

陆相断陷盆地层序地层学研究

——以渤海湾盆地东营凹陷为例

冯有良 李思田 邹才能 著



科学出版社

www.sciencep.com

2019-2020 中国能源发展报告

中国能源发展报告 2019-2020

中国能源发展报告 2019-2020



中国能源发展报告
CHINA ENERGY DEVELOPMENT REPORT

陆相断陷盆地层序地层学研究

——以渤海湾盆地东营凹陷为例

冯有良 李思田 邹才能 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以渤海湾盆地东营凹陷为例,运用层序地层学的基本原理和分析方法,对陆相断陷盆地层序级别的划分、层序界面识别标志、层序界面的成因及其地质意义和层序地层等时格架的特征进行了深入细致的分析,在等时地层格架内研究了不同体系域沉积体系的发育特征。在此基础上,研究了不同构造背景断陷盆地层序地层的体系域构成模式;探讨了盆地构造活动、气候、基准面变化、物源供给对层序发育的控制作用和基于不同构造背景下层序体系域的构成模式;研究了在层序地层格架中有利砂体的预测方法。在层序地层格架内,研究了隐藏圈闭的发育特征、油气成藏条件、成藏动力学、输导系统和油气成藏模式,指出了断陷盆地基于层序地层格架的砂岩隐蔽油气藏预测方法。

本书可供广大石油勘探生产部门、研究人员和大专院校的石油地质专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

陆相断陷盆地层序地层学研究:以渤海湾盆地东营凹陷为例/冯有良,李思田,邹才能著. —北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-017355-4

I. 陆… II. ①冯…②李…③邹… III. ①渤海湾-陆相-断陷盆地-含油气盆地-地层层序-研究②渤海湾-拗陷-陆相-油气藏-研究 IV. P618.130

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 056810 号

责任编辑:谢洪源等 / 责任校对:李奕莹

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006年8月第一次印刷 印张:13 1/2 插页:16

印数:1—1 300 字数:307 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

以渤海湾盆地为代表的中国东部中生代陆相断陷盆地是最为丰富的含油气盆地。其特征是多幕裂陷叠加、盆地分割性强。每一凹陷被凸起（隆起）分隔，凹陷常发育成半地堑（箕状）或地堑。每一凹陷构成了独立的生油和聚油的系统。在凹陷内地层、砂体和生油岩的发育明显受控于同沉积构造和古地貌。因此在陆相断陷湖盆要建立等时地层格架使其不但能客观反映盆地的充填序列，而且能在等时地层格架内根据地层的充填模式预测砂体、烃源岩甚至油藏非常困难。传统的岩性地层和古生物地层单元具有一定的等时性，但该地层单元不能反映湖盆具有成因意义的沉积序列。而层序地层学的基本方法和分析原理能很好的解决上述问题。应用层序地层学方法研究一个断陷湖盆的层序地层格架、层序的体系域构成模式、预测砂岩隐蔽油气藏的发育是本专著的一个基本出发点。为此本专著选择了渤海湾盆地济阳拗陷东营凹陷作为解剖实例。

东营凹陷是渤海湾盆地含油气最为丰富的大型宽缓的古近系断陷湖盆，一直是胜利油田油气勘探的主战场。1961年4月在东营凹陷东营-辛镇构造带上钻探的华8井首次获得了工业油气流，揭示了东营凹陷丰富的含油气潜力。特别是1962年9月23日营2井喷出了日产500多吨的高产油气流，更进一步证实了东营凹陷巨大的油气勘探前景。从此以后，经过几代胜利石油地质勘探工作者的艰苦努力，到2004年年底已累计探明石油地质储量超过资源量的50%。东营凹陷已是渤海湾盆地勘探程度较高的富含油气凹陷。与其他渤海湾盆地勘探程度较高凹陷一样，东营凹陷油气勘探的主要领域不得不从以勘探构造油气藏为主转向以勘探砂岩隐蔽油气藏为主的方向上来。但是砂岩隐蔽油气藏勘探难度比构造油气藏大，这主要是因为这类油气藏的发育规律和油气富集因素与构造油气藏不同。因此不可能再用构造油气藏勘探方法通过寻找储油构造圈闭进行勘探。然而层序地层学理论和研究方法作为寻找和勘探砂岩隐蔽油气藏的权威工具在国内外均取得了良好的效果，在含油气极为丰富、勘探程度较高并积累了大量资料的东营凹陷开展层序地层及砂岩隐蔽油气藏勘探和预测方法的研究意义重大。其研究成果对中国东部其他断陷盆地有借鉴作用。本专著是作者继承前人研究的基础上在东营凹陷从事层序地层学和砂岩隐蔽油气藏勘探研究成果的总结。其目的就是要通过对东营凹陷古近系层序地层的研究进一步总结陆相断陷湖盆层序地层特征，指导砂岩隐蔽油气藏的勘探。

本书的特点是把陆相断陷盆地构造发育特征与层序地层学的基本原理和分析方法密切结合，强调不同裂陷幕构造发育特征、古气候、古地貌对层序及沉积体系发育的控制作用。研究不同裂陷幕层序及其砂岩隐蔽圈闭的发育特点和砂岩隐蔽油气藏成藏机理和分布特征。用于指导砂岩隐蔽油气藏的勘探。

本书共分10章，第一章简要介绍层序地层学和油气成藏理论的进展；第二章简要论述东营凹陷的盆地构造格局、地层发育和构造演化特征；第三章详细论述东营凹陷层序地层划分原则、界面的性质、特征与识别标志、层序地层格架特征和区域对比意义；

