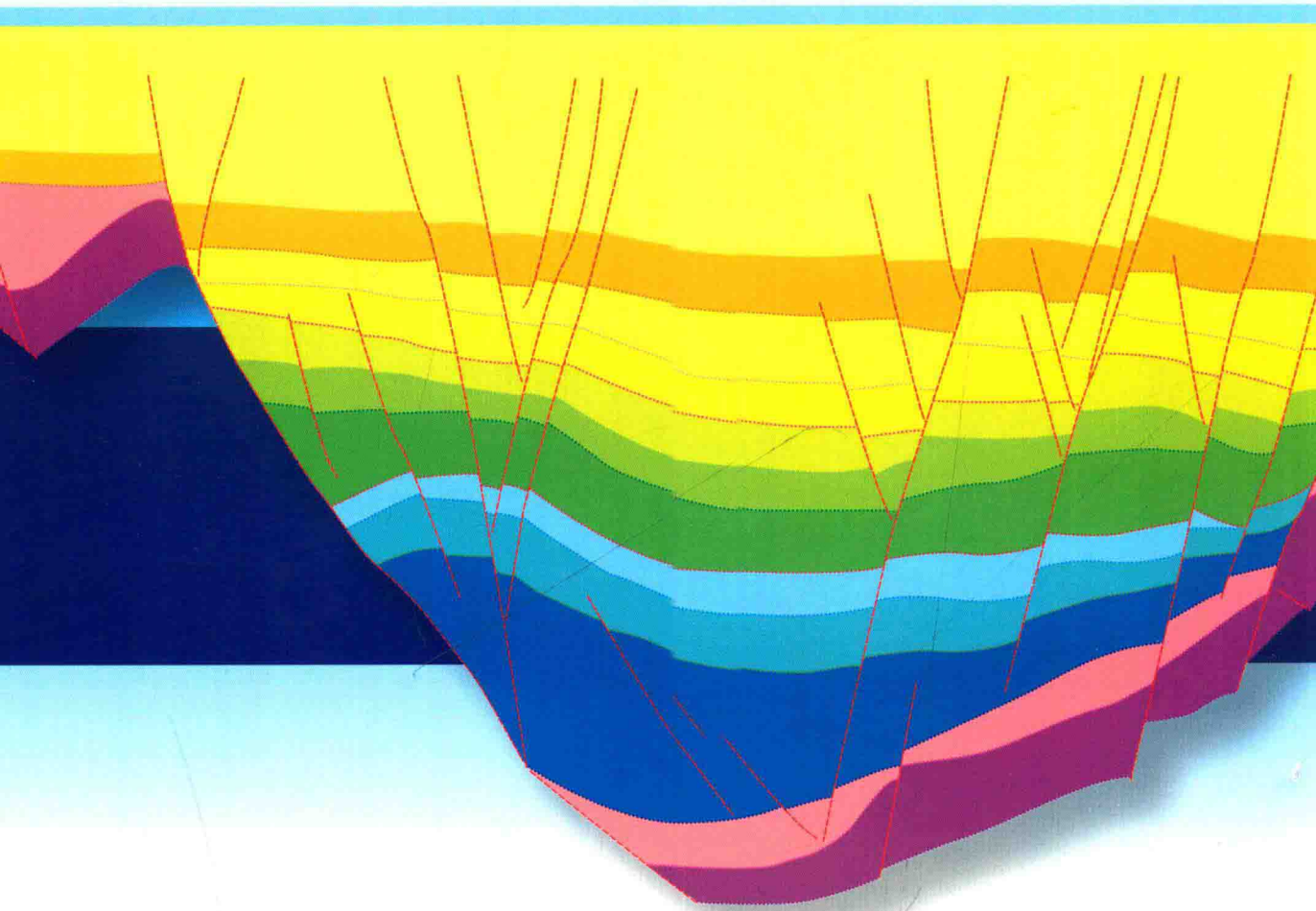


南堡凹陷东营组堆积期构造活动的 “双强效应”及其油气地质意义

NANPU AOXIAN DONGYINGZU DUIJIQI GOUZAO HUODONG DE
SHUANGQIANG XIAOYING JIQI YOUQI DIZHI YIYI

王 华 甘华军 陈 思 王观宏 等著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

南堡凹陷东营组堆积期构造活动的 “双强效应”及其油气地质意义

王 华 甘华军 陈 思 王观宏 等著



中國地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

内 容 简 介

本书以渤海湾盆地中“小而肥”的富油气凹陷——南堡凹陷为对象,以古近纪晚期的东营组堆积期为研究时段,创造性地识别出了南堡凹陷存在的边缘断裂的强烈活动性和凹陷整体的强烈拗陷作用的“双强效应”。研究了“双强要素”联合作用控制下,凹陷的构造-地层格架以及沉积相的类型及其分布特征,系统地探讨了东营期“双强要素”联合作用的成因机制及其巨大的油气地质意义。

本书偏重于在含能源盆地及其油气资源勘查领域的应用实践和综合分析,是笔者长期在该领域开展科学研究、国际合作与学术交流的成果。本书适用于石油地质、沉积盆地分析等相关专业的师生阅读和学习,同时也适合于从事油气勘探领域的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

南堡凹陷东营组堆积期构造活动的“双强效应”及其油气地质意义/王华,甘华军,陈思,王观宏等著. —武汉:中国地质大学出版社,2016. 12

ISBN 978-7-5625-3998-8

- I. ①南…
- II. ①王… ②甘… ③陈… ④王…
- III. ①渤海湾盆地-石油地质学-研究
- IV. ①P618. 130. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 317710 号

