

文章编号:1001-6112(2008)06-0629-07

# 石油运移成藏有利区预测方法研究

——以渤海湾盆地东营凹陷为例

谈彩萍<sup>1</sup>, 江兴歌<sup>1</sup>, 陈拥锋<sup>1</sup>, 关德范<sup>2</sup>, 徐旭辉<sup>2</sup>

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151;

2. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:**通过对渤海湾盆地东营凹陷地质历史上主要石油地质演化阶段的地层孔隙流体压力场研究,以及东营凹陷勘探现状、沉积特征、东营剥蚀期和明化镇剥蚀期剥蚀卸载引起的砂岩回弹量和地层孔隙流体古压力场变化的关联性分析,提出了针对主要由砂岩和泥岩组成的含油气盆地预测石油运移聚集成藏有利区的2种较有效的方法:1)通过地质历史上盆地持续沉降成烃后的盆地整体上升剥蚀阶段的烃源岩区和储集岩区的压力场分化动态分析研究,预测石油运移的有利方向;2)通过地质历史上盆地持续沉降成烃后的盆地整体上升剥蚀阶段的砂岩回弹量的动态分析,同时结合地质历史上该阶段储盖层的配置研究预测石油聚集成藏有利区。

**关键词:**地层孔隙;流体压力;卸载减压;砂岩回弹;石油聚集成藏;东营凹陷;渤海湾盆地

**中图分类号:**TE122.3

**文献标识码:**A

## INVESTIGATION ON PREDICTION METHODS OF FAVORABLE AREA FOR PETROLEUM MIGRATION AND ACCUMULATION

—TAKING THE DONGYING SAG OF BOHAI BAY BASIN AS AN EXAMPLE

Tan Caiping<sup>1</sup>, Jiang Xingge<sup>1</sup>, Chen Yongfeng<sup>1</sup>, Guan Defan<sup>2</sup>, Xu Xuhui<sup>2</sup>

(1. *Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China;* 2. *Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** Integrated researches of formation pore fluid pressure field on main geological evolution stages occurred in the Dongying Sag of the Bohai Bay Basin, its exploration status and sedimentary characteristics, sandstone rebounding amount caused by the erosion unloading during the Dongying phase of the Oligocene and the Minghuazhen phase of the Pliocene and their interaction analysis of formation pore fluid paleo-pressure field, the paper proposes 2 more effective methods of predicting hydrocarbon migration and accumulation for petroliferous basins which are mainly composed of sandstone and mudstone. Two methods are follows as: 1) Predicting favorable direction of petroleum migration based on dynamics research of pressure field differentiated of hydrocarbon rocks & reservoir area at stages of basin uplift denudation after forming hydrocarbon by sustainable subsidence; 2) Predicting favorable zones of hydrocarbon accumulation based on dynamics research of sandstone rebounding amount at stages of basin uplift denudation after forming hydrocarbon by sustainable subsidence, and meanwhile, combining with the distribution of reservoir & cap rocks at the same stage in geological time.

**Key words:** formation pores; fluid pressure; unloading decompression; sandstone rebound; hydrocarbon accumulation; the Dongying Sag; the Bohai Bay Basin

东营凹陷位于济阳坳陷的东南部,东接青坨子凸起,南部地层与鲁西隆起、广饶凸起呈超覆接触,西与惠民凹陷毗邻,北以陈家庄—滨县凸起为界,东西长约90 km,南北宽约65 km,总面积约

5 850 km<sup>2</sup><sup>[1~3]</sup>。在大地构造区划上,东营凹陷属于中国东部渤海湾盆地中的一个次级构造单元(图1),是在古生界基岩古地形背景上经构造运动发育起来的中、新生代断陷—坳陷盆地<sup>[4,5]</sup>。

