

# 东营凹陷新生代早期断裂系统的运动学特征及动力学机制

赵利<sup>1</sup>, 李理<sup>1</sup>, 张航<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国地质大学能源学院, 北京 100083)

**摘要:**通过对盆地地震剖面的解释,构造演化剖面的编制,断层运动学三维解析以及前人对地热场、地球物理场研究的研究,对东营凹陷新生代早期断裂的运动学特征和动力学机制进行研究。结果表明:在新生代早期,东营凹陷在伸展过程中发育有走滑-正断层和走滑断层,其中走滑-正断层在剖面上为马尾状断层组合;东营凹陷新生代早期东西向伸展量小、南北向伸展量大,在主要伸展期 Ek-E<sub>4</sub> 伸展了 15.1 km,而断层走滑量分析表明 NW、NE 向正断层在走滑量分别为 14.8 km 和 10.3 km;东营凹陷新生代早期的伸展为窄裂陷模式,表现为强烈断陷;凹陷内 NW、NE 向断层对南北向伸展起侧断调节的作用,而凹陷周边发育的展向断层由调节块体向南逃逸时的伸展差异产生。

**关键词:**动力学机制;运动学特征;新生代早期;东营凹陷

中图分类号:P 542

文献标志码:A

## Fault system's kinematic characteristics and dynamic mechanism during early Cenozoic in Dongying sag

ZHAO Li<sup>1</sup>, LI Li<sup>1</sup>, ZHANG Hang<sup>2</sup>

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. School of Energy Resources in China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on interpretation of seismic profiles, compilation of tectonic evolution sections, 3-D analysis of fault kinematics, and combining the former study on geothermal field and geophysical field, the fault system's kinematic characteristics in Dongying sag and their dynamic mechanism during early Cenozoic were discussed. The results show that strike-slip faults and strike-slip normal faults are the major fault types developed in Dongying sag in early Cenozoic. The former are typically "horsetail" shaped, and are usually accompanied with secondary faults in vertical sections. Besides, Dongying sag extended mainly in the south-north direction as opposed to the east-west direction, and accumulated 15.1 km during Ek-E<sub>4</sub>. In addition, the strike-slip displacements of the NW and NE trending faults are 14.8 km and 10.3 km, respectively, estimated from their associated displacement vectors. The sag extended by narrow rift mode in early Cenozoic, and later became extensive subsidence stage. The NW and NE trending faults in the sag worked as the lateral ramp for the N-S extension, and the transfer faults in south of the sag were produced by the horizontal differential extension when the blocks moved to the south.

**Key words:** dynamic mechanism; kinematic characteristics; early Cenozoic; Dongying sag

东营凹陷沙四段、孔店组属于地质历史时期的古新世—早始新世,这一时期是中国东部构造变换的转折时期,也是凹陷内断裂活动的活跃期<sup>[1-4]</sup>。加强对新生代早期断裂演化规律的研究,对深层储层分布、圈闭类型、油气聚集成藏的勘探具有非常重要的实际意义<sup>[5]</sup>。东营凹陷该时期受郯庐断裂影响

显著,发育形成走滑相关盆地,其内弧形断层在伸展过程中使得断陷区侧翼断层具有一定走滑特性<sup>[6]</sup>。此外,作为中新世叠盆地,当先存断层走向与后期主伸展方向不垂直时,断层也会发生斜滑而产生走滑分量。但是,前人对东营凹陷内断裂活动的研究侧重于盆地的各时期伸展率和各主要断层的垂向

活动速率<sup>[1,3,4]</sup>,未对盆地内断层性质和发育演化过程全面研究,不能有效地分析凹陷内沉积对构造的响应。因此,笔者依据晚中生代构造背景对新生代早期断裂的运动学特征进行更全面的量化研究,从而探讨盆地形成的动力学机制。

## 1 地质概况

作为渤海湾盆地的亚一级构造单元,东营凹陷是在中、新生代裂谷背景下发育形成的一个箕状断陷湖盆<sup>[1,4]</sup>。凹陷北断南超,由北向南依次划分成北部陡坡带、洼陷带、中央隆起带、洼陷带和南部缓坡带五带四区,分别由民丰、利津、牛庄、博兴洼陷和多个二级构造带组成<sup>[6]</sup>(图1)。晚中生代以来,在区域伸展的过程中,盆地内正断层十分发育;同时,由于凹陷紧邻郯庐断裂带,受其影响断层往往具有一定的走滑性质。