第四章分析东营凹陷古近系发育的主要沉积体系；第五章分析东营凹陷主要沉积体系的高频层序发育特征；第六章论述东营凹陷构造坡折带及其控制的层序样式和层序体系域构成特征；第七章论述层序各体系域的沉积体系时空展布规律；第八章论述东营凹陷层序形成机制、提出了层序地层模式和盆地充填序列；第九章论述层砂岩隐蔽油气藏成藏动力学、成藏机理和成藏模式；第十章总结了断陷湖盆层序地层类型、砂岩隐蔽圈闭发育特征、砂岩隐蔽油气藏在层序地层中的分布特征，最后提出了断陷盆地砂岩隐蔽油气藏的预测和评价流程。

本书由冯有良、李思田和邹才能撰写。由于作者水平有限，难免出现不妥之处，敬请读者批评指正！

专著在写作过程中得到了胜利油田研究院李传华、张德武、闵薇、王京东、黄永玲、邱以钢、赵乐强、宁方兴、郝雪峰、张燕、卓庆功、高磊、石红霞等同事的帮助，他们或为我们提供资料或为我们编制图件，我们对他们的工作深表感谢！

非常感谢中国地质大学李思田教授、陆永潮教授、任建业教授、解习农教授在研究思路和研究方法上给予的指导和帮助。

非常感谢冀东油田勘探开发研究院、辽河油田勘探开发研究院提供了大量翔实的研究资料，使作者能有机会着眼于渤海湾盆地总结断陷盆地层序及砂岩隐蔽油气藏的发育特征。

非常感谢中国石油勘探开发研究院赵文智副院长、邹才能所长、牛嘉玉副所长、李明副所长、李永铁副所长，张光亚总地质师对我们撰写本专著的鼓励和帮助。

非常感谢王春芳同志为我们清绘了大量图件。

作 者

2005年10月1日

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 引言.....	1
第二节 层序地层学研究动态.....	5
第三节 陆相盆地层序形成动力学及层序地层模式.....	7
第四节 陆相断陷盆地层序级别划分原则	12
第五节 油气成藏研究动态	13
第六节 研究思路与研究内容	15
第二章 区域地质与盆地构造演化	17
第一节 区域构造格局及盆地动力学性质	17
第二节 古近系地层序列与层序地层格架的关系	18
第三节 古近系盆地构造特征	23
第四节 盆地构造演化史	24
第三章 层序地层格架及层序界面识别标志	27
第一节 层序地层格架	27
第二节 层序界面的性质、特征及识别标志	34
第三节 层序地层格架特征	46
第四节 层序地层等时格架的区域对比意义	59
第四章 沉积体系分析	62
第一节 冲积扇体系	62
第二节 河流体系	62
第三节 三角洲体系	66
第四节 下切水道及水下冲积扇体系	79
第五节 湖泊体系	84
第五章 主要沉积体系的高频层序地层分析	90
第一节 高频层序地层的概念及发育特征	90
第二节 高频层序地层分析	93
第六章 构造坡折带及其控制的层序样式和层序体系域构成特征	101
第一节 构造坡折带的概念及其组合样式.....	101
第二节 层序样式及其体系域构成特征.....	102
第七章 层序各体系域的沉积体系时空展布规律	112
第一节 SS I 层序组（早期初始裂陷型层序组）沉积体系时空配置	112
第二节 SS II 层序组（晚期初始裂陷型层序组）沉积体系时空配置	113

第三节	SSⅢ层序组（裂陷伸展型层序组）沉积体系时空配置	114
第四节	SSⅣ层序组（裂陷收敛型层序组）沉积体系时空配置	116
第八章	断陷湖盆层序形成机制及盆地充填序列	118
第一节	大型断陷湖盆层序形成控制因素分析	118
第二节	层序的成因模式	127
第三节	层序成因模式的石油地质意义	130
第四节	盆地充填序列及模式	131
第九章	砂岩隐蔽油气藏成藏条件及预测	132
第一节	成藏要素分析	132
第二节	油气成藏动力学	135
第三节	油气成藏过程分析及成藏模式	144
第四节	砂岩隐蔽油气藏预测	155
第十章	断陷盆地层序地层与砂岩隐蔽油气藏发育特征及预测流程	157
第一节	断陷湖盆的层序类型	157
第二节	古构造、古地貌对砂岩岩性圈闭的控制作用	167
第三节	层序格架中砂岩隐蔽油气藏分布特征	172
第四节	陆相断陷湖盆砂岩隐蔽油气藏研究预测流程	178
第五节	砂岩隐蔽油气藏研究实例——南堡凹陷古近系	181
主要结论和认识		199
参考文献		201
图版说明和图版		206
彩图		

第一章 绪 论

第一节 引 言

东营凹陷是渤海湾裂谷系内大型宽缓的中、新生代张扭型半地堑伸展盆地。该凹陷位于济阳拗陷东隅,呈 NEE 走向,面积 5700km^2 。其西以青城凸起、林樊家构造为界与惠民凹陷毗邻,北以滨县凸起、陈家庄凸起为界与沾化凹陷为邻,南与鲁西隆起、广饶凸起呈超覆关系,东与青东凹陷沟通。其基本构造格局为北断南超,北陡南缓。整个凹陷被北西向断层分隔为东西两部分。西部为博兴洼陷,东部又被晚期 NEE 向盐膏拱张构造分割为轴向近 NEE 的 3 个洼陷即利津洼陷、民丰洼陷和牛庄洼陷(图 1-1)。