南堡凹陷东营组堆积期构造活动的“双强效应”及其油气地质意义

王 华 甘华军 等著
陈 思 王观宏

责任编辑:王凤林 王 敏

责任校对:代 莹

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮编:430074

电 话:(027)67883511

传 真:(027)67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

Http://www.cugp.cug.edu.cn

开本:880 毫米×1230 毫米 1/16

字数:400 千字 印张:12.75

版次:2016 年 12 月第 1 版

印次:2016 年 12 月第 1 次印刷

印刷:湖北睿智印务有限公司

印数:1—1000 册

ISBN 978-7-5625-3998-8

定价:78.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

《南堡凹陷东营组堆积期构造活动的 “双强效应”及其油气地质意义》

主编:王 华 甘华军 陈 思 王观宏

编委:王家豪 肖 军 廖远涛 姜 华

林正良 苗顺德

摘要

构造-沉积分析是沉积盆地分析的核心问题之一,这一观点已得到越来越多学者的认可。国内外许多学者也从不同角度、不同尺度对构造与沉积之间的控制-响应关系进行了研究和探讨。构造作用控制着盆地(凹陷)的古地貌形态,进而控制着物源通道及砂分散体系和沉积体系空间展布。因此,构造作用与沉积作用结合分析的研究思路,必将作为盆地分析的研究热点和发展趋势。在陆相断陷盆地中,油气的生成、运移和聚集与构造活动有着密不可分的关系,构造与油气成藏各要素及油气聚集和破坏之间的控制响应关系的研究必将长期成为含油气盆地分析及油气勘探研究中的热点和趋势。

南堡凹陷是位于渤海湾盆地黄骅坳陷东北部的二级负向构造单元,面积约 1932km²,是渤海湾盆地中“小而肥”的富油气凹陷。随着凹陷内东营组勘探力度和资源探明程度的不断增高,逐渐衍生出一系列亟待解决的问题:①南堡凹陷内 Ed₃ 作为除沙河街组烃源岩外的又一套高效烃源岩,在渤海湾盆地大部分地区并不发育,其在南堡凹陷发育的主控因素是什么?②东营组沉积时期,渤海湾盆地整体进入断拗转换期,盆地内大部分坳陷(凹陷)主要发育冲积扇-河流沉积体系,或辫状河三角洲-浅湖沉积体系,而南堡凹陷却广泛发育半深湖-深湖相沉积环境,堆积了厚层泥岩和大量的前缘滑塌体,同时北部断控陡坡带裙带状展布大范围的扇三角洲沉积体系和近岸水下扇沉积体系,导致南堡凹陷沉积特征的差异性的原因又是什么?③随着南堡凹陷东营组油气勘探工作的加深,南堡凹陷在构造方面的研究,尤其在构造活动性与沉积相之间的耦合关系及其油气地质意义方面尚需加强系统性、全面性的认知。

基于以上的问题,本研究以南堡凹陷为对象,以古近纪晚期的东营组堆积期为研究时段,针对凹陷内具有强烈的构造活动性,尤其是东西向大断裂的强烈活动而有别于我国东部同时期发育的其他断陷盆地(多数该类盆地在古近纪晚期已进入构造活动的衰弱期,主干断裂的活动性均很弱)的特征,探讨南堡凹陷边缘断裂的强烈活动性,以及在凹陷整体的强烈拗陷作用的“双强要素”联合作用下,南堡凹陷的沉降中心、沉积中心的分布及发育沉积相的类型及其分布特征,并在此基础上,探讨东营期“双强要素”联合作用的驱动机制及其重要的油气地质意义。

该专著取得的重要成果和认识如下。

(1)构造-地层分析方面:在详细分析南堡凹陷东营组沉积期构造地层特征、边界断裂活动性、基底沉降特征、凹陷伸展特征,并与沙河街组沉积期进行纵向对比,与周邻地区东营组沉积期进行横向对比的基础上,总结了南堡凹陷东营组沉积期构造活动不同于渤海湾盆地其他坳陷(凹陷),甚至多数处于断拗转换期坳陷(凹陷)的特殊性:一方面边界断裂活动强烈,尤其以近 EW 向延伸的西南庄断裂中段和高柳断裂的强烈活动为特征。另一方面沉降中心并不沿边界断裂展布,而是位于凹陷中部的林雀次凹和曹妃甸次凹处,表明拗陷作用也很强烈。构造-地层格架剖面上,东营组构造层在紧邻边界断裂下降盘处和远离边界断裂的中央凹陷带均发育厚层地层,显示边界断裂活动和拗陷作用对沉积均有明显的控制。本次研究将南堡凹陷东营组沉积期边界断裂活动强烈、拗陷作用也很强烈的特征称为构造活动的“双强效应”。在构造活动的“双强效应”控制下,凹陷基底沉降强烈,Ed₃ 沉积时期基底沉降速率甚至超过古近纪早期(强烈断陷期)。

(2)沉积体系研究方面:东营组沉积期,渤海湾盆地普遍进入断拗转换期。不同于渤海湾盆地其他坳陷(凹陷)发育河流相、滨浅湖相或辫状河三角洲为主的沉积体系,在构造活动的“双强效应”控制下,南堡凹陷呈现出不同的沉积面貌:①半深湖-深湖沉积环境广泛发育,且远离边界断裂向凹陷中部迁移,凹陷处于欠补偿—补偿状态。②强烈的基底沉降为碎屑物堆积提供了充足的可容纳空间,加之物源碎屑供给充足,较短的时间内堆积了巨厚的东营组地层;拗陷作用控制下,地层厚度中心展布在凹陷中部

的林雀次凹和曹妃甸次凹处,同时边界断裂的强烈活动使得紧邻断裂下降盘处发育局部厚度高值带。

③边界断裂下降盘处较陡的构造坡降,以及凹陷中部强烈的基底沉降,为扇三角洲沉积体系、近岸水下扇沉积体系和滑塌重力流沉积体系的发育提供了合适的坡降条件和可容纳空间。北部断控陡坡带扇三角洲沉积体系十分发育,数个朵体呈裙带状向凹陷中心进积,不仅展布范围非常广,而且扇体堆积厚度大,南部缓坡带则发育了辫状河三角洲沉积体系。