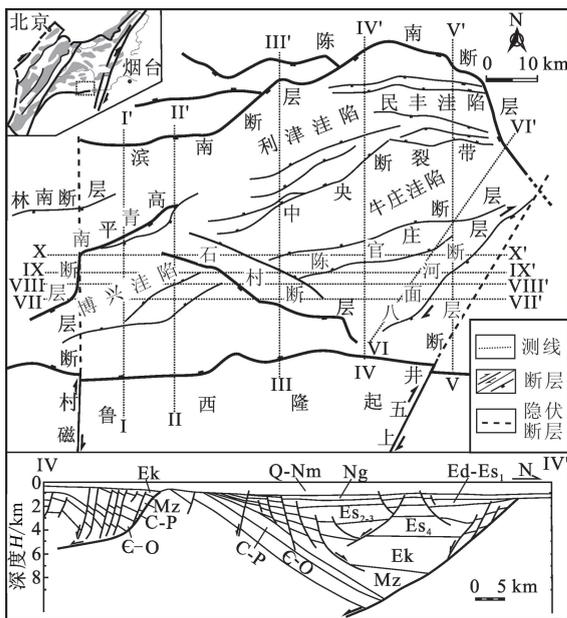


图1 东营凹陷新生代早期活动的断裂分布

Fig.1 Active fault system distribution during early Cenozoic in Dongying sag

## 2 断层几何学特征

前人对东营凹陷内发育的断层做过非常详尽的总结<sup>[2,4,7-8]</sup>:一级断层有陈南断层、滨南断层、石村断层、高青-平南断层,二级断层主要包括通古-草桥断层、博兴断层、中央断层、胜永断层等(图1);这些断层平面上按走向可以划分为近EW、NW和NE向三组,组合形式有锯齿状、雁列式、斜交式、平行式、枝杈式等;剖面上断层形态从板式、铲式到坡坪式均有发育,组合形式有“Y”字型、马尾状、阶梯状、

负花状等。其中,雁列式组合、负花状构造是典型的走滑成因构造,而平面上斜交、剖面呈马尾状的组合通常也具有走滑成因机制<sup>[8]</sup>。

对于具有走滑性质的断层,东营凹陷发育有走滑-正断层和走滑断层。走滑-正断层多是NW或NE走向的断层,平面上以雁列式、网格或斜交式组合,而剖面上这些断层以阶梯状、马尾状进行组合。其中,剖面上的马尾状断层组合具有两种成因机制——伸展和走滑-伸展(图2)。伸展型马尾状断层组合对应在平面上断层的组合形式为平行式,而走滑-伸展型则对应斜交式。东营凹陷内的马尾状断层组合属于走滑-伸展型,如高青平南断层东段、陈南断层东段等。走滑断层中,八面河断层最为显著。平面上,断层上部沉积盖层上发育一系列雁列式张剪断层,与主断层呈锐夹角相交;在剖面上,断裂带张剪,形成负花状构造(图2,剖面位置见图1)。

东营凹陷属于中新世叠加盆地。其内断裂构造经过印支期SN向挤压,燕山期NE向伸展和喜山期NW向伸展这3期演化,最终形成现今观察到的近EW、NW和NE向3组断层。但是,根据前人研究表明,各期构造运动都存在使盆地形成这三组断层的可能:印支期,东营凹陷内断层按“弓箭法则”呈弧状向北逆冲<sup>[9]</sup>;燕山期和喜山期,凹陷受郯庐断裂影响显著,在伸展走滑应力场下同样可以产生这三组断层<sup>[2,4,7-8]</sup>。因此,建立一个一条断层控制盆地发育的简易刚体模型,就可以将东营凹陷内所有断层归纳为一条NE-EW-NW走向的弧状断层进行研究。

## 3 运动学特征

### 3.1 断层垂向活动特征

在遵循沉积补偿的原则下,不考虑地层沉积压实作用,用断层两盘同一时期地层厚度差(即断层落差)来表示由断层引起的构造沉降,然后将厚度差比该地层沉积所用时间得到断层垂向活动速率<sup>[1]</sup>。选取II-II'、III-III'、V-V'这3条南北向剖面(位置见图1),分别计算了剖面中3条主断层的垂向活动速率(图3)。由于这些剖面中生代地层难以进一步细分,因此把中生代地层作为整体进行分析。

从图3中可以看出:中生代断层垂向活动速率普遍偏低,这是由于中生代断层发生过构造反转且历时长造成的<sup>[1,4,7-9]</sup>;断层垂向活动速率有Ek<sub>2</sub>和