该凹陷古近纪地层发育完整、沉积厚度巨大,是最主要的生烃含烃层系。经 40 年的勘探实践,东营凹陷已钻探探井 2435 口,其中取心井 1092 口,取心进尺 44216m。20 口井做了系统古生物分析,共计 2800 块。521 口井做了油层物性分析,共计 41 992 块。15 口井做了粒度分析,共计 861 块。287 口井做了微量元素分析,共计 1798 块。269 口井做了生油岩全分析,166 口井做了油样分析。189 口井做了黏土矿物分析,共计 1816 块。牛 38 井沙三中下亚段($E_{s3}^{中、下}$)做了 255 块古地磁分析,100 多块热释光分析。地震勘探测线共计 67 560.5km,三维地震已达 4780.47km^2 ,基本实现了全区连片。到目前为止已发现了 34 个油气田,探明含油面积 $\times\times\times\times\times\text{km}^2$,探明石油地质储量约 $\times\times$ 亿 t,积累了大量的资料,为在该凹陷开展层序地层学和砂岩隐蔽油气藏的研究提供了条件。

东营凹陷作为一个勘探程度较高的古近系富烃箕状凹陷,前人已做过较为深入地大量研究工作。在盆地构造研究方面,任安身^{①②}(1979, 1985)提出了盆地构造层、构造幕、古近系构造带的划分方案,并探讨了构造变动与沂沭断裂带构造活动的关系。认为该凹陷是沂沭断裂带控制的张扭型断块盆地。付瑾平^③等(1993)系统研究了东营凹陷古近系伸展盆地的构造几何学、运动学特征,认为该凹陷是伸展型裂谷盆地。宗国洪,肖焕钦等(1993)在研究了盆地构造几何学、运动学、调节构造和反转构造带特征后认为,该凹陷古近系为拉分盆地^④。任建业,王华(1999)在研究了东营凹陷古近系和新近系盆地构造后,在古近纪裂陷期划分了四个裂陷幕,新近纪后裂陷期划分出裂后热衰减沉降幕及加速沉降幕,提出了东营凹陷古近系构造存在东营-梁家楼-现河马蹄形

① 任安身. 济阳块断盆地构造变动及有关问题. 胜利油田勘探开发研究报告集, 1979 (5)

② 任安身. 济阳拗陷构造变动特征及其形成机制探讨. 胜利油田勘探开发研究报告集, 1985 (20)