收稿日期:2008-06-05;修订日期:2008-11-15。

作者简介:谈彩萍(1962—),女,高级工程师,主要从事石油地质研究工作。E-mail:tan cp@mail. wuxisuo. com。

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技部项目(P05038)。

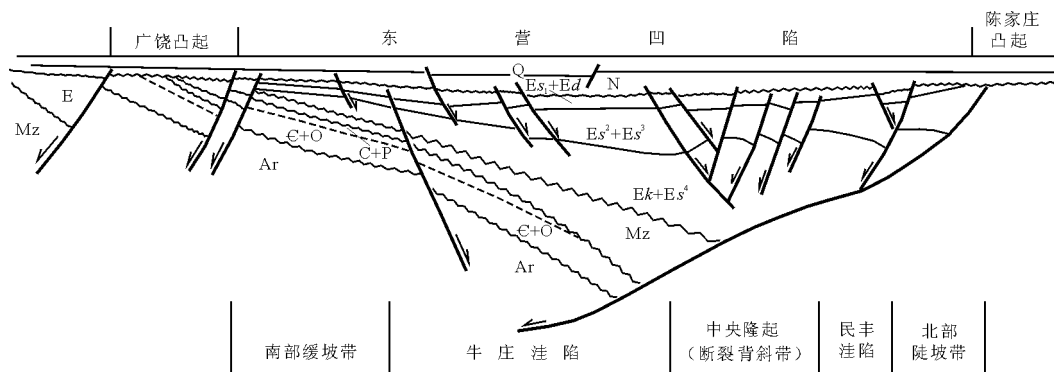


图 1 渤海湾盆地东营凹陷南北向区域地质剖面结构

Fig. 1 Regional geological profile structure of N-S trending in the Dongying Sag of the Bohai Bay Basin

## 1 石油地质演化分析

关德范等<sup>[6]</sup>通过对 97 个成因类型、形态特征等均不同的含油气盆地的物理场性质变化特点的研究,从盆地的加载增压、卸载减压、压力平衡的演化过程分析,将盆地的石油地质演化阶段划分为盆地持续沉降(即成烃过程)、盆地整体上升(即成藏过程)、盆地全面萎缩(即油气藏定型过程)3 个发展阶段,指出了压力场的变化是影响石油运移的基本条件。根据此思路,我们对东营凹陷新生界重新划分了石油地质演化简史(表 1)。孔店组到东营组沉积末为盆地持续沉降加载增压的成烃阶段;东营剥蚀期为盆地整体上升卸载减压诱发石油运移成藏的阶段;馆陶组沉积期至今为盆地全面萎缩压力调整石油成藏定型阶段。

## 2 地层孔隙流体压力计算方法选择

如果盆地内流体互相连通,而底部和边界与外界隔绝,其流体压力适用压实水流模型计算<sup>[7~12]</sup>。东营凹陷内区域盖层沙一段以下均处于相对封闭的压力环境,与本模型接近。因此,选择压实水流量方程计算其地层孔隙流体压力。

剥蚀末压力不仅是上覆地层剥蚀减压对其产生影响,而且剥蚀减压后砂岩回弹增加孔隙体积也使孔隙压力减小,因此必须计算这 2 种作用的共同结果。

上覆地层剥蚀,有效压力降低而引起砂岩回弹,砂岩回弹属于砂岩的弹性特征的体现,因而可以根据砂岩的弹性特征进行计算。

对东营凹陷 100 余口探井的碎屑岩薄片统计

表 1 渤海湾盆地东营凹陷新生界沉积特征与石油地质演化简史

Table 1 Petroleum geology evolution brief history and sedimentary characteristics of Cenozoic in the Dongying Sag of the Bohai Bay Basin

系	统	组	段	代号	厚度/m	地质作用	石油响应	演化特征
第四系	全新统	平原组		Qp	250~350	沉降沉积、小幅上升。压力调整	源岩成熟、排油、运移、成藏定型	全面萎缩
新近系	上新统	明化镇组		Nm	100~1 200			
	中新统	馆陶组		Ng	300~400			
					剥蚀	东营末上升剥蚀卸载、卸载减压、砂岩回弹、砂泥岩间形成压力差	泥岩排油、运移、聚集成藏	整体上升
古近系	渐新统	东营组		Ed	100~800	沉降沉积、沉积加载、加载增压、深埋加热	加热成油(在限定空间)	持续沉降
			沙河街组	沙一段	Es <sup>1</sup>			
		沙二段		Es <sup>2</sup>	0~350			
		沙三段		Es <sup>3</sup>	700~1200			
	始新统	孔店组	孔一段	Ek <sup>1</sup>				
			孔二段	Ek <sup>2</sup>				

分析,分断阶、深凹、斜坡进行了碎屑岩颗粒接触关系与埋藏深度的研究(图 2),结果表明断阶带、深凹带和斜坡带碎屑岩颗粒接触关系达到线接触级以上的深度分别为 2 600,3 050,3 000 m。岩石弹性力学原理表明沉积碎屑岩的沉积颗粒间的接触关系达到线接触级以上时,颗粒已永久变形,不再属于弹性阶段,因此,此阶段的砂岩减压后基本不再回弹,砂岩回弹计算底界深度参考此数值。