(3)构造活动的“双强效应”对沉积和储层的控制作用方面:南堡凹陷东营组沉积期表现出强烈的拗陷作用,同时边界断裂的活动性也很强烈。受构造活动“双强要素”的控制,南堡凹陷内发育的沉积相类型和特征明显有别于渤海湾盆地的其他凹陷。例如歧口凹陷和渤中凹陷以拗陷作用为主,发育沉积相类型单一,以辫状河三角洲沉积体系为主;而冀中拗陷、济阳拗陷、临清拗陷及歧口凹陷西部陆上区等基底沉降微弱,湖盆处于过补偿状态,广泛发育河流相、滨浅湖相沉积,或以辫状河三角洲为主的浅水沉积。南堡凹陷东营组以扇/辫状三角洲前缘河口坝砂体、扇/辫状三角洲平原水下分流河道砂体、滑塌浊积岩为主的中—高孔、中—高渗的砂岩层是较好—好储层,使得东营组优质储层非常发育,范围广且类型齐全。在构造活动的“双强效应”控制下,优质烃源岩、类型丰富的优质储层以及区域盖层的发育,使得南堡凹陷东营组具有极大的勘探潜力。

(4)构造活动“双强效应”的油气意义:南堡凹陷在东营组发育期边缘断裂的活动性强且整体上的拗陷作用十分强烈,导致研究区与我国东部其他第三纪含油气盆地相比而言,多了一套大面积的深湖相厚层烃源岩。由于东营组的巨厚堆积、沉降深度大和其后的新近系巨大厚度的叠加效应,导致了 Ed_3 的优质烃源岩进入生烃门限而生烃和排烃,而 Ed_2 厚层泥岩则成为良好的区域性盖层。同时在东营组堆积期由于深湖相的长期存在,使其内部发育了多种类型的储集体,且形成了良好的“自生自储”的组合关系,从而造就了东营组巨大的油气勘探潜力。凹陷在东营组堆积期及其后的新构造运动,导致了大量的具有垂向沟通能力的同沉积断层的活动性增强和晚期的再活动,这些断层有效地沟通了东营组储层(储集体)与下伏的沙街组主力“烃源岩灶”,使得下部的油气垂向运移至东营组乃至更浅层的储集体内成藏。近年来在南堡凹陷的油气勘探突破的实践成果也已证明了东营期近 EW 向边界断裂的强烈活动与基底沉降强烈增速的“双强要素”的联合控制作用的油气意义重大。

(5)构造活动的“双强效应”成因机制的探讨:东营组沉积期,渤海湾盆地普遍进入断拗转换期,由热沉降引起的拗陷作用以渤中拗陷为中心向周围大致呈递减的趋势,紧邻渤中拗陷的南堡凹陷拗陷作用强烈。此外, E_{s1} 沉积晚期南堡凹陷大规模岩浆喷发后,由于热量的迅速衰减,岩浆房附近浅表层地壳的均衡沉降,也可能是东营组(尤其是东营组早期)拗陷作用强烈的原因。 E_{s1} — Ed 沉积时期,太平洋板块对欧亚大陆的向西俯冲突然加速,导致渤海湾盆地东部边界—郯庐断裂右旋走滑,以及穿过黄骅拗陷的兰聊断裂北段活化并走滑,郯庐断裂和兰聊断裂的走滑活动在黄骅拗陷东北部派生出近 SN 向伸展叠加区,导致 NNE 向延伸的黄骅拗陷边界断裂——沧东断裂的正向伸展作用大幅度减弱,走滑分量急剧增强,沉降中心和断裂活动中心逐渐偏离边界断裂向拗陷内部迁移, Ed 沉积时期迁移到南堡凹陷,导致以近 EW 走向为代表的边界断裂活动的显著增强。因此,构造活动的“双强效应”是深部动力过程与浅部构造应力场综合作用的产物。

毋须讳言,关于构造活动“双强效应”的成因机制研究深度和精度尚因资料不齐和研究者学术水平所限,尚待进一步开展工作。

本书是中国地质大学(武汉)一批中青年学者长期密切合作、集体智慧的结晶。编写分工是:摘要和第一章由王华、甘华军、陈思、王观宏执笔;第二章由甘华军、王观宏、陈思执笔;第三章由王家豪、王华、甘华军、林正良、苗顺德执笔;第四章由陈思、肖军、王华、林正良、姜华执笔;第五章由王华、陈思、王观宏、廖远涛执笔;第六章由王华、甘华军、王观宏、陈思执笔;参考文献由王华、甘华军、王观宏等全体人员综合整理;全书最后由王华、甘华军、陈思和王观宏进行统稿。

本书在资料准备、编写与出版过程中始终得到了中国石油天然气股份有限公司冀东油田分公司董月霞总地质师为代表的多位领导和同事们的帮助及关心!

本书的出版得益于国家自然科学基金项目(No. 41272122)、国家科技“十三五”重大油气专项课题的子课题(2016ZX05006006-002)的支持,得到了中国地质大学李思田教授所给予的长期热心支持和学术指导,感谢中国石油勘探开发研究院周海民常务副院长的多年支持和重要合作。同时,感谢中国地质大学(北京)姜在兴教授,中国石油大学(北京)朱筱敏教授,中国矿业大学(北京)邵龙义教授,中国石油勘探开发研究院冯友良研究员和中国地质大学(武汉)陆永潮教授、卢宗盛教授、任建业教授、王方正教授、杨士恭教授等的多次学术交流和协助与指导!中国地质大学(武汉)矿产普查与勘探专业的多位博士生(任培罡、方欣欣、赵淑娥、刘小龙、金思丁、刘恩涛、李媛、任金峰)、硕士研究生(吕学菊、刘俊青、余江浩、王苗、刘杰、任桂媛、李彦丽)在文图编排及出版过程中的图文编辑等方面均付出了辛勤的劳动和汗水。在此,本书的编者向他们一并表示衷心的感谢!