③ 付瑾平等. 东营凹陷构造研究. 胜利石油管理局地质科学研究所内部资料, 1993

④ 宗国洪, 肖焕钦, 付瑾平等. 济阳块断盆地构造条件及其对成油的控制作用. 胜利石油管理局地质科学研究所内部资料, 1993

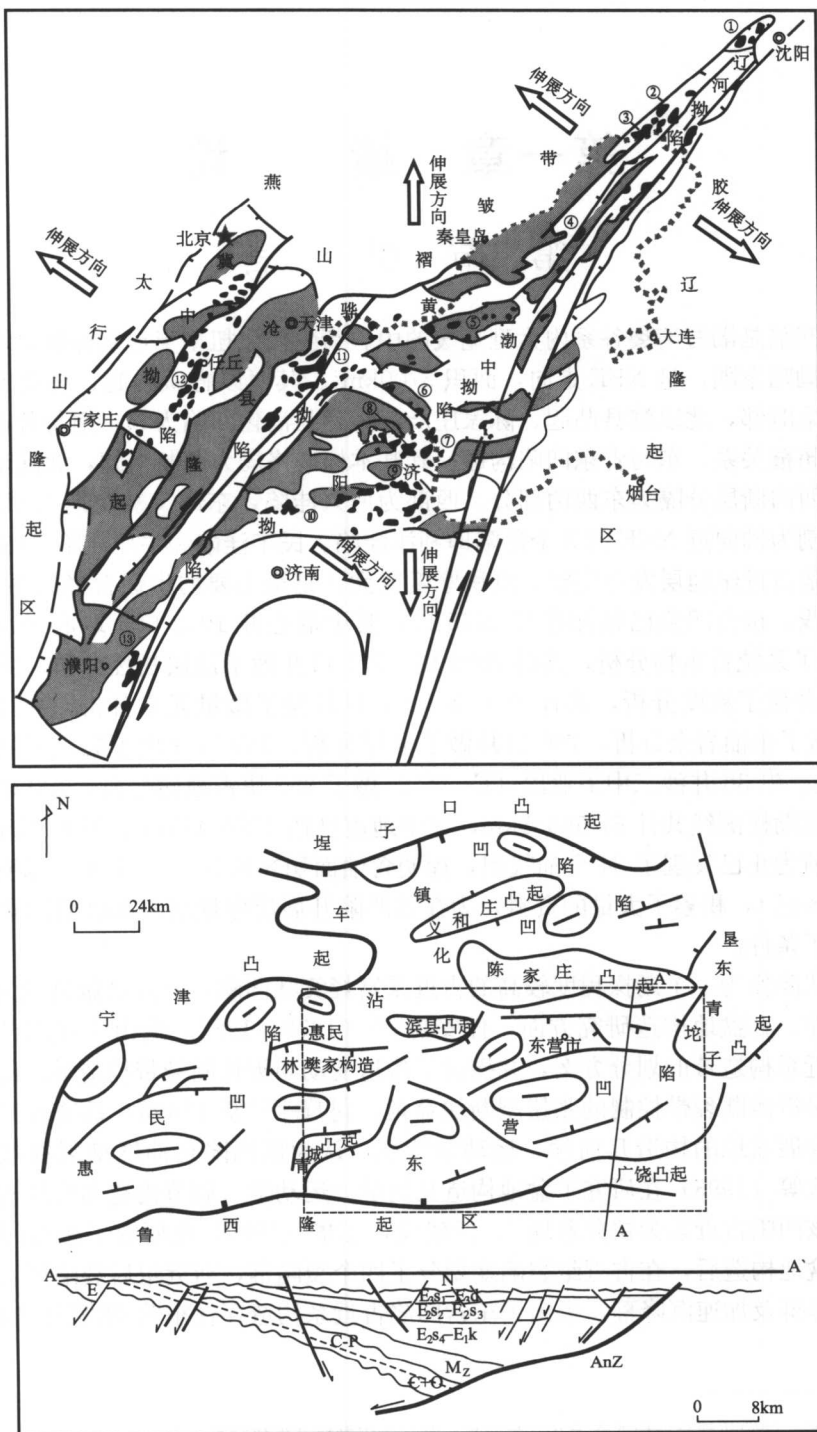


图 1-1 渤海湾盆地构造格局及东营凹陷区域构造位置图

- ① 大民屯油田；② 曙光油田；③ 欢喜岭油田；④ 绥中 36-1 油田；⑤ 秦皇岛 32-6 油田；⑥ 埕岛油田；
⑦ 孤东油田；⑧ 弧岛油田；⑨ 胜坨油田；⑩ 商河油田；⑪ 北大港油田；⑫ 任丘油田；⑬ 东濮油田

滑脱断裂系统的观点^①。

在地层、沉积体系研究方面：王捷，王素民，姚益民等利用古生物资料和岩性、电性资料相结合的方法，建立了东营凹陷古近系各组、段、亚段的微古生物化石组合及其对应的岩电性特征，并系统对比了该凹陷古近系，提交了系统分层数据。这套地层分层数据，基本上具有等时性。在该凹陷油气勘探和科研工作中起到了巨大的作用。以此分层为基础，钱凯等（1980）对平方王沙四上（ $E_1s_4^+$ ）礁灰岩成因进行了研究，认为该生物灰岩是由中国支管藻形成的礁灰岩^[1]。陈淑珠（1986，1988）对梁家楼沙三段（ E_2s_3 ）水下扇、纯化镇组碳酸盐岩^[2,3]特征进行了研究。杨家福（1988）系统研究了胜坨沙二段（ E_2s_2 ）河流-三角洲体系的沉积相、沉积微相及其储集性能^[4]。李成凤（1988）利用微量元素研究了东营凹陷沙河街组（ E_2s ）的微量元素，指出沙四下（ $E_2s_4^+$ ）-孔店（ E_1k ）组为干盐湖、沙四上（ $E_2s_4^+$ ）为咸湖、沙三下（ $E_2s_3^+$ ）为微咸湖、沙三中（ $E_2s_3^+$ ）-沙二段（ E_2s ）为淡水湖泊，沙一为咸湖环境^[5]。冯有良等（1990）对牛庄洼陷沙三中亚段（ $E_2s_2^+$ ）滑塌浊积岩体系进行了研究，并提出了三角洲-滑塌浊积岩沉积模式^[6]。指出前三角洲斜坡滑塌浊积岩体可划分成滑塌斜坡带、近源缓坡带和远源末端斜坡带。随着地震地层学的兴起，何立琨，王宁，冯有良（1990）首次把地震地层学的概念和分析方法引入东营凹陷牛庄洼陷地层的划分和等时地层格架的建立。在牛庄洼陷沙三中从地震剖面 and 测井曲线上识别出了六个亚层序^②。王德坪，蔡进功，郑和荣（1994）把层序地层学的研究方法引入东营凹陷，在东营凹陷古近系划分出了三个层序，即孔店组层序、沙四-沙二下层序和沙二上-东营组层序^③。1999年胜利油田与中国地质大学合作，把构造层序分析的观点引入东营凹陷古近系层序地层学的研究，系统建立了以三级层序为单元的高精度层序地层格架，提出了构造坡折带-低位扇的概念，并有效的指导了砂岩隐蔽油气藏的勘探^④。

在油气生成方面：早在20世纪70年代王捷，周光甲，洪志华就对东营凹陷沙三段烃源岩生烃作用进行了系统的地球化学研究。他们把沙三段烃源岩的演化分为：① 未成熟阶段；② 成熟阶段；③ 较高成熟阶段。生烃作用主要发生在成熟阶段，成熟门限深度定为2200m^[7]。洪志华等（1989）通过对牛38井沙三段系统地球化学研究，认为沙三中的下部及沙三下生油岩为最佳的生油层^④。张春荣（1989）等系统研究了东营南坡油气的生成及运移，指出沙三段和沙四段具有不同的演化特征，沙三段主要是干酪根降解产生成熟油，生烃门限是地层埋深2200m， $R^o=0.4\%$ ， $T=93^\circ\text{C}$ 。沙四段具有形成低熟油的能力，并把地层埋深1500m， $R^o=0.3\%$ ， $T=80^\circ\text{C}$ 作为其生烃门限。沙三段油气以垂直方向运移为主，而沙四段生油岩页理发育油气以沿层理面侧向运移为

① 中国地质大学（武汉），胜利石油管理局·东营凹陷古近系沉积、构造及含油性·胜利石油管理局地质科学研究院内部资料，1999

② 何立琨，王宁，冯有良·牛庄油田基础地质研究·胜利石油管理局地质科学研究院内部资料，1990

③ 王德坪，蔡进功，郑和荣·济阳拗陷东部古近系层序地层、沉积体系和储层预测·胜利石油管理局地质科学研究院内部资料，1994

④ 洪志华，陈致林，殷沫，张春荣·牛38井沙三中、下亚段600m系统取心生油岩地球化学参数研究·石油技术（内部刊物），1989，11（4）：35~54

主^①。张林晔等(1999)对东营凹陷低熟油的形成机理作了深入研究后认为:富含藻类的有机质富集层是形成低熟油的物质基础。可溶有机质是形成低熟油的主要贡献者。低熟油的形成与咸化的沉积环境有着密切的关系^[8]。