### 3 上升阶段的古压力场特征

东营凹陷上升阶段的压力场变化主要与东营末、明化镇末两期上升阶段的地层剥蚀卸载、砂岩

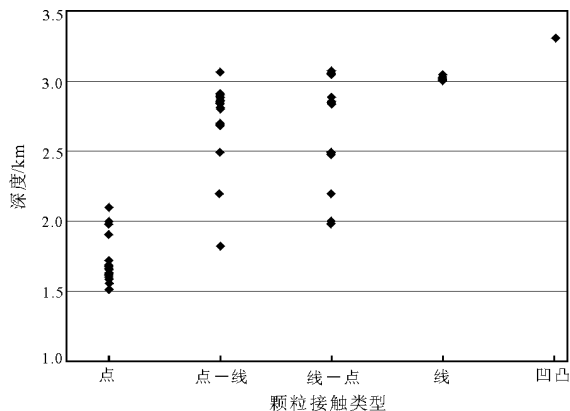


图 2 渤海湾盆地东营凹陷斜坡带碎屑岩颗粒接触关系与埋藏深度的关系

Fig. 2 The relationship between buried depth and particle contact of clastic rocks in slope zone of the Dongying Sag of the Bohai Bay Basin

回弹有关。

#### 3.1 东营末、明化镇末剥蚀减压砂岩回弹分析

东营期剥蚀减压引起下伏东营组到沙四上亚段地层内砂岩回弹,砂岩回弹量图(图 3)反映,总体上凹陷边缘回弹量大于凹陷中部。较大的回弹量在 10~30 m 左右,如郑家、单寺、胜坨等地区;一般在 3~8 m 之间,如东辛、南斜坡、永安、博兴等地区。

明化镇期剥蚀减压引起下伏明化镇组到沙四上亚段地层内砂岩回弹,砂岩回弹量总体上凹陷内较均匀,相对高值区较分散,较大的回弹量在 3.5~6 m 左右,且主要分布在纯化—利津一线以东地区,如中央隆起、南斜坡、永安、胜坨等地区;除了凹陷南斜坡周边地层分布较少的地区以外,一般在 2~3 m 之间。

东营末抬升剥蚀减压产生的回弹量约为明化镇末抬升回弹量的近 5~20 倍。这不仅是东营末抬升剥蚀的总量大于明化镇末抬升剥蚀的总量造成的,也是东营末抬升时东营组、沙河街组的埋深比明化镇末抬升时的埋深浅造成的。回弹体积增加量与砂岩体积和上覆地层剥蚀厚度呈正相关,与回弹前埋藏深度呈负相关。在砂体发育较厚,抬升前埋深较浅并且上覆地层剥蚀厚度较大的地方其回弹量较大,如凹陷南部及北部边缘砂体发育区,反之则小,如凹陷中部地区。

#### 3.2 东营期、明化镇期剥蚀前后的古压力场分析

利用压实水流模型和砂岩回弹综合计算的东营凹陷  $E_d$ ,  $E_s^1$ ,  $E_s^2$ ,  $E_s^{3(上)}$ ,  $E_s^{3(中)}$ ,  $E_s^{3(下)}$ ,  $E_s^{4(上)}$

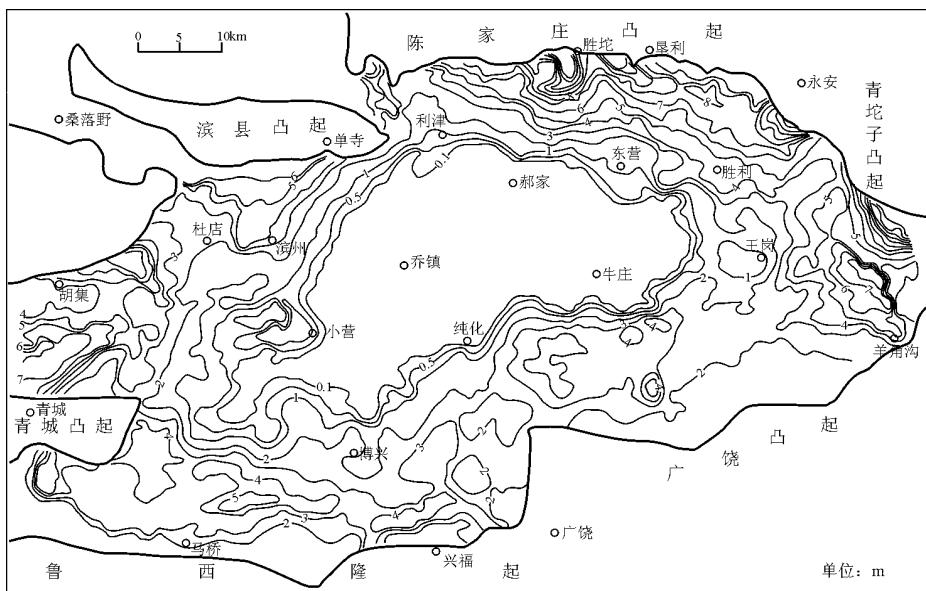


图 3 渤海湾盆地东营凹陷东营剥蚀期砂岩回弹量

Fig. 3 The sandstone rebounding amount during the Dongying denudation phase of the Oligocene in the Dongying Sag of the Bohai Bay Basin