Es<sub>4-2</sub>两个高峰期,前者继承晚中生代断层活动规律,发生强烈断陷;后者属于构造变格后断层活动高峰

期;石村断层垂向活动速率偏低。

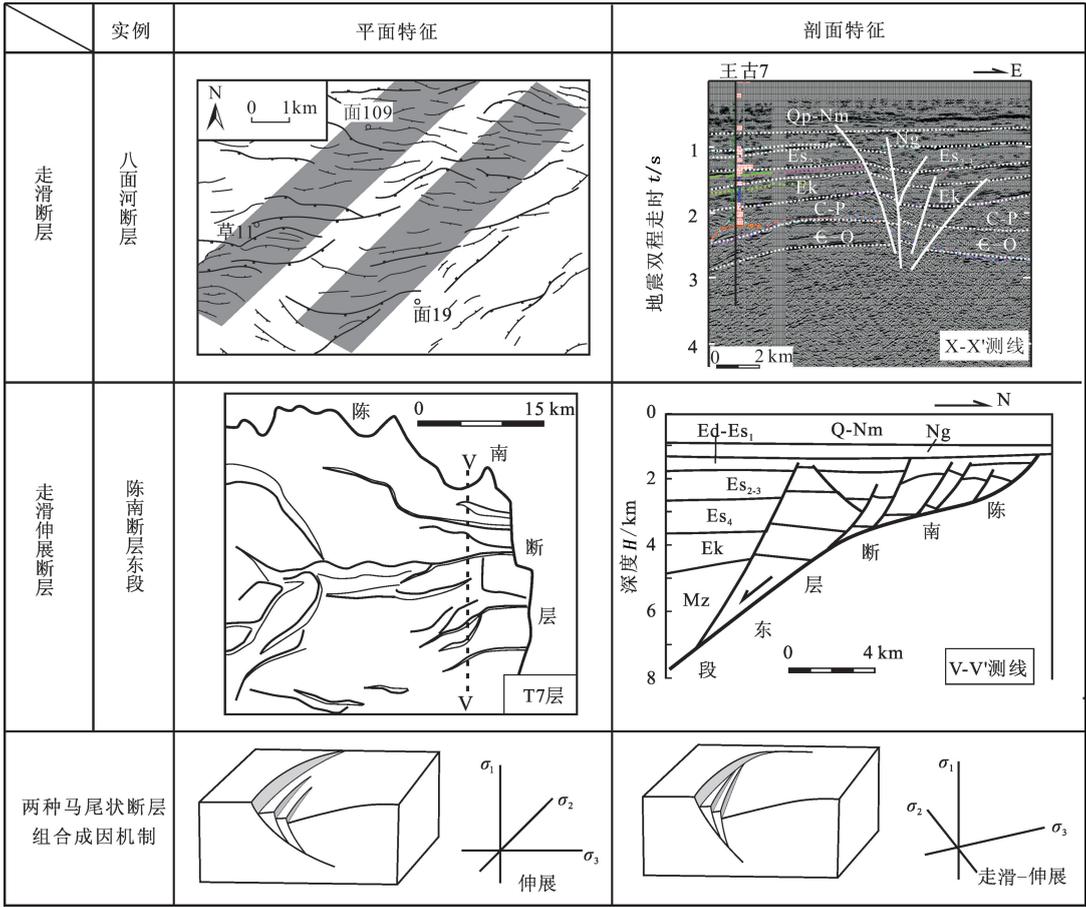


图2 东营凹陷内具走滑性质断层特征

Fig. 2 Strike-slip normal faults' characteristics in Dongying sag

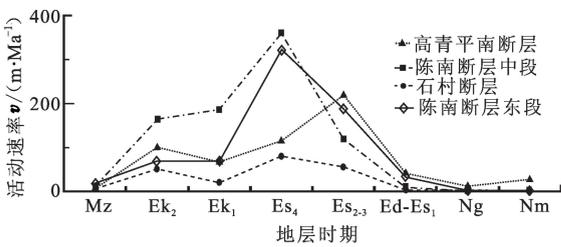


图3 东营凹陷内主要断层的垂向活动速率

Fig. 3 Main faults' vertical activity statistics in Dongying sag

### 3.2 断层平面伸展特征

断层的平面伸展特征反映于盆地的伸展上。平衡剖面法是研究盆地平面伸展特征的一种重要手段,其遵循的基本原则是岩层层长在埋藏、压实或变形过程中守恒。通过逐层回剥可以将现今地质剖面恢复到某个时期的地质剖面,以便了解各时期盆地的伸展率及其内断层的倾向伸展特征及其演化。

