



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

断陷湖盆缓坡带薄互层砂体 沉积特征与储层成岩作用

—以东营凹陷早始新世沉积为例

王 健 操应长 王艳忠 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

断陷湖盆缓坡带薄互层砂体沉积特征 与储层成岩作用

——以东营凹陷早始新世沉积为例

王 健 操应长 王艳忠 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

薄互层砂体是断陷湖盆缓坡带重要的砂体类型, 具有非常重要的研究价值。本书重点攻关了断陷湖盆缓坡带薄互层砂体沉积环境、沉积成因类型及沉积模式和基于埋藏成岩环境重塑的薄互层砂体储层成岩改造模式两大科学问题。厘定了薄互层砂体的概念, 明确了薄互层砂体成因类型及特征, 建立了薄互层砂体沉积发育模式; 重塑了薄互层砂体储层多因素综合表征的埋藏成岩环境演化过程, 明确了不同成岩环境演化过程中成岩作用响应规律, 建立了薄互层砂体储层成岩改造模式, 明确了不同成岩改造模式的储层发育规律。

本书可供广大地质工作者, 尤其是从事砂体沉积学、储层地质学及油气勘探开发的科研技术人员参考使用, 也可供高校教师和学生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

断陷湖盆缓坡带薄互层砂体沉积特征与储层成岩作用: 以东营凹陷早始新世沉积为例/王健, 操应长, 王艳忠著. —北京: 科学出版社, 2016
(博士后文库)

ISBN 978-7-03-048856-5

I. ①断… II. ①王…②操…③王… III. ①断陷盆地-薄互层-沉积特征-研究-东营市②断陷盆地-薄互层-砂岩储集层-成岩作用-研究-东营市 IV. ①P533 ②P539.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 134144 号

责任编辑: 焦 健 黄 敏 韩 鹏/责任校对: 张小霞

责任印制: 张 伟/封面设计: 陈 静

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016年6月第一次印刷 印张: 14 1/4

字数: 267 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

傅伯杰 付小兵 郭坤宇 胡 滨

贾国柱 刘 伟 卢秉恒 毛大立

权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅

张文栋 赵 路 赵晓哲 钟登华

周宪梁

《博士后文库》序言

博士后制度已有一百多年的历史。世界上普遍认为，博士后研究经历不仅是博士们在取得博士学位后找到理想工作前的过渡阶段，而且也被看成是未来科学家职业生涯中必要的准备阶段。中国的博士后制度虽然起步晚，但已形成独具特色和相对独立、完善的人才培养和使用机制，成为造就高水平人才的重要途径，它已经并将继续为推进中国的科技教育事业和经济发展发挥越来越重要的作用。

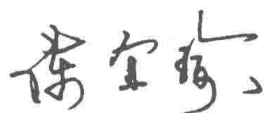
中国博士后制度实施之初，国家就设立了博士后科学基金，专门资助博士后研究人员开展创新探索。与其他基金主要资助“项目”不同，博士后科学基金的资助目标是“人”，也就是通过评价博士后研究人员的创新能力给予基金资助。博士后科学基金针对博士后研究人员处于科研创新“黄金时期”的成长特点，通过竞争申请、独立使用基金，使博士后研究人员树立科研自信心，塑造独立科研人格。经过 30 年的发展，截至 2015 年底，博士后科学基金资助总额约 26.5 亿元人民币，资助博士后研究人员 5 万 3 千余人，约占博士后招收人数的 1/3。截至 2014 年底，在我国具有博士后经历的院士中，博士后科学基金资助获得者占 72.5%。博士后科学基金已成为激发博士后研究人员成才的一颗“金种子”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员取得了众多前沿的科研成果。将这些科研成果出版成书，既是对博士后研究人员创新能力的肯定，也可以激发在站博士后研究人员开展创新研究的热情，同时也可以使博士后科研成果在更广范围内传播，更好地为社会所利用，进一步提高博士后科学基金的资助效益。

中国博士后科学基金会从 2013 年起实施博士后优秀学术专著出版资助工作。经专家评审，评选出博士后优秀学术著作，中国博士后科学基金会资助出版费用。专著由科学出版社出版，统一命名为《博士后文库》。