东营期剥蚀前后的古压力场,反映出高值区主要分布在烃源岩或泥岩相对较发育的洼陷区,低值区主要分布在凹陷边缘及中央隆起区,但剥蚀后的压力高值区与压力低值区间的压力差较剥蚀前的有较大提高。这是由于凹陷周缘区的剥蚀减压量较大,洼陷区剥蚀时间短、接受沉积早、继续增压而形成的,如利津洼陷的东北胜坨地区减压量较大,利津洼陷区为增压,两区间的压力差在剥蚀后较剥蚀前明显增大(图4)。

由于明化镇组剥蚀是整体均匀的,全区剥蚀量是一致的,因此,东营凹陷明化镇期剥蚀前后的压力场反映出各层压力高值区与低值区的分布与东营剥蚀后的基本一致,高值区仍然主要分布在烃源岩或泥岩相对较发育的洼陷区,低值区主要分布在凹陷边缘及中央隆起区<sup>[13~16]</sup>。如博兴洼陷的西北区及东南区(图5)、中央隆起区的砂岩分布发育区、牛庄洼陷的东南区。

上述压力变化较大的储集岩发育区剥蚀后的压力均为变小,成为低压区。压力变化较小的烃源岩发育区为高压区,且东营剥蚀期的压力变化大于明化镇剥蚀期的压力变化。

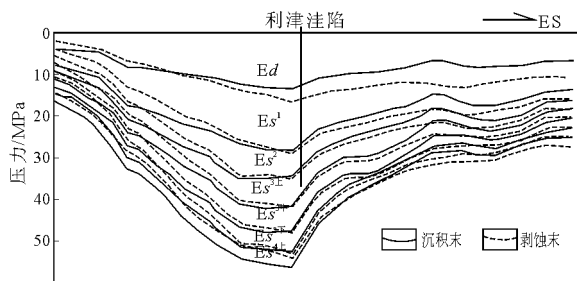


图4 渤海湾盆地东营凹陷东营剥蚀前后过利津洼陷西北—东南向古压力剖面

Fig. 4 Paleo-pressure profile of NW-SE trending by the Lijin subsag during pre-/post-denudation of the Dongying phase in the Dongying Sag of the Bohai Bay Basin

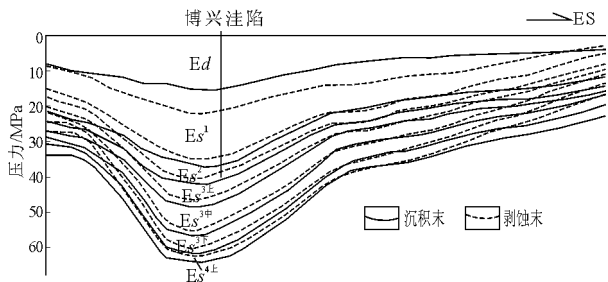


图5 渤海湾盆地东营凹陷明化镇沉积末与剥蚀末过博兴洼陷西北—东南向古压力剖面

Fig. 5 Paleo-pressure profile by the Boxing subsag during end stage of sedimentary and denudation of Minghuazhen Formation in the Dongying Sag of the Bohai Bay Basin

## 4 成藏过程综合分析

### 4.1 砂岩孔隙度变化与成藏

砂质碎屑物沉积下来时,一般具有40%以上的原生孔隙,随着埋深加大,上覆压力增高,原生孔隙被逐渐压缩<sup>[17]</sup>,东营凹陷内的砂岩埋深大于2 100 m后,随着埋深的继续增加,砂岩内的颗粒逐渐进入永久变形阶段,上覆岩层剥蚀减压后其颗粒不再回弹,使其孔隙空间接近正常压实值。东营凹陷内的砂岩平均孔隙度和标准中砂岩的平均孔隙度与深度关系曲线比较,在原生孔隙为主的阶段,东营凹陷的砂岩孔隙度大于标准中砂岩的平均孔隙度。如埋深2 000 m时东营凹陷的砂岩孔隙度约为26%,标准中砂岩的孔隙度为19%,即在埋深2 000 m时,东营凹陷的砂岩孔隙度比标准中砂岩的孔隙度大7%(图6)。用东营凹陷的砂岩实测的砂岩回弹图版,计算的胜坨地区埋深约在1 700~2 200 m的沙二段的东营剥蚀阶段卸载所产生的砂岩回弹增加的孔隙度约为4%~6%,明化镇剥蚀期卸载所产生的砂岩回弹也增加了少量孔隙度。这说明东营凹陷相应深度的砂岩孔隙度大于正常标准砂岩的孔隙度,其原因主要为砂岩回弹作用。砂岩回弹增加的孔隙度不仅使地层孔隙流体压力降低,为石油运移提供动力,而且为石油聚集成藏提供了有利的储集空间。