进入新生代,东营凹陷北断南超,北部边界断层形成弧形,在空间形态上形成“簸箕状”,凹陷的伸

展量累积图可以很好地反映这一活动规律。因此,将其中9条剖面分成SN、EW向两类,从平面上分析盆地整体运动模式。从图4伸展量累积折线图中可以看出,盆地伸展以南北向为主,东西向伸展为辅,且伸展活动主要发生在Ek-Es<sub>4</sub>时期;凹陷内中央部位南北向伸展量大,东西两侧伸展量变小,伸展量累积图形似“倒扣的簸箕”。

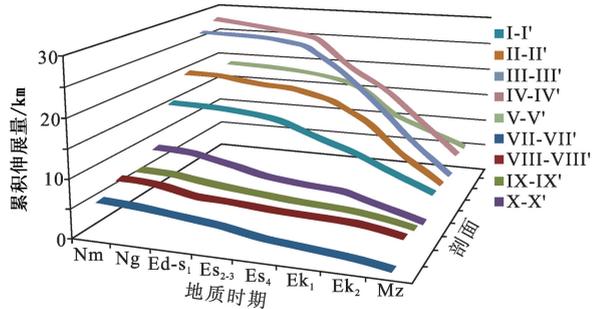


图4 东营凹陷内9条剖面伸展量累积图

Fig. 4 Nine sections' cumulative extension amount in Dongying sag

与逆冲断层的“弓箭法则”类似,伸展背景下盆地形成的这种“倒扣的簸箕”现象可能有以下几种成因<sup>[10-11]</sup>:

(1) NW、NE 向断层的侧断走滑使得平衡剖面得到的伸展量减少。东营凹陷在南北向伸展过程中, NW、NE 向断层与主伸展方向斜交,使得这些断层具有一定的走滑性质(图2)。由于平衡剖面法计算的凹陷伸展量并不能够体现这种走滑现象,故而导致凹陷南北向伸展量从中心向两侧减小。

(2) 在盆地的构造和沉积演化过程中,地层的塑性变形可以吸收部分盆地的伸展量。这里的塑性变形包括断层发育过程中产生的相关褶皱和地层在沉积时造成的压实变形。前者使盆地东西两侧多发育不对称褶皱,后者造成地层减薄和泥岩与膏盐的塑性变形,从而吸收部分盆地的伸展量,且对层长守

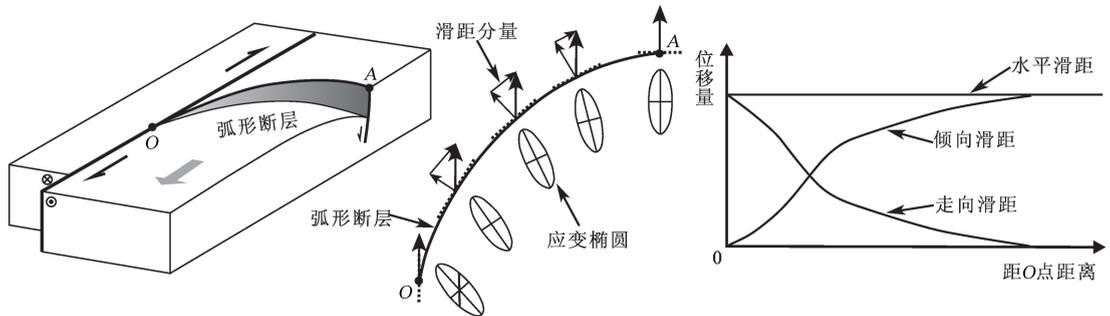


图5 弧形断层的倾向滑距和走向滑距之间的关系<sup>[13]</sup>

Fig. 5 Relationship between dip slip and strike slip on arcuate fault

由于调节带的存在,对于单条断层,特别是生长正断层,断层滑距沿走向的变化不会严格按照图5中所示。这是由次级断层的调节、地层的塑性变形等造成的。但是,可以提高观察尺度将滑距矢量不变原则应用到盆地规模上,从而降低误差,尤其是变换带对主断层的影响。简化并设定:以东营凹陷南北向剖面上的伸展量作为控盆边界断层的伸展量——把 I-I' 剖面获得的盆地伸展量当做高青平南断层、滨南断层这两条 NE 走向边界断层的伸展量,把 IV-IV' 剖面的盆地伸展量作为陈南断层这条 EW 走向边界断层的伸展量,把 VI-VI' 剖面的盆地伸展量作为陈南断层东段这条 NW 走向边界断层的伸展量。这样,在同一应力场下,盆地边界断层某一时期各位置处的伸展量和走滑量的矢量和不变。

### 3.4 断层的走滑特征

根据上述分析,边界断层某一时期的走滑量计算需要首先获得多个剖面上该时期的伸展量。为了避免较大误差,在选取剖面时应遵循以下原则:①剖面尽量垂直断层走向或构造走向方向;②不同走向的断