资助出版工作是中国博士后科学基金会“十二五”期间进行基金资助改革的一项重要举措，虽然刚刚起步，但是我们对它寄予厚望。希望

通过这项工作,使博士后研究人员的创新成果能够更好地服务于国家创新驱动发展战略,服务于创新型国家的建设,也希望更多的博士后研究人员借助这颗“金种子”迅速成长为国家需要的创新型、复合型、战略型人才。



中国博士后科学基金会理事长

本书序

断陷湖盆是我国东部最主要的含油气盆地类型,而缓坡带是断陷盆地重要的构成单元,是地质研究和油气勘探的重要区域。受构造位置、地貌特征及古气候的影响,断陷盆地缓坡带多发育广泛分布的薄互层砂体。受古气候、古地貌、古水动力及古基准面等因素的影响,缓坡带沉积环境多变,沉积作用过程复杂,导致薄互层砂体沉积成因类型多样;不同沉积环境形成的薄互层砂体,由于其沉积特征、沉积水体特征、互层泥岩成分及后期成岩流体和成岩环境封闭性等因素的差异性,薄互层砂体储层埋藏过程中经历的成岩环境演化过程、成岩作用类型、成岩产物分布规律及储层分布规律均存在明显的差异。因此,开展断陷湖盆缓坡带薄互层砂体研究,无论是对地质科学问题的探讨还是对勘探生产的指导,都具有重要的意义。

《断陷湖盆缓坡带薄互层砂体沉积特征与储层成岩作用》一书以东营凹陷缓坡带为例,综合利用钻井岩心、测井录井及分析化验资料,系统研究了薄互层砂体的概念、沉积环境、沉积成因类型及特征,建立了薄互层砂体沉积发育模式。以此为基础,综合利用多种地球化学分析测试手段和方法,重塑了薄互层砂体储层多因素综合表征的埋藏成岩环境演化过程,明确了不同成岩环境演化过程中成岩作用响应规律,建立了薄互层砂体储层成岩改造模式,明确了不同成岩改造模式的储层发育规律。该书在断陷湖盆缓坡带薄互层砂体沉积成因机制、埋藏成岩环境演化恢复以及优质储层形成机制这两个科学问题方面取得了较大的突破和进展,该书的出版对我国陆相盆地沉积储层研究具有重要的参考价值;同样,也会受到广大地质工作者的欢迎。



“千人计划”国家特聘专家

2016年1月29日

前 言

薄互层砂体是断陷湖盆缓坡带重要的砂体类型，往往具有砂体厚度薄、横向分布范围广、沉积成因类型多样、成岩作用特征复杂及储层发育规律难预测等特点。本书以渤海湾盆地东营凹陷缓坡带孔一段一沙四段发育的薄互层砂体为研究对象，综合利用钻井、测井、录井、微量及常量元素分析、常规薄片分析、铸体薄片分析、扫描电镜分析、压汞分析、物性分析、碳氧同位素分析和流体包裹体分析等资料和方法，重点攻关断陷湖盆缓坡带薄互层砂体沉积环境、沉积成因类型和沉积模式以及基于埋藏成岩环境重塑的薄互层砂体储层成岩改造模式两大科学问题。围绕科学问题，系统开展薄互层砂体沉积成因类型、砂体分布规律、沉积演化模式、储层储集特征及成岩作用、储层埋藏成岩环境、储层成岩改造模式及储层发育规律研究。

本书共分七章。第一章介绍渤海湾盆地东营凹陷地质概况。第二章综合利用钻井、测井、录井、三维地震、元素地球化学等资料，厘定薄互层砂体的定义，总结薄互层砂体的特征，明确薄互层砂体沉积成因类型及沉积特征。第三章在第二章研究的基础上，结合现代沉积考察，阐明断陷湖盆缓坡带薄互层砂体沉积环境，详析薄互层砂体形成发育的控制因素，建立薄互层砂体沉积及演化模式。第四章综合利用普通薄片、铸体薄片、扫描电镜、压汞资料、物性资料等分析测试资料，系统总结薄互层砂体储集物性特征、储集空间特征和孔喉结构特征。第五章综合利用普通薄片、铸体薄片、扫描电镜等资料，系统总结薄互层砂体储层成岩作用类型及特征。第六章综合利用薄片资料、同位素资料、包裹体资料等，结合盆地埋藏演化史分析，重塑薄互层砂体储层地质历史时期埋藏成岩环境演化过程，明确不同类型薄互层砂体成岩环境演化差异。第七章以薄互层砂体沉积、储集、成岩研究为基础，结合盆地构造演化分析，建立薄互层砂体储层成岩改造模式，以此为基础，系统总结薄互层砂体储层发育规律。