### 4.2 低压区和高压区分布与成藏

东营剥蚀期剥蚀减压形成的储集岩低压区与烃源岩高压区间的压力差大于明化镇剥蚀期形成的。因此,东营剥蚀期形成的储集岩低压区与烃源岩高压区间的压力差为油的运移提供了主要动力,它诱发启动了烃源岩内的原油向盆地边缘高部位运移,剥蚀减压砂岩回弹造成砂岩发育区的局部压

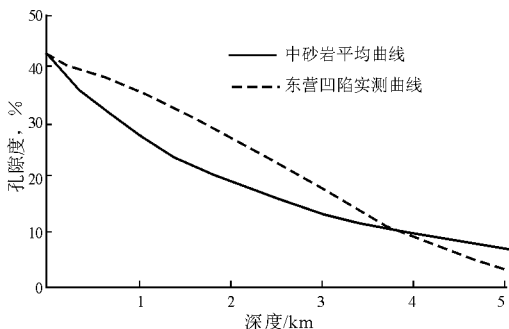


图6 标准中砂岩与渤海湾盆地东营凹陷砂岩孔—深曲线对比

Fig. 6 Correlation of porosity—depth curve between standard sandstone and the sandstone of the Dongying Sag of the Bohai Bay Basin

力相对负异常,抽吸石油汇聚成藏,且砂岩回弹增加的孔隙空间为油的储集提供空间,如郑家、单寺、胜坨等地区。

馆陶—明化镇沉积期是全凹陷比较均匀的一个沉积过程,其压力场特征继承了东营剥蚀期的特征,这个时期烃源岩上覆地层增加了近1 000~1 200 m,烃源岩上覆地层的增加使烃源岩进一步受到压实而大量向东营剥蚀期形成的储集岩低压区运移聚集成藏。

明化镇组剥蚀减压引起的砂岩回弹量分布较均匀,除了凹陷南斜坡周边地层分布较少的地区以外,一般在2~3 m之间,相对较大的回弹量主要分布在纯化—利津一线以东地区,如中央隆起、南斜坡、永安、胜坨等地区。因此,第四系沉积对烃源岩压实排出的油向盆地各部位运移,并于明化镇剥蚀砂岩回弹造成的局部压力相对负异常区聚集成藏,如纯化—利津一线以东地区,且早期油藏继续充注。

#### 4.3 石油运移方向

根据压力差控制石油运移模型计算的东营凹陷沙二段石油运移路径图(图7),反映出沙二段已探明的油区基本都分布在运移路径汇聚区内,且利津洼陷排出的油主要往滨南地区、东营北带地区、

东营中央隆起区及东营南斜坡的西段地区运移成藏;牛庄洼陷排出的油主要往东营中央隆起区、东营南斜坡东段地区及永安地区运移成藏;博兴洼陷排出的油主要往其周缘地区就近运移成藏;民丰洼陷排出的油主要往东营北带中东段及永安地区运移成藏。明化镇组剥蚀前后的压力主要变化区分布在砂岩较发育的凹陷周缘区,如博兴洼陷的西北区及东南区,中央隆起区的砂岩分布发育区,牛庄洼陷的西北区,这次压力变化进一步促进了第四纪平原组沉积使烃源岩压实排出的油向其压力变小地区运移聚集成藏。

## 5 石油聚集成藏有利方向预测

### 5.1 砂岩回弹量、剥蚀前后压力与勘探成果关系分析

沙二段东营和明化镇2个剥蚀期引起的砂岩回弹量与沙二段实际勘探油藏叠合图(图8)表明,油田分布与东营剥蚀引起的砂岩回弹量关系较好,大油田基本都分布在东营剥蚀引起的砂岩回弹量较大的地区,如沙二段的已探明石油储量亿吨级以上的胜坨、东辛和千吨级以上的永安油田、利津油田等油藏。