在油气运移、成藏方面:张敦祥等(1990)通过对梁家楼扇体成藏机理的研究认为:油气初次运移的动力来自泥岩压实作用,油气来源于与之接触的生油岩,其上排油带为18m,下排油带为4m^[9]。陈荷立等(1983)以东营凹陷声波时差-深度曲线为根据,探讨了该区异常压实带的分布特征。提出东营凹陷有效生油层为沙三段,主要排油期为馆陶-第四纪,初次运移的方向在平面上主要自生油中心向四周进行^[10]。杨绪充等(1985)在研究了东营凹陷沙河街组的温压环境后认为:超压层中的压力是烃类初次运移的现实动力,压力过度带是本区最重要的烃类富集带^[11]。彭大均(1988)在研究了东营凹陷异常高压带的特征后认为:异常高压带对油气的生成与运移关系密切,该带对现有的油气聚集也做出了贡献^[12]。胡济世(1989)在调研了墨西哥湾超压盆地油气运移机理后,结合东营凹陷的地质特征认为东营凹陷也具有幕式排烃的特征^[13,14]。刘兴材等^[15](1990)根据东营凹陷油气富集的特征,提出了油气以二级构造带为单元形成复式油气聚集带以及油气藏以小洼陷为中心成环带状分布的观点。王新洲等(1996)利用物理实验模拟研究了油气初次运移的机理,提出了微裂缝排烃和分子扩散运移模型^[16]。查明(1997)等利用计算机等手段模拟研究了东营凹陷二次运移的动力学机制,认为油气运移的动力主要来自沉积压实^[17]。1999年胜利油田与中国地质大学合作把含油气系统的观点引入该凹陷油气成藏的研究,划分出了利津、牛庄、民丰和博兴四个沙四-沙三子系统。认为含烃流体主要具两个运移期,即东营末和馆陶末,其中以后者为主。李丕龙,庞雄奇(2004)通过对东营凹陷岩性油气藏成藏机理的模拟实验研究提出了“相-势”控藏的观点^[18]。

前人所做的研究工作和得出的认识基本上客观的总结了东营凹陷盆地构造、地层沉积和油气成藏等多方面特征和规律。有效地指导了该凹陷油气勘探实践,取得了显著的经济效益。然而随着油气勘探程度的提高,勘探的重点从易于发现的大型背斜断块构造和潜山披覆背斜构造油气藏勘探转向地层、岩性等隐蔽型非构造油气藏的勘探上来。传统的构造圈闭找油方法对非构造油气藏勘探显得无能为力。利用传统的生物岩石地层对比分层方案已不能满足建立高精度等时地层格架、预测有利储集体的空间分布及其生储组合特征。单个沉积体系的描述和分析难以确立在盆地演化的某一时期内各沉积体系的成因联系及其空间组合关系。前人对该凹陷油气生成、运移和聚积的研究基本上搞清了主要烃源岩特征、生油门限、油气运移的期次和聚集特征。但对隐蔽型非构造油气藏的发育特征、油气成藏机理和控制因素研究不足。鉴于上述问题,作者选择了东营凹陷做层序地层分析与砂岩隐蔽油气藏预测研究,作为研究的主攻方向。其目的就是要以当今层序地层学的最新理论为指导,充分利用东营凹陷极为丰富的地质、地球物理、地球化学资料建立东营凹陷以三级层序为单元的地层格架,研究体系域内各沉积体系的特征及其时空配置关系,并在局部地区研究四级以下的高频层序的特征。研究并预测有利于砂岩隐蔽油气藏各类砂体的分布规律。利用含油气系统的基本理论,进一步探讨砂岩隐蔽

① 张春荣. 东营凹陷南部斜坡油气生成及运移. 石油技术(内部刊物), 1989, 11(4): 27~34

油气藏的成藏过程及其发育规律。最后总结层序格架内砂岩隐蔽油气藏的发育特征及勘探流程。

第二节 层序地层学研究动态

层序地层 (Sequence stratigraphy) 这一概念是由 Sloss (1963) 等在对比与划分北美克拉通晚寒武纪至全新世地层单元时提出。20 世纪 90 年代以来, 经 Van Wagoner 等对北美被动大陆边缘的研究, 在地震地层学研究的基础上逐步提出了以全球海平面升降 (Eustasy) 作为驱动以不整合面或与之相对应的整合面为界的层序发生、发展的理论体系, 即层序地层学^[19~24]。层序地层学主要研究等时地层格架内具有成因联系的沉积相。层序被定义为以不整合面或与之相对应的整合面为界的相对整合的有成因联系的地层序列。层序是一个完整的海平面升降旋回的沉积响应。根据海平面旋回的级别, 可划分出巨层序、超层序、层序 (沉积层序)、准层序组 (四级层序)、准层序、岩层组及岩层。其中层序是层序地层学研究的基本单元, 它是三级海平面变化的产物, 其时限约 0.5~3Ma。超层序被解释为二级海平面升降旋回的产物, 时限约 10~80Ma, 它的形成与全球构造事件或盆地演化的阶段性有关。巨层序被解释为一级海平面升降旋回的产物, 它与泛大陆的形成和裂解旋回有关。通常所说的层序是指三级层序。在一个三级层序内, 据四级海平面升降旋回所形成的海泛面或四级层序界面可划分出准层序组或四级层序。准层序是一组相对整合的有成因联系的岩层或岩层组, 它的边界是以海泛面或与之相对应的界面为界, 四级层序是与三级层序特征相同的高频层序。当沉积物供给速率大于构造沉降速率, 四级海平面旋回呈现从海平面下降至海平面下降旋回时, 会形成四级层序, 五级海平面旋回产生准层序。这种由四级层序构成的三级层序被称之为沉积层序 (Depositional sequence)。当沉积物供给速率小于构造沉降速率, 四级海平面旋回表现为从海平面上升到海平面上升旋回时, 形成以海泛面为界的准层序, 相同叠加样式的准层序形成准层序组。按可容空间与沉积物供给速率之间的关系, 准层序组可划分成加积、进积和退积三种形式。岩层 (Beds) 是组成准层序的基本单元。岩层是由岩石结构的变化、地层终止、无沉积或与之相关的整合面所限定的相对整合的纹层或纹层组。岩层组是具有相同沉积物结构或沉积构造的岩层。纹层是肉眼所能观察到的最小级别的层, 它具有均匀的沉积结构。一组相对整合的有成因联系的纹层叫纹层组, 它的边界是以冲刷面、沉积间断面或与之对应的界面为界。