本书分工如下：前言、第一章由王健编写，第二章和第三章由王健、操应长、王艳忠编写，第四章由王健、王艳忠编写，第五章由王健、操应长编写，第六章由操应长、王健编写，第七章由王健、操应长编写，全书由王健统稿。

本书的研究成果得到了国家自然科学基金石油化工联合基金重点支持项目“致密砂岩油气储层储集性能量化表征及其有效性量化评价(U1262203)”、国家自然科学基金“东营凹陷古近系中深层孔隙度高值带成因机制及其量化预测研究(40972080)”、国家自然科学基金青年基金“东营凹陷漫湖砂体与滩坝砂体

成岩演化差异及优质储层成因机制(41402095)”、国家科技重大专项“薄互层低渗透油藏储层描述及评价技术研究(2011ZX05051-001)”、国家油气重大专项“东营凹陷沙河街组碎屑岩储层纵向演化及其量化表征研究(2008ZX05051-02-01)”、中国博士后科学基金特别资助项目“薄互层低渗透储层‘甜点’发育规律及有效性评价(2015T80760)”和中国博士后科学基金面上一等资助项目“滩坝砂岩低渗透储层低渗成因机制及‘甜点’预测(2014M550380)”的联合资助。

本书的形成得益于中国石油大学(华东)油气储层研究中心多年的工作积累。胜利油田胜利采油厂弭连山工程师和大庆油田勘探开发研究院徐磊工程师针对第二章和第三章的相关内容做了大量的前期研究工作。在本书编写过程中,得到中组部“千人计划”国家特聘专家刘可禹教授,胜利油田宋国奇教授、王永诗教授、刘惠民教授,中国石油大学(华东)金强教授、钟建华教授、陈世悦教授、吴智平教授、邱隆伟教授和王冠民教授的指导与帮助,另外,在本书的写作过程中,中国石油大学(华东)油气储层研究中心的博士和硕士研究生蒯克来、马奔奔、杨田、张少敏、徐琦松、金杰华、程鑫、薛秀杰、王铸坤、王新桐、周琨、户瑞宁等承担了部分图件的绘制和清绘工作,在此谨表谢意。

由于笔者水平有限,书中不当之处在所难免,敬请专家和读者批评指正。

作 者

2016年2月

目 录

《博士后文库》序言

本书序

前言

第一章 缓坡带基本地质概况	1
第一节 区域地质概况	1
一、构造位置	1
二、构造演化特征	1
第二节 缓坡带构造特征	5
第三节 缓坡带沉积地层特征	8
第二章 薄互层砂体的沉积特征	11
第一节 薄互层砂体的概念及特征	11
一、薄互层砂体的概念	11
二、薄互层砂体的特征	12
第二节 薄互层砂体的沉积成因类型及其特征	16
一、漫湖三角洲	16
二、浅水三角洲	22
三、漫湖滩坝	29
四、滨浅湖滩坝	33
第三章 薄互层砂体的沉积模式	50
第一节 薄互层砂体的沉积环境特征	50
一、古地貌特征	50
二、古气候和古湖泊特征	52
三、沉积环境特征	62
第二节 薄互层砂体沉积作用的控制因素	62
一、现代沉积考察	62
二、薄互层砂体沉积作用的控制因素	77
第三节 沉积演化模式	90
一、干旱气候条件下高频振荡性漫湖-盐湖沉积模式	90
二、潮湿气候条件下咸水滨浅湖-半深湖沉积模式	93