由于著者们研究水平和工作经验有限,对南堡凹陷构造和沉积方面的一些地质问题的认识、分析和总结定会存在不足和欠妥之处,热忱欢迎读者们予以指正。

Double intense effect of tectonic activity and its control on deposition and reservoirs in Dongying Formation, Nanpu Sag, China

Hua Wang, Huajun Gan, Si Chen, Guanhong Wang

Abstract

The tectonic and sedimentation analysis are key questions in the sedimentary basin analysis, which has been noticed by most researchers in this field. Quite a lot previous works have been done from different aspects and scales, which discussed the control and corresponding relationship between the tectonic and deposition. The structure movements control the paleo-morphology of basins and sags, and also control the sediments transport path and distributions of depositional systems and sandstones. Therefore, the method of combine analysis of tectonic and sedimentation is one of the most important highlight and develop trending in basin analysis. In most lacustrine rift basins, the generation, transport and aggregation of hydrocarbon have intense relationship with tectonic activity. Thus, the control and corresponding relationship between tectonic and hydrocarbon generation factors, oil and gas aggregation, and destroy will be the highlight and develop trending in the analysis and explorations of petroliferous basins.

The Nanpu Sag is a suborder depression located in the northeast part of the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin. With area of 1932m², Nanpu Sag is an oil rich sag although it has relative small area. With the development of exploration and degree of proving up in Dongying Formation, there are several questions that need to be answered: ① as another high efficient source rock beside Shahejie Formation, the Ed₃ didn't develop widely in other sags in Bohai Bay Basin, but dose develop in Nanpu Sag. What's the main factor controlling the distribution of Ed₃ Formation in Nanpu Sag? ② in the syndepositional time of Dongying Formation, the Bohai bay basin switched from fault-controlled stage to depression dominated stage. Most sags in the Bohai Bay Basin were filled by alluvial fans and river depositional systems, or braided river delta-shallow lake depositional systems. However, the Nanpu Sag were mainly composed by fairly deep lake-deep lake environments, which deposited very thick mudstone and abundant delta front slump. At the same time, scalloped shape fan deltas and nearshore subaqueous fan system widely developed in the north steep slope, which controlled by faults. What's the reason and control factors of the differences in depositional system features? ③ with the development of explorations in the Nanpu Sag Dongying Formation, the coupling relationship between tectonic, structure activity and sedimentary system, as well as hydrocarbon significance

need to be recognized with systematisms and comprehensiveness.

With the questions that have been discussed above, this study will focus on the analysis of the intense tectonic movements in Nanpu Sag during late Paleogene Dongying Formation. The intense activity of the east - west trending fault shows significant difference than other rifts that developed during corresponding period in East China, most of which has switched into weak structure activity period during the late Paleogene with very low activity rate of main faults. Therefore, the Nanpu Sag shows double intense factors during late Paleogene, which are: the intense action of boundary faults, and intense depression of the whole sag. The sediment type and distribution features of subsidence centers and depositional centers under the control of double intense factors has been studied. Based on this, the hydrocarbon features and driving mechanism of double intense factors has been discussed.

The mainly conclusions of this study are as follow:

1. tectonic - sedimentation analysis: based on the syndepositional structure and stratigraphy features, boundary faults activities, basement subsidence, sag extension, and longitudinal comparison with Shahejie Formation in vertical series and Dongying Formation in adjacent areas laterally, the tectonic movements of Dongying Formation in Nanpu Sag show significant differences with other sags in Bohai Bay Basin, which represent specificity of sags during transfer period from fault - control to depression: on the one hand, the boundary fault activities is very strong, especially east - west trended middle segment of Xinanzhuang Fault and Gaoliu Fault; on the other hand, instead of distributing along the boundary faults as normal fault - controlled condition, the subsidence centers are developed in the middle part of Linque Sub - sag and Caofeidian Sub - sag, which indicate intense depression. From the tectonic - stratigraphy profile, the strata of Dongying Formation show relative thick features near the downthrown side of boundary fault and also in the sag center where distant away from the boundary fault. This is the result of controlling by both boundary fault activity and depressions. In this study, the intense boundary fault activity as well as the intense depression are called "double intense effect". Under the control of double intense effect, the basement shows very high subsidence rate. The basement subsidence rate of E_{d3} Formation is even higher than the early Paleogene (intense rift stage).

2. Aspect of sedimentary system: during the syndepositional time of Dongying Formation, the Bohai Bay Basin switched into diversionary stage from fault - control to depression generally. Different from other sags in Bohai Bay Basin, which were filled by river system, shore - shallow lake or braided river delta, the Nanpu Sag represents different sedimentary system under the control of double intense effect: ① fairly deep - deep lake widely developed and migrated away from boundary fault towards the center of sag. The whole sag was in un - compensated to compensation condition. ② the intense subsidence provides abundant accommodations for the siliciclastic deposits. With the sufficient sediment supply, the Dongying Formation reached huge thickness during a relative short period; with the depression of the sag, the strata thickness centers distributed in the middle part of the Linque Sub - sag and Caofeidian Sub - sag. At the same time, the intense activity of boundary fault makes the downthrown side develop thick sedimentation. ③ the steep downthrown side of boundary fault and intense basement subsidence provide appropriate slope gradient and accommodation space for the development of fan delta, nearshore subaqueous fan, and collapsed gravity flow deposits. Fan deltas distributed widely in the north fault - controlled steep slope area, which prograding towards the sag cen-

ter with thick lobes. Contrast with northern part, braided river deltas developed in the south gentle slope area.