沙二段东营剥蚀期的古压力与沙二段实际勘探油藏叠合图(图9)表明,大油田基本都分布在东

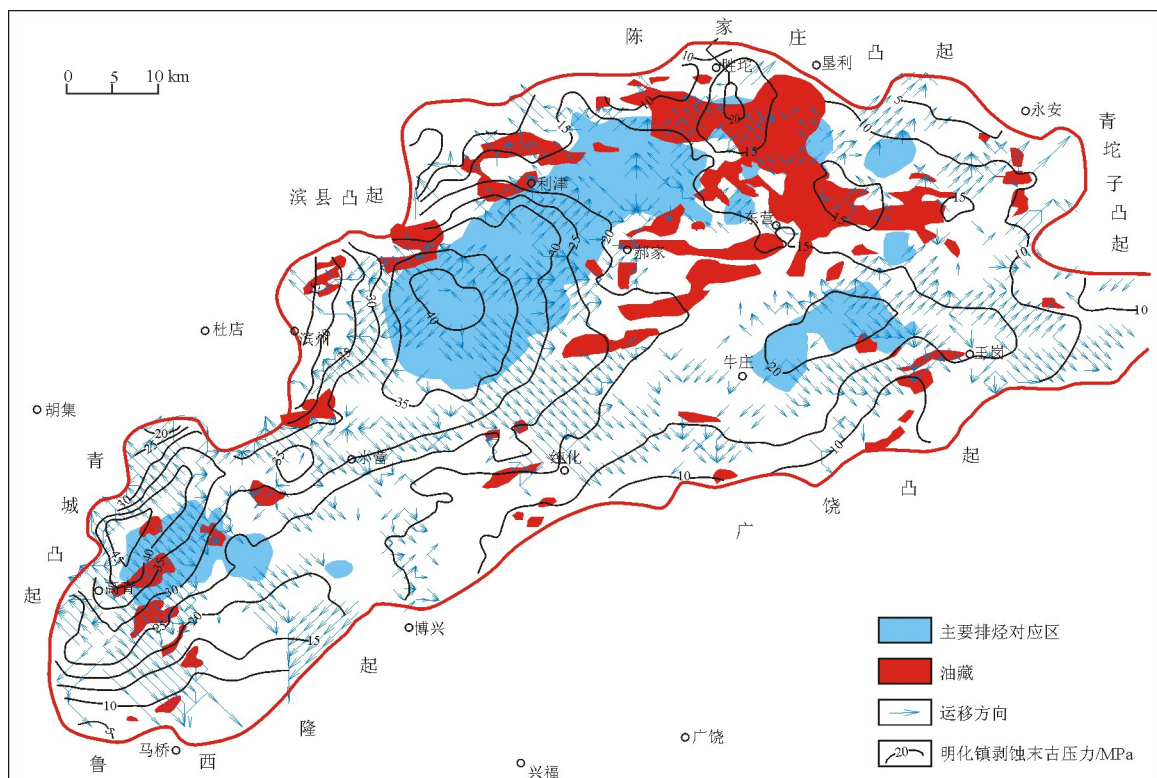


图7 渤海湾盆地东营凹陷沙二段油气运移路径

Fig. 7 Petroleum Migration pathway of the Second Member of Shahejie Formation in Dongying Sag of the Bohai Bay Basin