第四章 薄互层砂体储层的储集特征	95
第一节 薄互层砂体储层储集物性特征	95
一、漫湖环境薄互层砂体储层储集物性特征	95
二、滨浅湖环境薄互层砂体储层储集物性特征	99
第二节 薄互层砂体储层储集空间特征	101
一、漫湖环境薄互层砂体储层储集空间特征	101
二、滨浅湖环境薄互层砂体储层储集空间特征	105
第三节 薄互层砂体储层孔喉结构特征	107
一、孔喉结构参数特征	107
二、孔喉结构分布特征	110
第五章 薄互层砂体储层的成岩作用特征	114
第一节 压实作用	114
第二节 胶结作用	116
第三节 溶解作用	123
第四节 交代作用	126
第六章 薄互层砂体储层埋藏成岩环境	128
第一节 埋藏成岩环境的矿物地球化学记录	128
一、埋藏成岩环境的成岩产物记录	128
二、埋藏成岩环境的碳氧稳定同位素记录	131
三、埋藏成岩环境的流体包裹体记录	136
第二节 埋藏成岩环境的成岩流体特征	155
一、漫湖环境储层埋藏成岩环境的成岩流体特征	156
二、滨浅湖环境储层埋藏成岩环境的成岩流体特征	165
第三节 埋藏成岩环境的封闭性特征	171
一、地层压力特征	171
二、成岩环境封闭性特征	175
第四节 薄互层砂体储层的埋藏成岩环境	175
一、成岩演化序列	175
二、埋藏成岩环境差异	176
第七章 薄互层砂体储层的成岩改造模式	178
第一节 薄互层砂体储层成岩作用的控制作用	178
一、地层温度和成岩环境封闭性控制了储层压实作用强度	178
二、地层温度和早期成岩流体控制了储层胶结壳发育程度	178
三、成岩流体酸碱特征控制了储层溶蚀孔隙类型及发育程度	181
四、成岩环境封闭性演化差异控制了储层成岩产物分布规律	182

五、油气充注对薄互层砂体储层成岩作用的影响·····	187
第二节 薄互层砂体储层的成岩改造模式·····	190
一、多重酸碱环境交替-开放环境上升流作用模式·····	190
二、碱性-酸性环境演化-开放环境下降流作用模式·····	193
三、多重酸碱交替-早期开放-中期开放-晚期封闭环境模式·····	195
四、多重酸碱交替-早期封闭-中期开放-晚期封闭环境模式·····	197
第三节 不同成岩改造模式储层发育规律·····	200
参考文献·····	204
编后记·····	212

第一章 缓坡带基本地质概况

第一节 区域地质概况

一、构造位置

渤海湾盆地是我国东部重要的含油气盆地，包括临清拗陷、冀中拗陷、黄骅拗陷、济阳拗陷、渤中拗陷和辽河拗陷等次级构造单元。济阳拗陷位于渤海湾盆地东南部，东邻郯庐断裂带，北部和西部以埕宁隆起、渤南凸起与黄骅拗陷、渤中拗陷相邻，南部以齐河—广饶断裂与鲁西隆起分界，西南部与临清拗陷相连（图 1.1A），总面积 25510km^2 。东营凹陷位于济阳拗陷南部，是渤海湾盆地的一个富油气凹陷（图 1.1A）。东营凹陷是在古生界基岩背景上发育起来的中—新生代箕状断陷—拗陷湖盆，东邻青坨子凸起，南部与广饶凸起及鲁西隆起呈超覆接触，西部以青城凸起及林樊家凸起为界，北以陈家庄凸起—滨县凸起为界（图 1.1B），总体上为北断南超、北陡南缓的复式半地堑伸展盆地（冯有良，1999）（图 1.1C）。盆地东西长约 90km ，南北宽约 65km ，面积大约 5700km^2 ，区域上可以划分为北部陡坡带、中央断裂背斜带（中央隆起带）、民丰洼陷、利津洼陷、牛庄洼陷、博兴洼陷、南部缓坡带等二级构造单元（林会喜等，2005）。研究工区包括了南部缓坡带、博兴洼陷及牛庄洼陷南部地区（图 1.1B）。

二、构造演化特征

从图 1.2 和图 1.3 构造演化图看，东营凹陷的构造演化大致可以分为四个阶段：①中生界（主要是上侏罗—下白垩统）沉积时期初始裂陷阶段，发育多组正断层；②孔店组—沙四段沉积时期继承性裂陷阶段，部分先存断层继承性活动成长为东营凹陷主边界断层；③沙三段、沙二段、沙一段和东营组沉积时期稳定裂陷阶段，主边界断层的稳定伸展并导致盖层断层发育；④新近系和第四系沉积时期后裂陷阶段，盆地区整体拗陷。