恒原理下的地层回剥产生误差。

### 3.3 断层性质与滑距的关系

一般情况下,正、逆断层除了具有倾向滑距和铅直滑距外还具有一定的走向滑距,称为走滑-正、逆断层。因此,在对这些断层运动学分析时要加强断层的走滑量计算。对于同一条断层,一般认为各位置处相当点的总滑距是相等的。为了简化研究,将断层的空间主应力状态转化为平面主应力状态,即总滑距投影到平面上后,断层任意位置处的倾向滑距和走向滑距的矢量和是相等的——水平滑距矢量不变(图5)。从图中可以看出,各点处走滑量和伸展量会随着断层走向的变化而变化,但各位置处的水平滑距是不变的<sup>[12-13]</sup>。因此,在已知一条断层两个或两个以上位置处的伸展量时可以尝试求得相应位置的走滑量。

层其成因机制不同,所以剖面不要切过两种走向的大断层;③剖面避免切过断层走向急剧变化的位置。

总体而言,在 Mz-Es<sub>4</sub> 时期,郯庐断裂左旋活动<sup>[14,7-9]</sup>,使得东营凹陷地区处于南北向伸展背景下,σ<sub>3</sub> 方向近南北。此外从图4中可以看出,凹陷大于70%的南北向伸展发生在 Mz-Es<sub>4</sub> 时期,其内边界断层活动的多期叠加、最终定型也发生在这一时期。因此,在选取剖面计算盆地两侧边界断层走滑量时,首先要将时间段定在 Mz-Es<sub>4</sub> 时期并验证该方法的准确性,然后再计算 Ek-Es<sub>4</sub> 时期的走滑量。图6(a)中左侧 NE 向断层代表高青平南断层、滨南断层等,中间近 EW 向断层代表陈南断层中断等,右侧 NW 向断层代表陈南断层东段。其中,近东西走向的陈南断层中段与 σ<sub>3</sub> 垂直,那么 IV-IV' 剖面 Mz-Es<sub>4</sub> 时期的伸展量作为伸展量的最大值,即守恒的水平滑距 20.5 km(图6(a))。

对于 NE 向断层,本文中选取 I-I' 剖面,并计算得到 Mz-Es<sub>4</sub> 时期的伸展量 12.0 km,经过图6(b)分析,可以得到以下方程组:

$$\begin{cases} 12.0 = L_{伸} \sin \theta, \\ L_{伸} = 20.5 \sin \theta. \end{cases}$$

解方程组得到  $\theta$  为  $50^\circ$ , 即 NE 向断层代表的的高青-平南断层、滨南断层走向为  $N50^\circ E$ , 这与实际

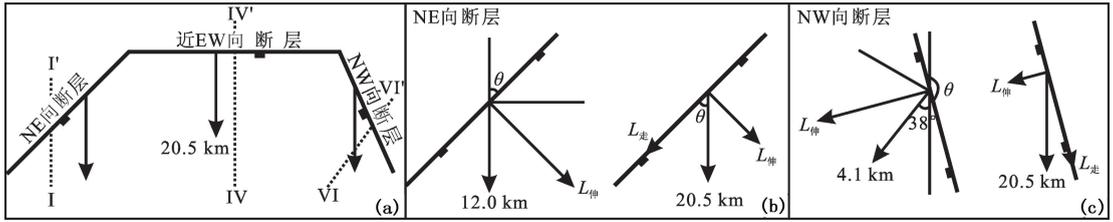


图6 东营凹陷东西两侧边界断层走滑量分析

Fig. 6 Boundary faults' slip amount analysis in E & W sides of Dongying sag

对于 NW 向断层, 选取 VI-VI' 剖面, 并计算得到 Mz-Es<sub>4</sub> 时期的伸展量 4.1 km, 经过图 6(c) 分析, 可以得到以下方程组:

$$\begin{cases} 4.1 = L_{伸} \sin (\theta + 38^\circ), \\ L_{伸} = 20.5 \sin \theta. \end{cases}$$

解方程组得到  $\theta$  为  $15^\circ$ , 即 NW 向断层代表的的陈南断层东段走向为  $N15^\circ W$ , 这与实际断层走向是吻合的<sup>[4,7]</sup> (图 1)。那么, 陈南断层东段在 Mz-Es<sub>4</sub> 时期的左旋走滑量为  $20.5 \cos 15^\circ = 19.8$  km, 同理得到 Ek-Es<sub>4</sub> 走滑量为 14.8 km。