层序形成时按沉积滨线处全球海平面下降速度是否大于构造沉降速度划分把层序划分为 I 型和 II 型层序。I 型层序可发育在具有陆架坡折的大陆边缘也可发育在无陆架坡折的大陆边缘。前者发育在全球海平面能下降到陆架坡折 (Shelfbreak) 之下的地带, 后者则发育在全球海平面未下降到陆架坡折的大陆边缘。在一个 I 型层序内, 可依据两个重要的界面即初始海泛面 (Ifs) 和最大海泛面 (Mfs) 把一个层序划分为三个体系域: 低位体系域 (Lowstand systems tract)、海进体系域 (Transgressive systems tract) 和高位体系域 (Highstand systems tract)。体系域是同期具有成因联系的沉积体系的三维组合, 低位体系域 (LST) 发育在海平面快速下降到缓慢上升期即层序界面与初始海泛面之间, 早期海平面下降速度大于沉积滨线坡折处构造沉降的速度, 从而引起

该处海平面相对下降,形成以发育下切谷为标志的层序界面,随之而来的是发育盆底扇(Basin-floor fan)、斜坡扇(Slope fan)、低位楔和下切谷充填(Lowstand wedge and incised valley filling)。它们组成了Ⅰ型具有陆架坡折层序的低位体系域。而无陆架坡折的Ⅰ型层序低位域发育下切水道充填。海侵体系域(TST)发育在海平面快速上升期,即:初始海泛面与最大海泛面之间。以发育退积准层序组和凝缩层(Condensed section)为特征。高位体系域(HST)发育在海平面上升的晚期和缓慢下降期即最大海泛面与层序顶界面之间。该体系域以早期发育加积准层序组、晚期发育进积准层序组为特征。

Ⅱ型层序发育时海平面下降速度小于沉积滨线坡折处盆地构造沉降速度,在该处没形成相对海平面下降,也就无下切河谷、冲刷和削截发育,这也是Ⅱ型层序界面与Ⅰ型层序界面的区别。由于Ⅱ型层序发育的背景明显不同于Ⅰ型层序,这就使得Ⅱ型层序的体系域有不同于Ⅰ型层序之处。Ⅱ型层序位于层序底界面与初始湖泛面之间的部分叫陆架边缘体系域(Shelf-margin systems tract)。该体系域可沉积于陆架的任何位置,由一个或数个前积至加积准层序组组成。准层序组由浅海相准层序组成,向上倾部位变为海岸平原沉积。Ⅱ型层序的海侵和高位体系域与Ⅰ型层序相似。

基于层序地层学的基本原理,不同的学者根据自己的研究实践,提出了有别于经典层序地层学学派。

以Galloway(1989)为代表的成因地层层序(Genetic stratigraphic sequence)强调最大海泛面作为成因层序的界面^[25]。Johnson等(1995)为代表的海进(T)-海退(R)旋回沉积层序强调以地表不整合或海进冲刷不整合作为层序的边界,并把层序划分为海进体系域(TST)和海退体系域^[26](RST)。以Cross等(1994)为代表的高分辨率层序地层学派把受控于海平面变化、构造沉降、沉积负荷、沉积物供给、地形等因素的沉积基准面变化作为理解层序成因并进行层序划分的主要依据。Cross等(1994)的高分辨率层序地层学理论提出把沉积基准面(Base-level)变化旋回作为层序形成的驱动机制,这可以看作是对海平面作为层序形成驱动机制的发展。高分辨率层序地层学划分层序的理论基础主要是沉积基准面原理、相分异原理和等时对比法则^[27,28]。

另外,层序地层学还与其他传统的地质学科相结合形成了一些边缘分支学科如生物层序地层学、成岩层序地层学等分支。

据文献调研,层序地层学到目前为止其发展现状可概括为以下四个方面:

1) 层序地层学的研究领域不断扩大,其研究领域由被动大陆边缘盆地扩展到前陆盆地(Krystinik et al., 1995; Schwans, 1995)、裂谷盆地(如Muto and Steel (1997)对北海裂谷盆地中侏罗统Oserberg三角洲的层序地层学研究)和各种类型的陆相盆地(如Shanley and McCabe (1994)研究了陆相断陷盆地、山间盆地、滨海盆地等不同类型盆地的层序地层样式和层序形成的控制作用)^[29~32]。