中生代时期（主要是上侏罗—下白垩统沉积时期），济阳地区受郯庐深断裂活动及区域应力场控制发育多组断层，这些断裂多数表现为正断层或走滑正断层特征，并控制了晚侏罗世—早白垩世裂陷盆地的形成和演化。

沙四段—孔店组沉积时期, 东营凹陷南部缓坡带的坡度很小, 甚至可能是倾向 NW 倾斜。这时的裂陷作用主要是使中生代断层发生继承性活动, 并且使部分断层的位移明显增大逐渐演化成为东营凹陷的主边界断层。

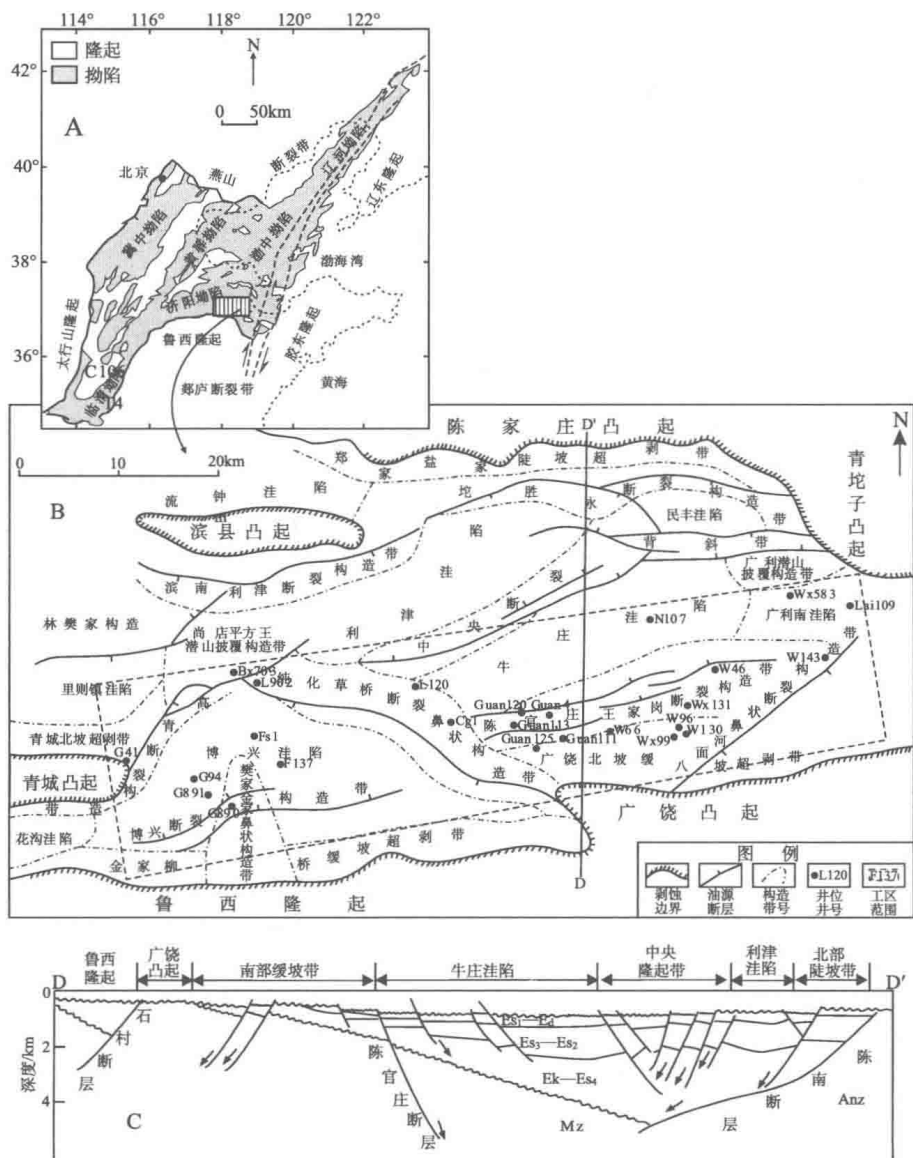


图 1.1 东营凹陷构造位置、构造单元划分及研究区构造特征

沙三段沉积时期, 随着陈南断层等东营凹陷主边界断层逐渐表现为主要的伸展断层后, 南部缓坡带向北倾斜的掀斜运动逐渐表现明显起来, 并在掀斜运动过程中发育一些反向调节性正断层。沙二段开始沉积以后, 至馆陶组沉积前, 东营凹陷内部的中央构造带开始发育, 并导致南部缓坡带的向北的掀斜运动增强, 加

