了层序地层学概念，由其主编的《海平面变化综合分析》一书的问世标志着层序地层学作为一门独立的学科而诞生，在该书中他将层序地层学表述为是研究一套由不整合面及其相应的整合面为边界的、具有成因联系的时间地层格架中岩层间相互关系的一门学科。层序地层学一经问世，迅速推动了地质学科各个领域的发展。

目前，层序地层学理论主要包括 Exxon 沉积层序学、Galloway 成因地层学和 Cross 高分辨率地层学。Exxon 沉积层序理论是由 P. R. Vail 为代表的 Exxon 公司的学者创建的。该理论将层序作为研究的基本单元。层序被定义为一套顶、底以不整合面及与之相邻的整合面为边界的、相对整合的、成因上有联系的地层单元。层序又进一步被细分为体系域，体系域则由准层序和准层序组构成。准层序是由海泛面（或与之相当的面）限定的、有成因联系的

一组相对整合的层或层组。Galloway 成因地层学理论创建于 1989 年, 该理论强调以最大海泛面作为层序边界。1988 年由 T. A. Cross 领导的科罗拉多矿业学院的学者提出了高分辨率层序地层学。该理论与其他层序地层学的不同之处在于, 它以地层基准面作为层序的界面进行地层划分和对比。

1.2.2.3 沉积相与沉积模式研究现状

自 20 世纪 50 年代以来, 沉积学的研究不断取得新的进展, 成为地球科学中最活跃的学科领域之一。这一时期也是沉积学理论不断丰富的时期, 代表性著作有 Reading 的《沉积环境和相》、Walker 的《相模式》等。

最早赋予沉积学中的“相”以沉积学含义的是瑞士学者 Gressly, 后来, 地质学家在使用“相”这个术语时却发生了混乱。近年来, 随着沉积学的飞速发展, 人们对“相”的认识也逐渐统一。当前国内外多数学者是把相或沉积相看作是沉积环境的物质表现, 在一定的沉积环境中进行着一定的沉积作用, 并形成一定的沉积组合。“相”是能表明沉积条件的岩性特征和古生物特征的规律综合。近二三十年以来, 随着沉积学理论的发展, 开创了根据岩石薄片进行微相分析的新领域。Flügel、Wilson 在 20 世纪 70 年代都对微相进行过研究。

我国有大量的中—新生代陆相盆地, 多年来沉积学家们在对沉积环境的研究中, 积累了丰富的经验, 取得了较大进展。裘怿楠将我国中—新生代陆相碎屑岩充填方式归纳为 8 种模式。McPherson 将粗碎屑三角洲进一步分为扇三角洲和辫状河三角洲两类, 强调扇三角洲由冲积扇直接进入停滞水体形成, 而辫状河三角洲则由辫状河体积进积到停滞水体形成。目前, 这一划分已得到公认。随着研究的进展, 也出现了一些新的沉积体系。张金亮 1988 年首次发现了风暴沉积, 并对其进行了研究。此后, 张金亮等通过对东濮凹陷濮城油田的研究, 提出了在中国一直以来被忽略的一种沉积作用类型——末端扇沉积, 这都极大地丰富了陆源碎屑岩沉积学。

1.2.2.4 关于鄂尔多斯盆地内部侏罗系延安组的研究

关于鄂尔多斯盆地延安组的研究历史源远流长。早在 1933 年, 王竹泉、潘钟祥等人就将侏罗系划分为上侏罗统与下侏罗统, 其中下侏罗统的一套含煤地层被称作瓦窑堡煤系(包括上三叠统的一部分)。新中国成立后, 1950 年, 王尚文等人对下侏罗统进行了细分, 进一步将其分为上段的延安组与下段的瓦窑堡煤系, 又将其中的延安组划分为两段, 上部为枣园段, 下部为延安砂岩段。李德生在 1951 年对延安组进行了细分, 不过将其分为三段, 上部为枣园层, 中部为延安砂岩, 下部为富县砂层。宋四山等人在 1954 年将整个下侏罗统称作延安组。1960 年以前的一般将延安组上部称作枣园段, 下部称作延安砂岩。1974 年国家计划委员会地质总局第三石油普查大队将延安组称作延安群, 并将其划分为 5 个段。长庆油田在 1992 年将延安组归入中侏罗统, 并划分为四个岩性段 10 个油层组。现在一般在生产实际中都采用油层组的划分方法, 本书也是采用了长庆油田的划分方法, 主要研究了盆地南部延安组的地层层序特征、沉积体系特征、古地理演化、物源以及砂体展布特征, 并在此基础上指出了延安组的有利区块。

中侏罗统延安组在全盆地发育, 是盆地内部最重要的含煤、油地层之一, 主要为深灰色泥岩、粉砂岩及黄灰色中—细粒砂岩夹煤层的一套碎屑岩系, 其下以假整合接触关系覆于富县组之上或以角度不整合直接覆于上三叠统延长组之上, 其上的直罗组呈平行不整合关系