## 4 晚中生代—新生代早期动力学特征

### 4.1 岩石圈深部背景

燕山造山运动主幕(J<sub>1-2</sub>)之后, 华北板块上的构造格局由东西向转变为北北东向<sup>[14,7-9]</sup>, 区域内褶皱-逆断活动基本结束, 身处渤海湾盆地的东营凹陷也逐步转变为伸展-走滑应力场环境。

晚中生代期间(J<sub>3</sub>-K<sub>1</sub>), 华北板块持续受到东侧洋壳近南北向的高速(30~13 cm/a)<sup>[14]</sup> 俯冲, 华北克拉通开始破坏, 其东部发育成为大陆内裂陷盆地。根据 Buck<sup>[15]</sup> 的研究, 陆内裂陷盆地以核杂岩模式、宽裂陷模式和窄裂陷模式 3 种方式伸展, 渤海湾盆地以前两种为主(图 7)。其中, 盆地西部以核杂岩模式伸展, 发育变质核杂岩带, 如太行山隆起—冀中拗陷地区; 盆地东部受边界断层郯庐断裂影响显著, 以宽裂陷模式伸展, 形成了北东向展布的一系列 NW 向断层带, 即鲁西隆起区—济阳拗陷—渤中拗陷—一线。与 Buck 的宽裂陷模式不同, 盆地东部的地壳受郯庐断裂左旋活动影响而在剖面上演化成一系列半地堑组合, 而非 Buck 的纯剪切模式下的的堑垒组合。渤海湾盆地岩石圈在以上述两种模式伸展过程中, 下部的地幔上涌以北东向展布, 西部以条带状

断层走向基本吻合<sup>[4,7]</sup> (图 1)。NE 向断层在 Mz-Es<sub>4</sub> 时期的右旋走滑量为  $20.5 \cos 50^\circ = 13.2$  km, 同理得到 Ek-Es<sub>4</sub> 走滑 10.3 km。

北东向展布, 而在东部以串珠状北东向分布。

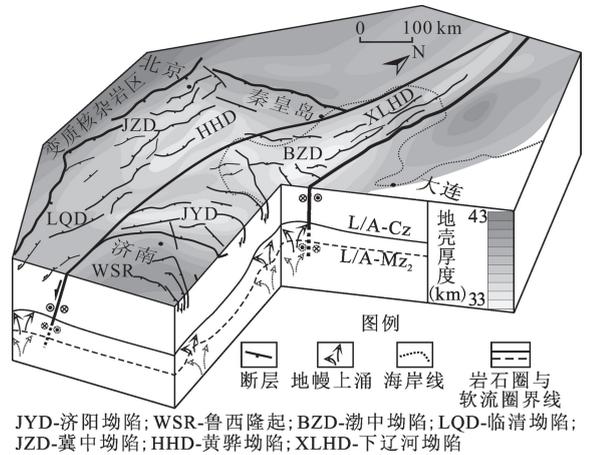


图7 渤海湾盆地深部背景

Fig. 7 Deep background of Bohai Bay Basin

根据 Buck 的模式, 渤海湾盆地发育的这两种伸展模式需要具有以下条件: 较大的地壳厚度(45~60 km)、高热流密度(80~100 mW/m<sup>2</sup>)以及快速的岩石圈伸展速率(1~10 cm/a)。根据前人研究发现, 印支运动和燕山主幕运动使华北板块东部岩石圈厚度为 150~200 km<sup>[16-17]</sup>, 推测晚中生代开始时期渤海湾盆地地区地壳厚度为 50~70 km; 济阳拗陷该时期古大地热流密度为 79.5 mW/m<sup>2</sup><sup>[18]</sup>, 平均古地温梯度 4.04~5.25 °C/100 m<sup>[19]</sup>。这些恢复的数据表明渤海湾盆地晚中生代的伸展是适用于这两种模式的。

进入新生代, 随着太平洋板块对欧亚板块的俯冲速度(10~4 cm/a)<sup>[14]</sup> 的放缓、俯冲方向的改变、印度板块俯冲的远程效应等诸多因素影响, 渤海湾盆地东侧逐步从北东向伸展转变为北西向伸展, 伸展模式也发生了改变。根据前人研究表明, 新生代渤海湾盆地地壳厚度减薄到 30~38 km<sup>[16-17,20]</sup>; 盆地古近纪伸展速率为不低于 0.75~0.77 cm/a<sup>[20]</sup>;

大地热流密度和古地温梯度以济阳拗陷为例,其值分别为  $65.8 \sim 73.8 \text{ mW/m}^2$ <sup>[18]</sup>,  $3.2 \sim 5.0 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ <sup>[21]</sup>,地温场比晚中生代要低。这些数据表明渤海湾盆地在古近纪处于窄裂陷模式。新近纪之后,盆地伸展速率降低,地温场也冷却,盆地演化进入拗陷消亡阶段。