剧了近 EW 向盖层反向正断层的位移, 并使盖层反向正断层发育的构造部位逐渐向盆地内部迁移。

东营组沉积后, 区域性的隆升使南部缓坡带遭受明显的剥蚀作用, 使馆陶组超覆在下古近系、新近系的不同地层之上。这一时期东营凹陷南部斜坡在整体下降的基础上受差异压实作用影响仍发生轻微的掀斜运动, 部分盖层断层也发生压实正断层位移。

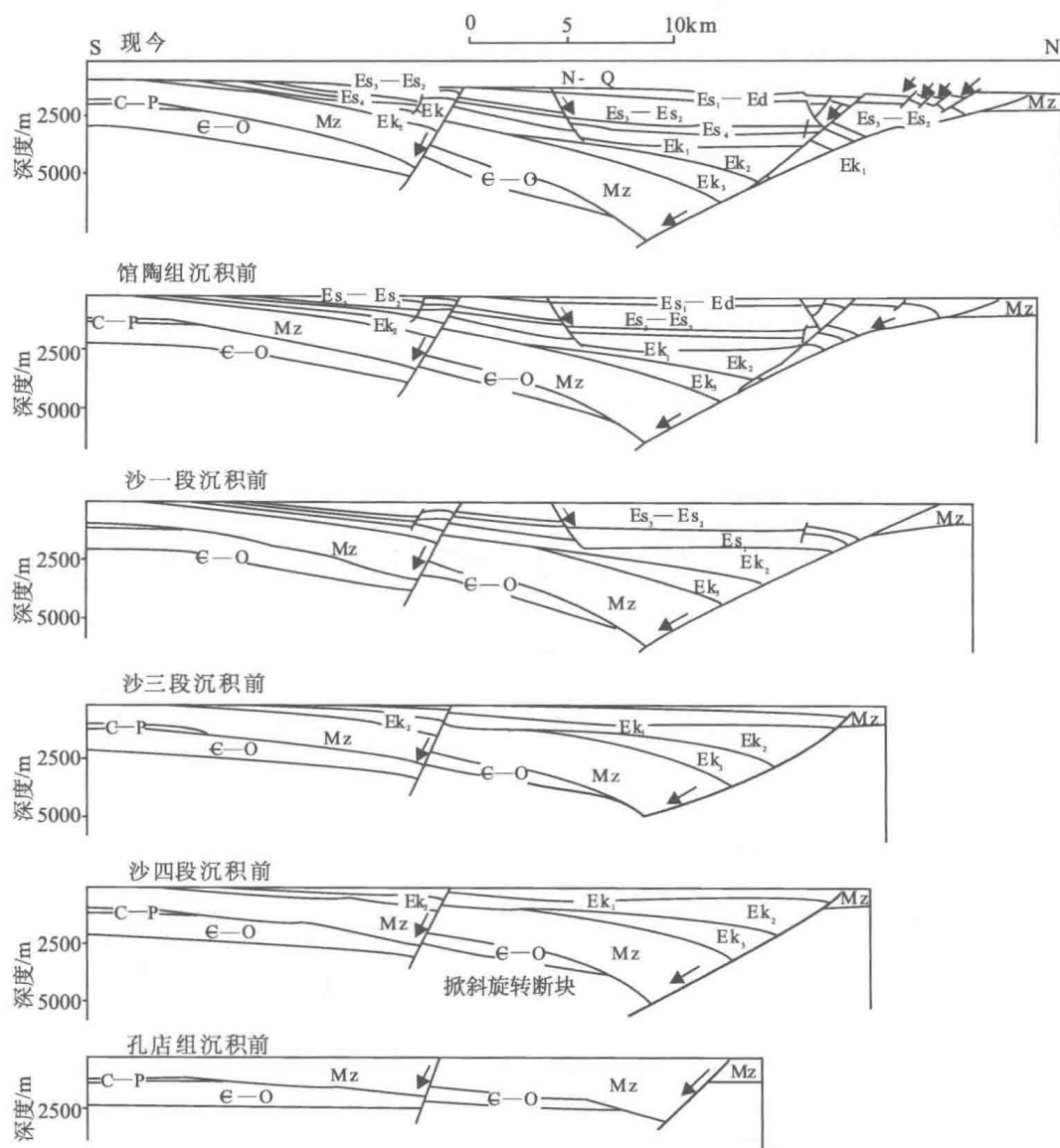


图 1.2 东营凹陷 642.2 地震剖面构造演化

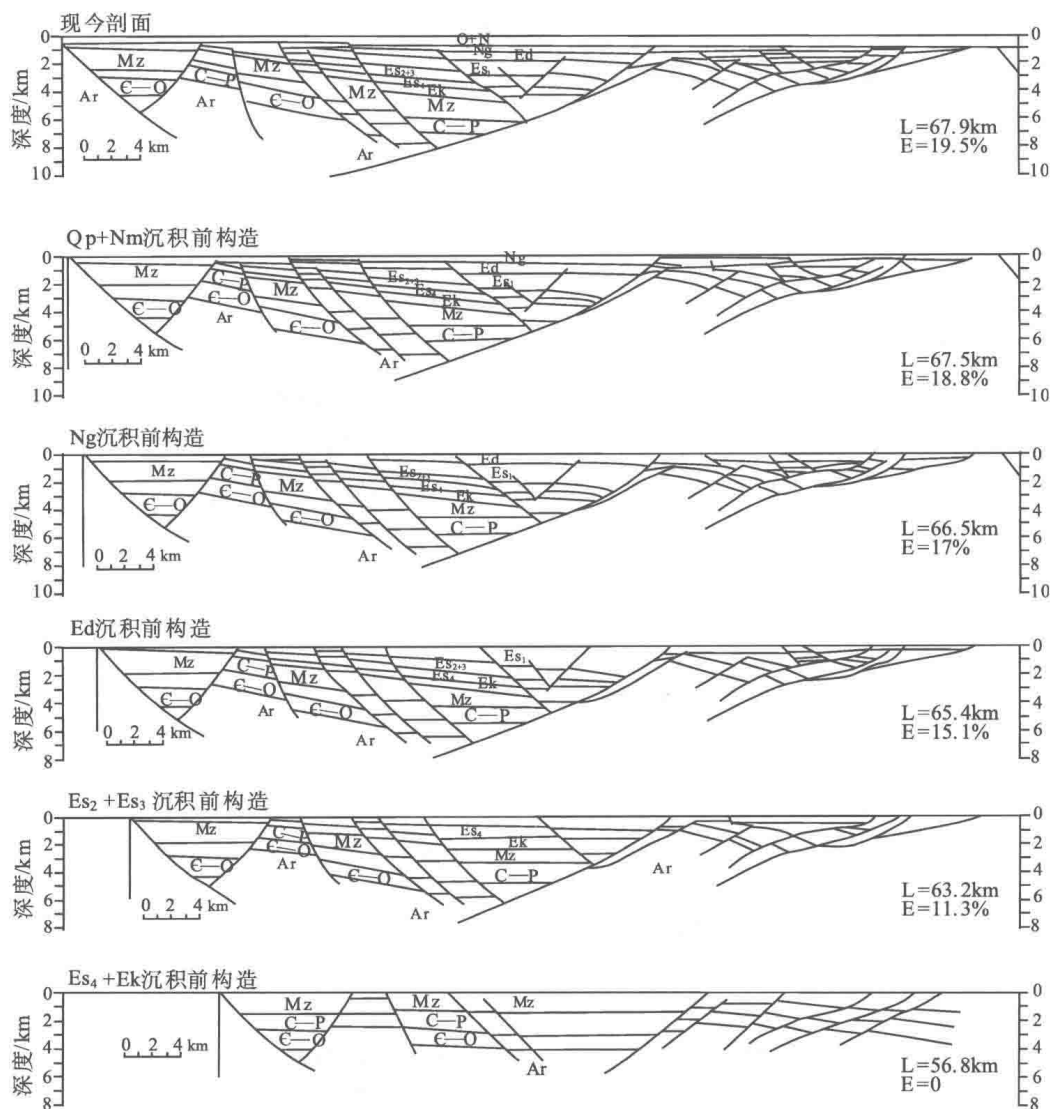


图 1.3 过 J24-G35-B17 等井连井剖面构造演化

东营凹陷南部斜坡带的八面河断层、石村断层都属于中生代时期形成的基底断层，在沙四段—孔店组沉积时期这些断层发生继承性活动，主要表现为伸展位移，并对沉积充填有一定的控制作用。沙三段沉积开始，随着整个东营凹陷南部缓坡带向北的掀斜运动的发展，八面河断层的活动逐渐被掀斜运动形成的反向正断层活动所替代，石村断层成为控制博兴洼陷的主干伸展断层。此外，受掀斜运动与沉积充填速率变化的影响，东营凹陷南部缓坡带在古近纪伸展时期发育有多个局部不整合面。其中盆地盖层内部沙三段与下伏地层之间的局部不整合面最明显，沙三段超覆在沙四段、孔店组之上。这说明盆地裂陷作用具有多期性特点，