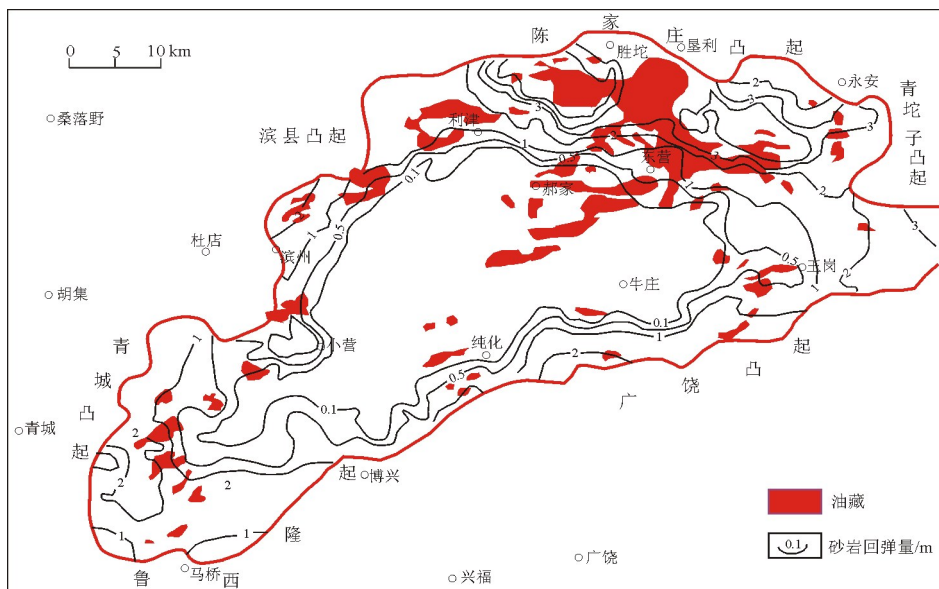


图8 渤海湾盆地东营凹陷东营剥蚀期砂岩回弹量及油藏分布

Fig. 8 The reservoirs distribution and sandstone rebounding amount during the Dongying denudation phase in the Dongying Sag of the Bohai Bay Basin

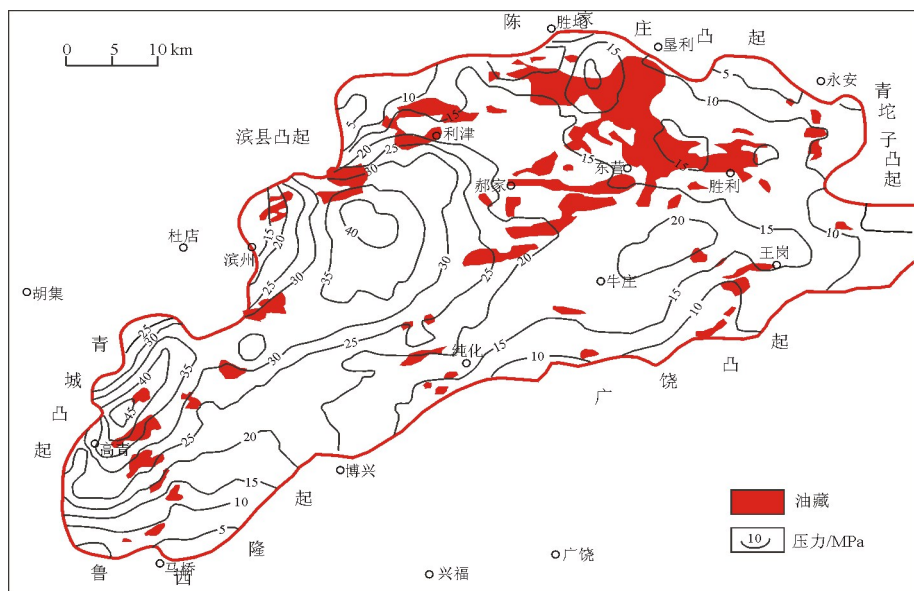


图9 渤海湾盆地东营凹陷东营组剥蚀末沙二段古压力及油藏分布

Fig. 9 The reservoir distribution and paleo-pressure of the Second Member of Shahejie Formation during end of the Dongying denudation phase in the Dongying Sag of the Bohai Bay Basin

营和明化镇剥蚀前后古压力差相对较大的地区(表2),如沙二段的已探明石油储量亿吨级以上的胜坨(图10)、东辛等油藏,千吨级以上的永安油田、现河庄和利津油田。说明只要剥蚀期前后压力差大的地层、上覆具有有效盖层并形成有利圈闭区,就是有利的石油成藏区,如经多期剥蚀且多期压力差高值叠合区为最佳有利区。

### 5.2 勘探有利方向预测

根据上述东营凹陷勘探现状及沉积特征、东营

剥蚀期和明化镇剥蚀期剥蚀卸载引起的砂岩回弹量及古压力差的关联性分析后认为:1)东营凹陷东营期剥蚀后的古压力场低压区为石油运移的有利方向;2)东营凹陷东营、明化镇剥蚀阶段的砂岩回弹高值区,且该区同时具有合适的盖层就是石油聚集成藏的有利区。

## 6 结论

1)盆地持续沉降成烃后的整体上升剥蚀阶段

表 2 渤海湾盆地东营凹陷沙二段砂岩回弹及剥蚀前后压力差与勘探现状关系

Table 2 The relationship between exploration status and sandstone rebounding amount of the Second Member of Shahejie Formation, paleo-pressure difference during pre/post-denudation in the Dongying Sag of the Bohai Bay Basin

油田级别	油田	剥蚀期	砂岩回弹量/m	剥蚀前后压力差/MPa
亿吨级	胜坨	东营	2~6	4~9
		明化镇	0.1~0.4	2~3
	东辛	东营	0.5~2	2~5
		明化镇	0.2~0.3	1.8~2.3
千万吨级	现河庄	东营	0.1	
		明化镇	0.1	2.4~2.7
	永安	东营	1 左右	6~7
		明化镇	0.4 左右	1.6 左右
	利津	东营	0.5~1.0	1~4
		明化镇	0.1 左右	2.2~3.0