3. At the aspect of controlling of tectonic double intense effect on the sedimentation and reservoirs; the Dongying Formation of Nanpu Sag represents intense depression and also strong boundary activities. Under the control of the double intense effect, the sedimentary facies shows significant differences from other sags in Bohai Bay Basin. For example, the Qikou Sag and Bozhong Sag, which are depression - dominated sags, show single sedimentary type of braided river delta system; the Jizhong Depression, Jiyang Depression, Linqing Depression, and west landward area of Qikou Sag are in over-compensation condition with weak subsidence, which were mainly filled by rivers, shore - shallow lakes, or shallow water deposits of braided river deltas. The middle to high porosity and permeability sandstones, which are high quality reservoirs, are widely developed in Dongying Formation of Nanpu Sag with various types in the sedimentary facies of fan delta, mouth bar of braided river delta front, subaqueous distributaries on delta plain, and slump turbidites. Under the control of double intense effect, the high quality hydrocarbons, abundant types of reservoirs, and regional developed cap rocks, constitute the necessary elements of enormous exploration potential of Dongying Formation in Nanpu Sag.

4. Petroleum significance of tectonic double intense effect; the high fault activity and high depression effect of the Dongying Formation stage, result in a layer of very thick deep - lake hydrocarbon rocks developed in a large area compared to other Paleogene petroliferous basins in east China. According to the superimposed effect of huge thickness of Dongying Formation, huge subsidence depth, and the following thick Neogene strata, the high quality hydrocarbon of Ed_3 Formation reached threshold of hydrocarbon generation and expelling. The thick mudstones of Ed_2 Formation become regional effective seal strata and cap rock. According to the long term exists of deep lake deposits during the syndepositional time of Dongying Formation, varies type of reservoirs formed in the Dongying Formation, which form the combination of self - generation and self - gathering reservoirs and bring up huge exploration potential of Dongying Formation. The structure movements during the syndepositional period of Dongying Formation and the following new tectonic movement stage, lead to great increasing of fault activities and their vertical communication, as well as re - active of fault during the late stage, which link up the reservoirs of Dongying Formation and the underneath hydrocarbon source rock in Shahejie Formation. This make the oil and gas migrate vertically along the deep faults towards reservoirs in Dongying Formation or in even younger strata. The break though of the practice result of exploration of Nanpu Sag in recent years has proven the great petroleum significance of combined controlling of the double intense effect of west - east boundary fault and basement subsidence.

5. The mechanism of tectonic double intense effect; during the Dongying Formation period, the Bohai Bay Basin has switched from fault control into depression stage. The depression effect by geothermal subsidence shows decreasing tendency from the center of Bozhong Depression to surrounding regions. As one of the adjacent sag of Bozhong Depression, Nanpu Sag shows intense depression during this time. Additionally, after the largescale magmatic eruption of late depositional period of Es_1 Formation, the heat has decayed sharply, which cause the isostatic subsidence of the shallow part of upper crust near the magma chamber. And this can also be the reason of intense depression of early Dongying-

ing Formation stage. During the E_{s1} — E_d Formation stage, the sudden accelerate of westward subduction from pacific plate towards Eurasia continental triggered the active of dextral strike-slip of Tanlu Fault (eastern boundary fault of Bohai Bay Basin) and the reactive of north part of Lanliao strike-slip Fault across through the Huanghua Depression. The strike-slip activities of these two faults derived SN trending stretching superposition area in the northeast part of Huanghua Depression, which cause the substantially decreasing of forward stretch and significant enhancement of strike-slip component of Cangdong Fault (NNE trending boundary fault of Huanghua Depression). The subsidence center and fault activity center migrate from boundary fault towards the depression center, which reached the Nanpu Sag during Dongying Formation period. This also led to the enhancement of activities of EW trending boundary faults in Nanpu Sag. Therefore, the tectonic double intense effect is the combined action result of both deep dynamic process and shallow structure stress field. Due to the absention of data and limitation of experiences of the researchers, a lot of work about the mechanism of tectonic double intense effect in the aspect of investigation depth and research precision need to be done in future.

This book is crystallization of long term collaboration and team wisdom of a group of young scientists from China University of Geosciences (Wuhan). The introduction and Chapter 1 were written by Hua Wang, Huajun Gan, Si Chen, and Guanhong Wang; Chapter 2 were written by Huajun Gan, Guanhong Wang, and Si Chen; Chapter 3 were written by Jiahao Wang, Hua Wang, Huajun Gan, Zhengliang Lin, and Shunde Miao; Chapter 4 were written by Si Chen, Jun Xiao, Hua Wang, Zhengliang Lin, and Hua Jiang; Chapter 5 were written by Hua Wang, Si Chen, Guanhong Wang, Yuantao Liao; Chapter 6 were written by Hua Wang, Huajun Gan, Guanhong Wang, and Si Chen; references were edited by Hua Wang, Huajun Gan, Guanhong Wang, and all team members; the final revision were edited by Hua Wang, Huajun Gan, Guanhong Wang, and Si Chen.

We thanks chief geologist Yuexia Dong, and colleagues from PetroChina Jidong Oilfield Company for their great help and supporting during the data preparing, edit and press process of this book.

This book is benefited from financial support of China National Natural Science Foundation (Grant No. 41272122) and National Science and Technology oil and gas project “thirteen five-year plan” (2016ZX05006006-002). We are also extremely grateful to Prof. Sitian Li (China University of Geosciences) for his academic advising, Dr. Haimin Zhou (Executive Vice-President of PetroChina exploration and development research institution) for his supporting and long term collaboration, Prof. Zaixing Jiang (China University of Geosciences in Beijing), Prof. Xiaomin Zhu (China University of Petroleum, Beijing), Prof. Yilong Shao (China University of Mining and Technology, Beijing), Dr. Youliang Feng (scientist of PetroChina exploration and development research institution), Prof. Yongchao Lu, Prof. Zongsheng Lu, Prof. Jianye Ren, Prof. Fangzheng Wang, and Prof. Shigong Yang (China University of Geosciences in Wuhan) for their communications and suggestions in sequences stratigraphy. We would like to thank doctoral students (Peigang Ren, Xinxin Fang, Shue Zhao, Xiaolong Liu, Siding Jin, Entao Liu, Yuan Li, Jinfeng Ren) and graduated students (Xueju Lv, Junqing Liu, Jianghao Yu, Miao Wang, Jie Liu, Guiyuan Ren, Yanli Li) from mineral resource prospecting and exploration major of China University of Geosciences (Wuhan) for their hard work and contributions in figures edit and press processes.