并且不同时期的裂陷作用引起的伸展构造变形方式也相应有所变化,较晚期的裂陷作用过程中发育的断层可以继承先存断层面,但是盖层断层总体上具有向盆地内部迁移的特点。

古近纪断陷期受喜马拉雅运动的控制,发育了初始断陷期—强烈断陷期—断陷萎缩期的演化过程,形成了浅湖相—深湖相—河流相—浅湖相的一个完整的沉积旋回。

初始断陷期(E_k-E_{s4}):初始裂陷期的沉积由孔店组和沙四段地层组成。孔店组沉积时期东营凹陷表现为伸展半地堑,以陈南断层为主,活动强烈,盆地快速拉张沉降,控盆断层由板式向铲式转换,盆地开始由旋转半地堑向滚动半地堑转换(于建国等,2009)。沙四段沉积时期陈南断层、滨南断层活动强度较孔店组沉积时期明显减弱,同时陡坡带形成一系列同向派生断层,这些断层具生长断层的性质,断层活动强度不大;洼陷中心靠近中央低凸起的地区发育一些反向调节断层,缓坡带形成产生的断层继续活动,同时产生一些新生断层;该时期盆地沉积中心依然在陡坡带附近的洼陷区,地层厚度向缓坡带减薄。总体上,该时期处于初始裂陷期,加之干旱—半干旱气候条件,湖盆水体范围较小,盐度较大,盆地沉积了一套滨浅湖相的灰泥岩、粉细砂岩与冲积扇、扇三角洲、近岸水下扇砂砾岩交替,并含岩盐及石膏沉积。