2) 层序地层的研究精度不断提高,由以研究三级层序(1~5Ma)为主逐渐转向高频层序地层(0.12~0.5Ma)和高分辨率层序地层。高频层序地层学的概念最早由Van Wagoner等(1990)提出。他把四级海平面旋回以下的高频海平面旋回所形成的层序或准层序叫高频层序。随后,Brown, Jr., Benson, Brink等(1995)在南非Pletmos盆地、Bredasdorp盆地、Orange盆地白垩系裂后期地层的三级层序中划分出了10~12个

时限在 0.2~0.5Ma 的低位体系域 (LST)、海侵体系域 (TST)、高位体系域 (HST) 发育完整的四级层序^[33]。高分辨率层序地层学最早由科罗拉多矿业学院的 Cross (1993) 提出,他把基准面旋回作为理解层序成因并进行层序划分的主要依据,按基准面的长周期和短周期旋回的地层沉积过程响应来实现高分辨率成因层序地层对比^[27,28]。

3) 层序形成的主控因素由以经典层序地层学派所认为的全球海平面升降 (Eustasy) 为主,逐步被扩展为受海平面升降、构造运动、沉积物供给、气候变化等多种因素共同作用。如 Sissingh (1997) 分析了阿尔卑斯前陆盆地构造地层的沉积历史后指出:新生代层序明显与前陆盆地造山变形事件和全球海平面变化一致^[34]。Muto, Steel (1997) 把受构造控制的相对海平面变化作为控制层序形成的动力学原因^[31]。Allen (1992), Cloetingh (1993) 认为,板内构造应力应力场的演变也可以引起三级海平面的变化^[35,36]。Ravnas 和 Steel (1998) 进一步认为,作为地层层序主控因素的构造活动对层序形成的控制作用远大于海(湖)平面的变化,特别是在大陆环境中,海平面变化对层序形成的意义不大,而构造活动变为主控因素^[37]。大于 1Ma 的长周期的气候旋回与海平面变化周期具有同步性。它们都受控于全球构造、冰川的消融等因素,其对层序的控制与海平面升降具有相同的特征。四级以下的高频层序的形成与米兰柯维奇气候旋回有关,这一点已被 Juhasz (1997) 对 Panaonian 盆地的研究所证实。沉积物供给作用对层序形成的控制作用主要体现在沉积物供给速率与可容空间的关系决定了层序体系域的叠加方式^[38]。

4) 把导致层序形成的海平面旋回、构造旋回、气候旋回与地球演化的节律联系起来,使层序地层学的研究成为再造板块构造及地球演化史的有力工具。因为地球深部过程引起板块运动、板间、板缘及板内构造过程造成沉积盆地,盆地充填演化导致沉积层序,从该意义上讲,层序反映盆地、盆地揭示板块,板块揭示深部过程^[39] (曾允孚,覃建雄,1999)。

层序地层学理论的提出对含能源盆地等时地层格架的建立、层序内体系域、沉积体系及其三维配置关系的研究和能源矿产预测做出了重大贡献。该理论具有先进性和进步性,但也存在一些问题,一些学者 (Miall, 1991; 李思田, 1996) 认为 EXXON 层序模式忽略了构造、气候对层序的作用^[40,41]。计算机模拟 (Jervery, 1988; Rivenes, 1997; Ross et al., 1995)^[21,42,43] 模拟结果也表明构造、海平面变化和沉积物供给三因素中任何一个因素足够大,足以改变层序地层格架和样式, Milana (1998) 甚至认为水流强度的周期性强弱变化就足以形成层序^[44]。由此可见经典的层序地层学理论尚待进一步完善。

第三节 陆相盆地层序形成动力学及层序地层模式

把层序地层学理论应用于陆相盆地是对层序地层学理论的完善和发展,并取得了一定的进展^[45~49]。由于陆相断陷盆地的形成和演化明显不同于被动大陆边缘盆地,因此在陆相盆地应用层序地层学理论必须解决以下三个问题:① 陆相盆地层序形成的动力学机制;② 陆相盆地层序地层划分、层序级别、层序模式及体系域构成。

一、陆相盆地层序形成动力学

EXXON 层序地层学学派把海平面升降 (Eustasy) 作为层序形成的主要驱动机制。据研究一级海平面升降 (300~225Ma) 是大洋中脊体积长期变化的结果。二级海平面升降旋回 (10~80Ma) 可能与以下三种动力学机制有关: ① 大陆裂陷—漂移转换; ② 作为板内应力状态变化响应的板块边界的重新组合; ③ 冰川作用和冰消融作用。三级海平面变化旋回 (0.5~5Ma) 除与冰川作用有关外, 还与板内应力的变化有关。四级以上的高频海平面旋回归因于米兰柯维奇气候旋回^[36]。陆相断陷盆地除特殊情况外, 一般均与海洋隔绝, 而且盆地的特征与被动大陆边缘盆地不同。故在陆相断陷盆地内应用层序地层学原理应特别注意陆相盆地的特点, 搞清断陷盆地层序形成的动力学, 在此基础上建立陆相断陷盆地层序模式。对陆相断陷盆地而言, 影响和控制层序形成的主要因素可归结为: 沉积基准面、气候、构造及相对海平面的变化。