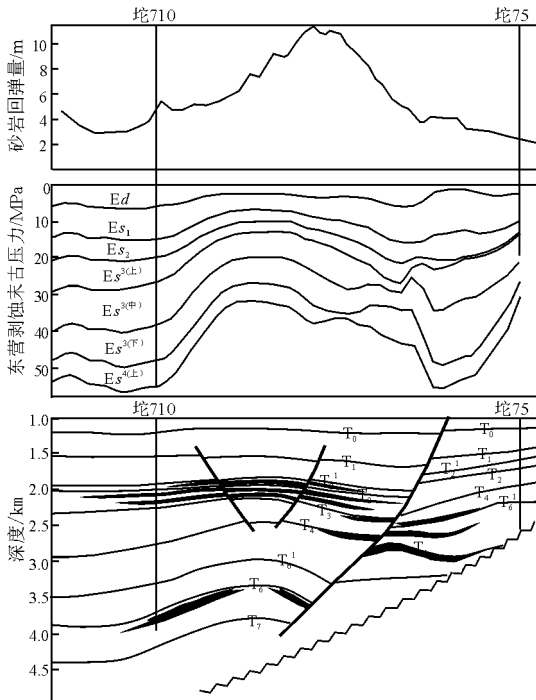


图 10 渤海湾盆地东营剥蚀期后砂岩回弹—古压力差和油藏关系

Fig. 10 The relationship of sandstone rebound, paleo-pressure and reservoir distribution during post-denudation of the Dongying phase in the Dongying Sag of the Bohai Bay Basin

古压力场的相对持续减压的低压力区或负压区为石油运移的有利方向。

2)地质历史上盆地持续沉降成烃后的整体上升剥蚀阶段的砂岩回弹高值区,且该区同时具有合适的盖层就是石油聚集成藏的有利区。

致谢:本次研究过程中,得到了胜利油田多位领导和专家的大力支持及帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- 曾溅辉,郑和荣. 东营凹陷岩性油气藏成藏动力学特征[J]. 石油与天然气地质,1998,19(4): 326~329
- 曾溅辉,张善文. 东营凹陷岩性圈闭油气充満度及其主控因素[J]. 石油与天然气地质,2003,24(3):219~222
- 朱桂林. 渤海湾盆地东营凹陷第三纪同沉积构造控油作用[J]. 石油实验地质,2007,29(6):545~548
- 李丕龙,蒋有录. 东营凹陷中央背斜带油气运移聚集特征[J]. 石油勘探与开发,2000,27(4): 64~66
- 马丽娟,郑和荣. 渤海湾盆地东营凹陷中央隆起带构造特征[J]. 石油实验地质,2006,28(2):103~108
- 关德范,王国力,张金功等. 成盆成烃成藏理论思维[M]. 北京:石油工业出版社,2004. 1~152
- 郑和荣,黄永玲. 东营凹陷下第三系地层异常高压体系及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发,2000,27(4):67~70
- 何新贞. 东营凹陷压力系统特征分析[J]. 油气地质与采收率,2002,9(4):21~23
- 周立宏,刘国芳. 利用泥岩声波时差估算地层压力[J]. 石油实验地质,1996,18(2):195~199
- 刘晓峰,解习农. 东营凹陷流体压力系统研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2003,28(1):78~85
- 肖焕钦,刘震,赵阳等. 济阳拗陷地温—地压场特征及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发,2003,30(3):68~70
- Nakayama Kazuo, Van Sien D C. Simulation model for petroleum exploration [J]. AAPG Bulletin, 1981, 65: 1230~1255
- 刘华,蒋有录. 东营凹陷中央隆起带油—源特征分析[J]. 石油与天然气地质,2004,25(1): 39~43
- 袁彩萍,徐思煌,贾霍甫等. 渤海湾盆地东营凹陷孔店组烃源岩特征研究[J]. 石油实验地质,2006,28(2):177~181
- 邱桂强,凌云. 东营凹陷古近系烃源岩超压特征及分布规律[J]. 石油勘探与开发,2003,30(3):71~75
- 刘庆,张林晔,沈忠民等. 东营凹陷湖相盆地类型演化与烃源岩发育[J]. 石油学报,2004,25(4):42~45
- 陈永峤,于兴河,周新桂等. 东营凹陷各构造区带下第三系成岩演化与次生孔隙发育规律研究[J]. 天然气地球科学,2004,15(1):68~74

(编辑 李凤丽 徐文明)