强烈断陷期($E_{s3}-E_{s2x}$):强烈裂陷期的沉积由沙三段—沙二下亚段地层组成。该时期东营凹陷构造应力场近 NW 向拉伸,NE 向断裂活动强烈,开始了盆地断陷作用和扩张作用的主要阶段,盆地的沉降幅度加大,扩张速度加快,大量新生断层开始形成,区内主要断层处于发育高峰时期。该时期内一系列的裂陷作用使盆地不再具有统一的沉降中心,分别在断层下降盘出现多个沉降中心,继而形成了博兴、牛庄、利津和民丰四个次级洼陷共存的盆地格局。在沉积响应上,强烈断陷早期,盆地处于快速沉降过程,沉积速度远大于沉积物供给速度,湖盆沉积处于欠补偿状态,在气候潮湿条件下,沉积了厚层深灰色泥岩、油页岩及不同成因类型重力流;到强烈断陷中末期,断裂活动相对减弱,盆地大面积发育轴向三角洲体系。 E_{s3} 期沉积以来,青城凸起及其北部的高青地区开始抬升,早期沉积地层遭受剥蚀(于建国等,2009)。

断陷萎缩期($E_{s2s}-E_d$):该时期断裂活动进入后期,凹陷基本保持前期形成的构造格局。总体上,该时期处于断陷萎缩阶段,湖水变浅,盆地主要形成了以紫红色泥岩夹砂岩、含砾砂岩为主的辫状河、冲积扇和浅湖为主的沉积。

第二节 缓坡带构造特征

东营凹陷南斜坡在构造上可以划分为十个二级构造带,包括青城凸起、鲁西