Due to the limitation of the knowledge and work experiences of the authors, we must have some de-

fects in the study of tectonic and sedimentary analysis in Nanpu Sag. Comments and suggestions from our readers, which will help improve this study, are more than welcome.

Key words: Nanpu Sag, tectonic movements, sequence stratigraphy, sedimentation, double intense effect, geological significance of oil and gas

目 录

第 1 章 研究思路与方法	(1)
1.1 国内外研究现状	(1)
1.1.1 构造活动与沉积作用的研究现状	(1)
1.1.2 构造活动与油气成藏的研究现状	(2)
1.1.3 南堡凹陷勘探研究现状及存在的问题	(2)
1.2 研究内容及技术路线	(3)
1.2.1 研究内容	(3)
1.2.2 研究方法与技术路线	(4)
第 2 章 南堡凹陷区域地质概况	(6)
2.1 南堡凹陷地理位置	(6)
2.2 南堡凹陷区域构造特征	(7)
2.2.1 渤海湾盆地形成演化的运动学及动力学特征	(7)
2.2.2 南堡凹陷断裂系统及构造单元划分	(9)
2.3 南堡凹陷沉积充填特征	(11)
2.4 南堡凹陷石油地质特征	(13)
第 3 章 南堡凹陷层序地层分析	(15)
3.1 层序界面的识别	(15)
3.2 层位精细标定	(21)
3.3 骨干地震剖面层序地层解释	(29)
3.4 层序地层划分	(39)
3.5 层序构成样式	(43)
第 4 章 南堡凹陷构造活动分析	(46)
4.1 南堡凹陷构造特征及演化分析	(46)
4.1.1 次级构造单元划分	(46)
4.1.2 南堡凹陷主控断裂特征	(50)
4.1.3 南堡凹陷构造地层特征	(59)
4.1.4 南堡凹陷构造演化特征	(65)
4.2 南堡凹陷边界断裂的活动特征	(66)
4.2.1 南堡凹陷边界断裂活动性的垂向演化特征	(67)
4.2.2 南堡凹陷边界断裂活动性的空间特征	(74)
4.3 南堡凹陷基底沉降特征	(80)
4.3.1 南堡凹陷沉降速率的垂向演化特征	(81)
4.3.2 南堡凹陷沉降速率的空间展布特征	(83)
4.4 南堡凹陷伸展特征	(93)

4.4.1	南堡凹陷伸展量的计算方法及测线位置的选择	(94)
4.4.2	南堡凹陷伸展特征分析	(95)
4.5	南堡凹陷与周邻地区东营组堆积期构造活动对比分析	(98)
4.5.1	南堡凹陷与歧口凹陷东营组堆积期构造活动对比分析	(98)
4.5.2	南堡凹陷与周邻坳陷东营组堆积期构造活动对比分析	(102)
4.6	南堡凹陷东营组堆积期构造活动的“双强效应”	(103)
第5章 构造活动的“双强效应”对沉积的控制		(107)
5.1	构造活动的“双强效应”对沉积环境的控制	(107)
5.2	构造活动的“双强效应”对地层厚度及其空间展布的控制	(112)
5.2.1	南堡凹陷古近纪各时期地层厚度及其空间展布特征	(112)
5.2.2	构造活动的“双强效应”对地层厚度的控制	(118)
5.2.3	构造活动的“双强效应”对厚度中心空间展布的控制	(119)
5.3	构造活动的“双强效应”对凹陷补偿性的控制	(122)
5.4	构造活动的“双强效应”对沉积体系类型及其空间展布的控制	(129)
5.4.1	岩芯沉积相分析	(129)
5.4.2	单井高精度层序地层学和沉积相研究	(137)
5.4.3	南堡凹陷东营组沉积体系空间展布特征	(144)
5.4.4	构造活动的“双强效应”对沉积体系类型及其空间展布的控制	(165)
第6章 构造活动的“双强效应”成因机制及油气地质意义探讨		(169)
6.1	构造活动的“双强效应”成因机制探讨	(169)
6.1.1	南堡及黄骅坳陷古近纪沉降中心迁移及应力场分析	(169)
6.1.2	南堡凹陷岩浆活动及区域构造演化背景分析	(172)
6.1.3	南堡凹陷高柳断裂的形成演化分析	(173)
6.1.4	构造活动的“双强效应”成因机制探讨	(176)
6.2	构造活动的“双强效应”油气地质意义探讨	(177)
6.2.1	构造活动的“双强效应”对烃源岩的控制	(177)
6.2.2	构造活动的“双强效应”对储层的控制	(183)
6.2.3	构造活动的“双强效应”对盖层的控制	(184)
参考文献		(186)

第1章 研究思路与方法

1.1 国内外研究现状

1.1.1 构造活动与沉积作用的研究现状

陆相断陷湖盆中,沉积作用受构造作用的控制极为明显,构造活动控制着断陷湖盆的沉积演化,相变快和幕式沉积是断陷湖盆内沉积作用的主要特征(Gawthorpe and Colella,1990;李思田,1992;陈守建等,2007)。构造与沉积相结合的分析一直是沉积盆地分析中的重要方面。James Hall 在 1985 年通过分析阿巴拉契亚山北部大地构造和沉积作用间的控制-响应关系,首次对地槽概念做出定义。地质学家们在沉积作用分析中引入了板块构造理论,引起了地质科学领域的一场深刻的革命,最终在沉积学和板块构造学理论的基础上发展形成了构造沉积学。