1. 沉积基准面及其对陆相断陷盆地层序形成的作用

除被动大陆边缘盆地外的其他所有盆地, 如前陆盆地、弧后盆地、裂谷盆地等, 层序及其边界的形成都不可能简单的归因于海平面的变化。为了解决这一问题, 有些学者 (Jervey 1993, Cross et al., 1994) 把基准面 (Base-level) 这一概念引入层序地层学, 用来解释构造、气候、海平面变化、沉积物供给等因素对层序形成的控制作用^[21,27,28]。基准面 (Schumm, 1993) 是一个假象的面, 达到该面则发生侵蚀, 它实际上是海平面。而 Cross 引用并发展了 Wheeler 的基准面的概念, 认为基准面是一个相对于地表起伏的连续的势能面。基准面升降变化是构造沉降、海平面变化、沉积物供给和水流等因素的函数^[27,28,50]。Shanley 等 (1994), Muto and Steel (1997) 曾把相对海平面升降 (Relative sea level) 作为控制海岸平原和海洋环境层序形成的机制。进一步的研究结果表明, 除位于海岸平原上的湖泊外, 湖平面的变化与相对海平面的变化在控制其滨岸平原和湖泊层序的形成有相似的机制^[31,32] 因此对湖泊而言, 湖平面近视地可以被看作基准面。Schumm (1993) 的实验研究结果有助于我们理解基准面对湖泊及其流域层序形成的控制作用。他认为, 基准面缓慢变化, 将引起河流特征如曲度、宽度的改变作为响应。基准面的快速下降将引起河流下切并伴有河流曲度的改变。基准面的快速上升河流将改变其沉积形式。并认为基准面的影响范围是有限的^[51]。据 Shanley 等 (1994) 的资料, 控制基准面的因素因湖泊与海岸线距离的不同其所起的作用也不同。在海岸平原, 基准面是相对海平面 (构造、海平面升降、气候对控制相对海平面变化起主要作用)。对于远离海岸的内陆盆地, 其基准面是湖平面, 构造和气候是控制基准面变化的主要驱动力^[31]。构造、气候在陆相断陷盆地中其起作用的规模和方式是不同的。

2. 气候对陆相断陷盆地层序形成的控制作用

高频气候变化旋回 (4~6 级以下的气候旋回) 的动力学机制是地球旋转产生的偏心率、倾角和岁差的变化, 其表现形式为米兰柯维奇气候旋回。气候对陆相层序地层及基准面控制主要表现在: ① 气候影响沉积物供给和水流。② 气候改变流域植被及降雨

量。③ 层序内高频层序直接与米兰柯维奇气候旋回有关,而三级以上的高级别层序是构造等因素的沉积响应。如位于中东欧的 Panaonian 盆地的晚中新统为湖相地层,可识别出 4~6 级层序的湖平面旋回明显与米兰柯维奇气候旋回一致并受其控制。而长周期的三级气候旋回或海平面旋回与湖平面高频旋回变化趋势相反 (Juhász et al., 1997)^[38],这足以说明高频气候旋回与高频层序的密切关系。而层序的形成除受气候影响外还与构造、沉积物供给等因素有关。

3. 构造对层序形成的作用

对陆相盆地而言,构造对层序地层的形成有极为重要的意义。构造比气候对层序形成的影响更大。就陆相断陷盆地而言,构造运动的动力学机制主要来源于两个方面:其一是由于地幔的隆升而引起的地壳减薄、伸展及其伴随的由于沉积物的堆积而产生的均衡沉降和构造沉降。其二为区域构造事件如板块收敛和俯冲方式的改变而导致的区域应力状态的改变,产生的盆地伸展或压缩及其伴随的沉降和抬升。因此,陆相断陷盆地构造运动的动力学机制源于地球本身。它作为夭亡的裂谷,它的演化史在时间上与区域构造事件有一定的联系,其规模相当于 Haq (1993) 海平面变化旋回曲线的二级旋回(超周期组)。盆地的演化幕与区域应力状态和地幔的隆升状态有关,也与区域构造事件有关,其规模相当于超周期,因而这两个级别的层序具有区域可对比性。如东非裂谷、亚丁湾、红海属于同期构造事件的不同发展阶段,其地层旋回具有可对比性。研究表明渤海湾盆地古近系裂谷盆地各拗陷内其裂陷旋回和裂陷幕具有可对比性。

板内应力的变化与沉积负载引起的岩石圈扰曲的相互作用,可在被动大陆边缘产生高达 100m 的视海平面变化^[35] (Cloetingh, 1993)。这一发现能为视海平面三级变化提供动力学解释。裂谷盆地由热机制、区域应力场产生的变化与沉积负载引起的岩石圈的均衡沉降对湖平面的变化具有更重要的意义。这种作用在裂谷盆地表现为盆地基底的幕式断陷和掀斜伸展。由于湖泊水体积是有限的,盆地基底的幕式断陷和掀斜作用必将造成湖水体积的再分配,同时在气候的作用下湖平面也将发生周期性的变化^[52] (Strecker et al., 1999)。这种机制被 Strecker 等对晚新生代东非裂谷三角洲-湖泊沉积的地震和层序地层模式所证实。他认为地震层序展示的地层层序中之低位湖平面是构造机制导致的湖平面被迫后退之沉积响应,湖平面扩展和高位域是随后产生的湖平面恢复和萎缩的沉积响应。笔者对东营凹陷沙三段 (E_2s_3) 层序成因的研究也得出了相同的结论^[53,54]。又如加拿大 Cumberland 盆地 Boss point 组河流湖泊相盆地发育了 16 个辫状河-湖泊旋回被认为是幕式构造沉降伴随米兰柯维奇气候旋回的结果^[55]。

4. 相对海平面变化对滨海断陷盆地层序形成的作用

相对海平面变化对地史时期的滨海盆地基准面变化有一定控制作用,表现为湖泊基准面和河流平衡剖面随着相对海平面的变化做调整。如 Colorado 盆地 Pennsylvanian interval 组,由九个海相和非海相沉积旋回组成,区内发育了三个断块,具有不同的沉积速率,详细的研究结果表明局部构造运动只是控制层序地层的厚度和侧向分布,而相对海平面的变化控制了层序体系域的纵向分布^[56]。由此可见,滨海断陷盆地层序的形成主要受控于海平面的变化。