#### 4.2 新生代早期伸展模式

如前所述,东营凹陷在  $J_3$ - $K_1$  时期受郯庐断裂左旋活动影响明显,NW、EW、NNE 向断层相继发育,进入 Ek- $Es_4$  后 NE 向断层活动逐渐加强并在此时凹陷强烈断陷。在这种南北向伸展背景下,凹陷内及其周边产生的断层进行了有规律的组合,形成了走滑-伸展区域内盆地伸展模式:凹陷块体向南逃逸过程中,盆地两侧 NW、NE 向断层的走滑分量起侧断坡作用,调节边界断层的南北向伸展;与此同时,隆起-凹陷过渡带上为调整凹陷块体的向南逃逸和隆起区上的伸展而产生了一系列展向调节断层(图8)。这些展向断层属于凹陷周边断层,以走滑为主,从东向西主要有上五井断层、淄河断层、磁村断层、文祖断层等。根据山东省 1:20 万地质图计算得到这些断层的走滑量为 10~20 km。这与前面对盆地内边界断层走滑量计算的结果相对应,反映出凹陷内部伸展活动与凹陷周边展向断层走滑调节的一致性。

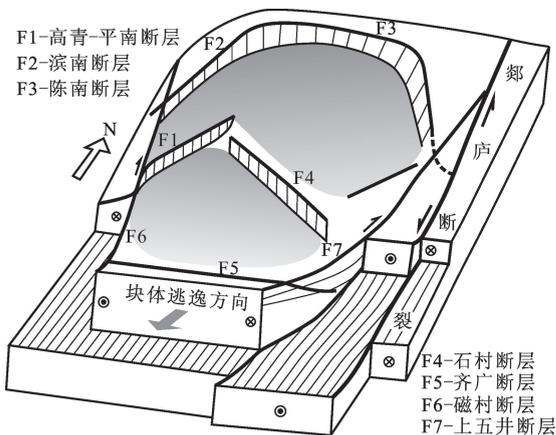


图8 东营凹陷新生代早期断层活动模式

Fig.8 Pattern of faults' activity in Dongying sag during early Cenozoic

## 5 结论

(1) 东营凹陷在新生代早期伸展过程中,其内不仅发育走滑断层,而且 NW、NE 向正断层还具有走滑性质,其兼具的走滑性质使断层在剖面上产生了马尾状断层组合。

(2) 新生代早期,东营凹陷东西向伸展量小、南北向伸展量大,且其主要伸展期为 Ek- $Es_4$ ,伸展量为 15.1 km; NW、NE 向正断层走滑量分别为 14.8 和 10.3 km。

(3) 东营凹陷地区晚中生代时为宽裂陷模式,凹陷从初始张裂阶段开始发育;古近纪为窄裂陷模式,凹陷演化进入强烈断陷阶段;进入新近纪以后伸展速率降低,凹陷经拗陷进入衰亡阶段。

(4) 东营凹陷在南北向伸展过程中,共产生两种走滑调节伸展的机制:凹陷内部,NW、NE 向断层的侧向走滑对伸展起调节作用;凹陷周边,南部隆凹过渡带上发育的展向断层调节块体向南逃逸时产生的伸展差异。

#### 参考文献:

- [1] 吴智平,李伟,郑德顺,等. 沾化凹陷中生代断裂发育及其形成机制分析[J]. 高校地质学报,2004,10(3):405-417.  
WU Zhi-ping, LI Wei, ZHENG De-shun, et al. Analysis on features and origins of the Mesozoic-Cenozoic faults in Zhanhua sag[J]. Geological Journal of China Universities,2004,10(3):405-417.
- [2] 姜素华,李金山,夏冬明,等. 剥蚀厚度恢复法在渤海湾盆地济阳拗陷孔店组应用[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版,2011,41(4):97-102.  
JIANG Su-hua, LI Jin-shan, XIA Dong-ming, et al. The recovering denudation method and its application in Kongdian formation of Jiyang depression, Bohai Bay Basin[J]. Periodical of Ocean University of China (Edition of Natural Science),2011,41(4):97-102.
- [3] 于建国,韩文功,王金铎. 中国东部断陷盆地中-新生代构造演化:以济阳拗陷为例[M]. 北京:石油工业出版社,2009:35-76.
- [4] 方旭庆,蒋有录,罗霞,等. 济阳拗陷断裂演化与油气富集规律[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(2):21-27.  
FANG Xu-qing, JIANG You-lu, LUO Xia, et al. Relationship between faults evolution and hydrocarbon enrichment in Jiyang depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2013,37(2):21-27.
- [5] 吴智平,张林,李伟,等. 东营凹陷孔店期-沙四早期构造格局恢复[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(1):13-19.  
WU Zhi-ping, ZHANG Lin, LI Wei, et al. Early Paleogene (Ek- $Es_4$ ) structure framework restoration of Dongying sag[J]. Journal of China University of Petroleum (E-