随着对构造沉积学研究的深入,构造沉积学逐渐分为宏观的大地构造沉积学和盆地内构造-沉积的控制-响应分析两个方向。其中宏观的大地构造沉积学继承了构造沉积学最初的概念体系,而构造-沉积的控制-响应关系分析的发展趋势是与层序地层学和沉积学相结合。对于第二个研究方向,张翠梅等(2012)对构造-沉积分析的概念和内涵做出了总结,认为构造-沉积分析是在高分辨率 3D 地震资料的基础上动态分析构造活动背景和沉积作用,并探讨二者之间的控制-响应关系。高分辨率 3D 地震资料及其配套的地震处理与解释技术能使广大石油地质工作者更清晰地解释地层结构形态、沉积物输送路径、沉积体系空间展布及动态演化特征,因此高分辨率 3D 地震也被称为地质学的“哈勃望远镜”。构造-沉积分析主要包括 3 个方面:①构造活动的精细解剖;②构造对沉积过程的控制,如构造活动引起沉积物入口变化、沉积物的输送路径或入盆水系的迁移、构造的活动性引起沉积物堆积样式的变化等;③构造与沉积充填的响应关系,如构造演化与沉积相和沉积中心的分布关系,以及构造-沉积模式的建立等。

构造-沉积分析是沉积盆地分析的核心问题之一,这一观点已得到越来越多学者的认可。国内外许多学者也从不同角度、不同尺度对构造与沉积之间的控制-响应关系进行了研究和探讨。王崇孝等(2005)通过对酒泉盆地构造演化与沉积体系的研究认为,酒泉盆地经历了早白垩世伸展断陷期和第三纪(古近纪+新近纪)挤压拗陷期两期构造旋回,这两期构造旋回期不同构造活动特征控制了不同沉积体系类型的发育及其展布特征。董东东等(2008)在解释与搭建珠江口盆地深水区构造地层格架的基础上,将珠江口盆地新生代划分为古近纪裂陷期和新近纪拗陷期两个构造演化阶段,裂陷期强烈的断陷作用和基底沉降下,珠江口盆地发育水下三角洲沉积体系,拗陷期较弱的断陷作用在基底沉降下,发育深水扇和深海沉积序列。王家豪等(2009)通过对伊通地堑永一段大型湖底扇沉积特征的研究,认为该大型湖底扇的发育是对同时期构造反转挤压的响应。Athmer et al. (2011)对 Fenris 地堑内古新世同裂陷期海相沉积分布的控制因素进行分析,认为地形坡度和盆底古地貌控制了海相碎屑沉积的位置、形态及堆积模式。Chen et al. (2012)分析了歧口凹陷古近系层序厚度对幕式构造演化的响应,认为地层厚度中心随构造幕式演化的迁移规律与沉降中心、古地貌负向单元的迁移规律往往具有一致性,并对不同构造演化阶段断裂-沉降-沉积模式进行了探讨。Liu et al. (2014)通过对福山凹陷富砾湖底扇、富砂湖

底扇沉积特征和构造背景的分析,认为缓坡断阶背景、挠曲背景控制形成了不同的地形坡度,进而控制着具有不同沉积特征的湖底扇发育。

总之,陆相断陷湖盆内,构造作用控制着盆地(凹陷)古地貌形态,进而控制着物源通道及砂分散体系和沉积体系空间展布。因此,构造作用与沉积作用结合分析的研究思路,必将长期作为盆地分析的研究热点和发展趋势。

1.1.2 构造活动与油气成藏的研究现状

在陆相断陷盆地中,油气的生成、运移和聚集与构造活动有着密不可分的关系(Li et al., 2007, 2010; Zhu et al., 2013a, 2013b; Xu et al., 2014)。近年来,诸多学者从构造-烃源岩、构造-储层、构造-油气运移、构造-油气聚集和破坏等方面对构造与成藏之间的关系进行了探讨。罗群(2002)提出断裂控烃理论,认为深大断裂及其派生断层对油气具有明显的控制作用。冯有良(2006)研究了渤海湾盆地同沉积构造坡折带对岩性油气富集带的控制作用,认为构造坡折带的样式控制了层序低位域砂岩、砾岩体的展布方向,并控制了优质烃源岩的发育和油气的运聚特征,从而控制了岩性油气藏富集带的分布。Li et al. (2010)对渤海湾盆地东营凹陷南部斜坡带岩性油气藏进行了油源分析,认为东营凹陷深大断裂沟通了深部烃源岩与浅部储层,浅部岩性圈闭不仅接受周围源岩的供烃,而且接受深部烃源岩的供烃。李占东等(2010)研究了海拉尔盆地贝尔凹陷构造演化对油气的控制,认为构造活动控制沉降单元从而控制烃源岩的分布和热演化程度。Zhu et al. (2013a, 2013b)研究了塔里木盆地次生油藏的形成机制,认为后期构造反转和鼻状构造的形成是发育次生油藏的关键。Li et al. (2007)认为断裂的发育和活动是塔里木盆地志留纪油藏运移及聚集的主控地质因素。鉴于国际社会对油气的迫切需求,构造与油气成藏各要素及油气聚集与破坏之间的控制响应关系的研究必将长期成为含油气盆地分析和油气勘探研究中的热点和趋势。

1.1.3 南堡凹陷勘探研究现状及存在的问题

南堡凹陷是位于渤海湾盆地黄骅坳陷东北部的二级负向构造单元,面积约 1932 km²。50 余年的油气勘探实践证实南堡凹陷是一个“小而肥”的富油气凹陷,主力含油气层涉及奥陶系、古近系沙河街组和东营组、新近系馆陶组和明化镇组。截至 2015 年 10 月底,已完钻钻井 600 余口,年产油气能力达 160 × 10⁴ t。南堡凹陷东营组是重要的油气产出层位,油气储量占全区总储量的 35%;沙三段的厚层暗色泥岩是一套重要的高效烃源岩,提供了南堡凹陷约 10% 的油气资源量。随着对东营组勘探的重视及勘探力度的增大,衍生出大量的科研成果和认识,主要可以归纳为以下几点。

(1) 构造方面。南堡凹陷构造方面的研究目前主要集中在 3 个方面:成盆机制(周海民等, 2000; 董月霞等, 2008; 史冠中等, 2011)、断裂系统发育特征及成因机制(许亚军等, 2004; 周天伟等, 2009)、岩浆活动及温压场(韩晋阳等, 2003; 肖军等, 2003); 构造演化(姜华等, 2010; 孙风涛等, 2012)。但以东营组为研究对象,专门针对构造方面的文献比较少,目前尚未有东营组构造方面的系统性、全面性的研究成果刊出。

(2) 沉积方面。袁选俊等(1994)研究了南堡凹陷北部的沉积特征,得出南堡凹陷北部的地层展布和沉积主要受西南庄断裂、柏各庄断裂、高柳断裂等的控制,东营组主要发育近岸水下扇、扇三角洲、半深湖-深湖沉积体系。吕学菊(2009)在此基础上将东营组沉积体系的研究扩展到全凹陷范围,得出南部缓坡带主要发育辫状河三角洲沉积体系,并将沉积体系进一步划分为 9 种亚相。姜华(2009)将层序地层学理论成功运用于南堡凹陷盆地分析中,在此之后的代表性成果包括:姜华等(2009)、王华等(2011)从不同的侧重面,应用构造-层序地层分析的思维,通过构造格架与地层格架的关联分析,对南堡凹陷东营组沉积充填样式与过程、控制要素进行了综合研究;万锦峰等(2013)在等时地层格架下,通过对滩海地区不同级次断层活动史的分析解释东营组沉积砂体在盆地内部的充填特征。

(3) 油气成藏方面。郑红菊等(2007)、刚文哲等(2012)对南堡凹陷烃源岩的地化特征进行了研究,

认为 Ed_3 暗色泥岩为南堡凹陷内的一套有效烃源岩,对该套烃源岩的生烃潜力进行了评价;梅玲等(2008)根据原油生物标志化合物特征对原油特征进行了描述和分类,在此基础上进行了油源对比研究;孙波等(2015)通过对烃源岩进行生烃史模拟,认为 Ed_3 烃源岩大量生烃时间为距今 2Ma;马乾等(2011)、吕延防等(2014)、胡新蕾等(2014)陆续从断裂控藏的角度探讨了扭动构造、中浅层盖-断组合以及油源断裂对南堡凹陷东营组油气成藏的控制。

随着南堡凹陷东营组勘探力度和资源探明程度的不断增高,还存在一系列亟待解决的问题:① Ed_3 烃源岩为南堡凹陷除沙河街组烃源岩外的又一套高效烃源岩,提供约 10% 的油气资源量,然而这套烃源岩在渤海湾盆地大部分地区并不发育。是什么原因导致南堡凹陷发育 Ed_3 优质烃源岩? ② 东营组沉积时期,渤海湾盆地整体进入断拗转换期,盆地内大部分拗陷(凹陷)发育冲积扇-河流沉积体系,或辫状河三角洲-浅湖沉积体系,而南堡凹陷东营组却广泛发育半深湖-深湖相沉积环境,堆积了厚度泥岩和大量的前缘滑塌体,同时北部断控陡坡带裙带状展布大范围的扇三角洲沉积体系和近岸水下扇沉积体系。导致南堡凹陷沉积特征区别于渤海湾盆地大部分拗陷(凹陷)的原因是什么? ③ 随着南堡凹陷东营组油气勘探工作的加深,需要更深入的构造方面的知识作为指导,然而南堡凹陷构造方面的研究却严重滞后,尤其是在构造活动方面,缺少系统性、全面性的认知,这严重制约了南堡凹陷油气勘探的进展。

本次研究便是以南堡凹陷为研究对象,以东营组沉积期为研究时段,从凹陷构造地层特征、边界断裂活动性、基底沉降特征以及凹陷伸展特征等方面进行系统性和全面性的分析,并与沙河街组进行纵向对比,与周邻地区进行横向对比,总结南堡凹陷东营组沉积期构造活动不同于渤海湾盆地其他拗陷(凹陷)的特殊性,进而从沉积环境、地层厚度及其空间展布、凹陷补偿性、沉积体系类型及其空间配置等方面分析这种构造活动的特殊性对沉积的控制,随后对其成因机制进行探讨,最后从烃源岩、储层、盖层及油气成藏规律 4 个方面探讨了这种构造活动的特殊性及其油气地质意义。

1.2 研究内容及技术路线

1.2.1 研究内容

1. 南堡凹陷东营组堆积期构造活动的“双强效应”成因机制探讨

通过钻井岩芯观察,以获取直观而且准确的层序界面识别的资料;井-震结合识别、标定层序、最大海(湖)泛面等关键界面,并利用高精度地震资料全区闭合,建立南堡凹陷高精度层序地层格架;选择研究区典型的剖面,归纳总结,建立不同部位层序发育模式。

2. 南堡凹陷东营组堆积期构造活动的“双强效应”

(1)构造地层分析:利用 3D 地震数据体,在解释和构建南堡凹陷构造-地层格架的基础上,进行构造层划分;重点分析各构造层的边界断裂特征及地层剖面形态特征。

(2)边界断裂活动性研究:均匀选取切过边界断裂的若干条地震剖面,根据层序地层格架标定的等时地层层位开展边界断裂活动速率的计算工作;分析各边界断裂活动性垂向上的演化特征;根据断裂的走向和活动速率分析边界断裂的分段性,对不同沉积时期边界断裂之间及边界断裂各段之间的活动性进行对比分析。在以上分析的基础上,总结边界断裂东营组沉积期的活动规律。

(3)凹陷基底沉降分析:利用 BASIN 模拟系统(BS 回剥系统软件),在对各种参数(去压实、古水深和湖平面变化等参数)进行校正的基础上,动态模拟南堡凹陷的沉降史;通过典型观测点的沉降速率直方图研究东营组沉积期构造沉降量、总沉降量及其沉降速率的垂向演化特征;分析沉降速率平面展布特征,并通过沉降中心与边界断裂间的位置关系,定性判断东营组各沉积时期断陷作用和拗陷作用的