- dition of Natural Science), 2012, 36(1): 13-19.
- [6] GIBBS A D. Linked fault families in basin formation[J]. *Journal of Structural Geology*, 1990, 12(5/6): 795-803.
- [7] 唐其升. 东营凹陷断裂系统与中央构造带形成机制[D]. 杭州: 浙江大学理学院, 2007.
- TANG Qi-sheng. The fault system and formation mechanism of central structural zone in Dongying sag[D]. Hangzhou: Faculty of Science in Zhejiang University, 2007.
- [8] 陈海云, 于建国, 舒良树, 等. 济阳拗陷构造样式及其与油气关系[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(4): 622-632.
- CHEN Hai-yun, YU Jian-guo, SHU Liang-shu, et al. The structural styles and their relation with petroleum-gas resources of the Jiyang depression, Shandong province, China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(4): 622-632.
- [9] 任建业, 于建国, 张俊霞. 济阳拗陷深层构造及其对中生代盆地发育的控制作用[J]. *地学前缘*, 2009, 16(4): 117-137.
- REN Jian-ye, YU Jian-guo, ZHANG Jun-xia. Structures of deep bed in Jiyang sag and their control over the development of Mesozoic and Cenozoic basins [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4): 117-137.
- [10] ELLIOTT D. The energy balance and deformation mechanisms of thrust sheets [J]. *Philosophical Transactions Royal Society of London*, 1976, 283: 289-312.
- [11] 管树巍, 汪新, 杨树锋, 等. 位移转换的两种概念模型与实例[J]. *中国科学: D辑*, 2004, 34(9): 807-817.
- GUAN Shu-wei, WANG Xin, YANG Shu-feng, et al. Two conceptual models and cases about the displacement transformation [J]. *Science in China (ser D)*, 2004, 34(9): 807-817.
- [12] 陆克政. 构造地质学教程[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996.
- [13] MOUSLOPOULOU V, NICOL A, LITTLE T A, et al. Displacement transfer between intersecting regional strike-slip and extensional fault systems [J]. *Journal of Structural Geology*, 2007, 29: 100-116.
- [14] MARUYAMA S, ISOZAKI Y, KIMURA G, et al. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present [J]. *The Island Arc*, 1997, 6: 121-142.
- [15] BUCK W R. Models of continental lithospheric extension [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96 (B12): 20,161-20,178.
- [16] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化” [J]. *现代地质*, 1994, 8(3): 349-356.
- DENG Jin-fu, MO Xuan-xue, ZHAO Hai-ling, et al. Lithosphere root/de-rooting and activation of the east China continent [J]. *Geoscience*, 1994, 8(3): 349-356.
- [17] 赵国泽, 赵永贵. 华北平原盆地演化中深部热、重力作用初探 [J]. *地质学报*, 1986, 1: 102-113.
- ZHAO Guo-ze, ZHAO Yong-gui. The formation mechanism of the north China plain basin a comprehensive analysis of thermal and gravitational action [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1986, 1: 102-113.
- [18] 龚育龄, 王良书, 刘绍文, 等. 济阳拗陷大地热流分布特征 [J]. *中国科学: D辑*, 2003, 33(4): 384-391.
- GONG Yu-ling, WANG Liang-shu, LIU Shao-wen, et al. The characteristics of terrestrial heat flow distribution in Jiyang depression [J]. *Science in China (ser D)*, 2003, 33(4): 384-391.
- [19] 杨绪充. 济阳拗陷中生代古地温分析 [J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1988, 12(3): 23-33.
- YANG Xu-chong. Paleogeothermal analyses of the Mesozoic and the Cenozoic in Jiyang depression [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 1988, 12(3): 23-33.
- [20] 李思田, 路凤香, 林畅松, 等. 中国东部及邻区中、新生代盆地演化及地球动力学背景 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- [21] 邱楠生, 苏向光, 李兆影, 等. 济阳拗陷新生代构造-热演化历史研究 [J]. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 1127-1135.
- QIU Nan-sheng, SU Xiang-guang, LI Zhao-ying, et al. The Cenozoic tectono-thermal evolution of Jiyang depression, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 1127-1135.

(编辑 徐会永)