

渤海湾盆地垦东凸起及邻区构造运动学

付兆辉^{1,2}, 陈发景², 秦伟军¹, 李 敏³

(1 中国石化石油勘探开发研究院战略规划研究所, 北京 100083;

2 中国地质大学能源学院, 北京 100083; 3 北京交通大学软件学院, 北京 100044)

摘 要: 渤海湾盆地中南部垦东地区是一个新的油气勘探领域。为了深入研究垦东凸起及邻区的构造特征与油气聚集规律, 寻找有利圈闭, 讨论了该地区的断块体运动类型, 并对水平伸展运动和翘倾运动进行了分析。通过地质、地球物理综合研究, 得出以下结论:

① 垦东凸起及邻区断块体运动的方式主要表现为水平方向的伸展运动、掀斜或旋转运动; ② 通过计算垦东凸起及邻区伸展系数、断层生长指数、断层落差以及绘制平衡剖面, 反映出垦东凸起及周围凹陷构造演化活动具有断陷早期活动剧烈、断陷晚期逐步减弱并基本中止的特点; ③ 垦东凸起及邻区翘倾运动的形成与发育受控于郯庐断裂带的走滑及伸展运动, 经历了中古生界—孔店组单断、沙四段多个单断、沙三段—沙一段双断、新近系弱伸展拗陷或拗断的过程。

关键词: 构造运动学; 伸展运动; 翘倾运动; 垦东地区

中图分类号: P542

文献标识码: A

渤海湾盆地垦东地区位于渤海湾西南部浅海海域, 勘探面积近 1 000 km²。垦东地区主体部位为垦东凸起, 北邻黄河口凹陷, 西接沾化凹陷和长堤—孤东凸起, 南邻青东凹陷和青坨子凸起, 东接莱北低凸起和莱州湾凹陷^[1] (图 1)。1975 年钻探了第 1 口探井, 至今发现了明化镇组、馆上段和馆下段 3 套含油层系。垦东地区勘探开发还处于初级阶段, 需要继续深化研究垦东地区的构造地质特征, 分析构造样式和断层性质, 探寻垦东地区有利的构造圈闭。这对于深入认识垦东地区形成、演化过程以及油气聚集规律具有重要的理论意义。

分析渤海湾盆地中南部地区区域构造格局及演化过程, 可以看出: 垦东凸起及附近的众多凹陷、凸起均属于古近纪的伸展断陷和伸展断凸^[2]。

在剖面上, 上述凸起和凹陷形成一系列受基底正断层控制的半地堑(或地堑)和半地垒(或地垒)构造, 在半地堑(地堑)中充填了呈楔形或梯形的沉积层序, 在半地垒(地垒)中缺失古近纪这套层序或很薄地覆盖于其上。在平面上, 基底正断层系统及其控制的半地堑(或地堑)凹陷和半地垒(或地垒)凸起被一系列调节带分开, 呈“南北分带、东西分段”的断块构造格局分布^[3]。

1 断块体运动类型

垦东凸起及邻区位于渤海湾盆地中南部, 这一区域主要受拉张作用力影响。拉张作用使盆地区域的岩石圈或地壳破裂, 产生不同尺度的正断层, 形成大小不同、形态各异的断块体, 并使这些断块在拉张伸展活动中发生有规律的运动。这种运动的方式主要表现为两类, 即水平方向的伸展运动和翘倾(或掀斜、旋转)运动。

收稿日期: 2011-02-19

基金项目: 中国石油化工股份有限公司“2010 年度油气勘探计划跟踪分析”项目

作者简介: 付兆辉(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事油气勘探与战略规划的研究工作。E-mail: slytfzh@163.com

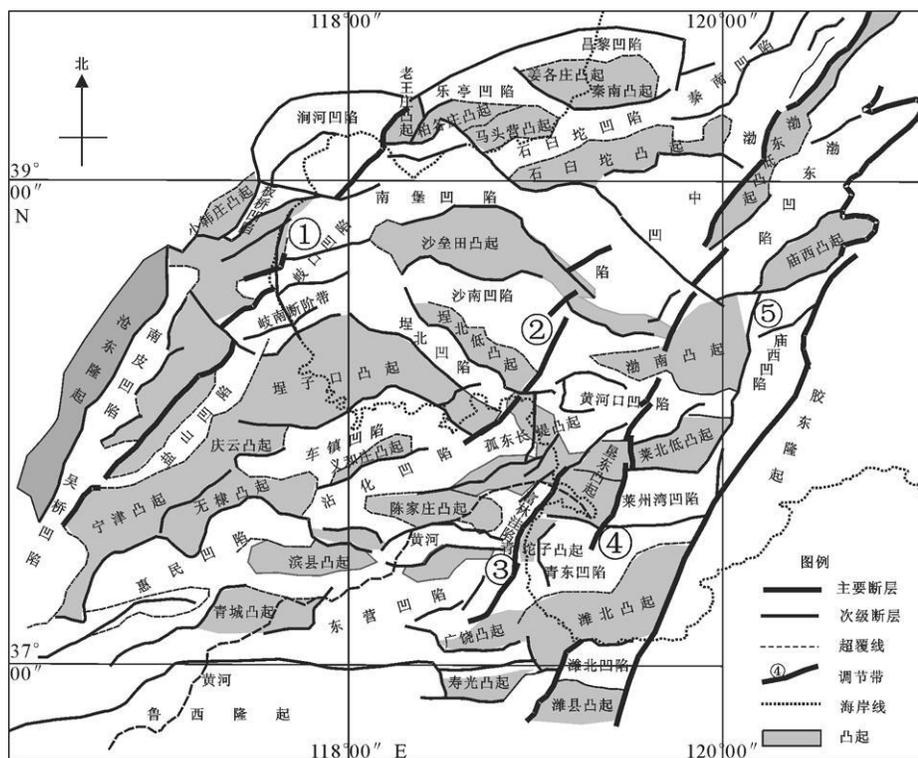


图1 渤海湾盆地中南部区域构造

Fig. 1 The regional tectonic map of the Central and southern Bohai Bay Basin

2 垦东凸起水平伸展运动

2.1 伸展系数

2.1.1 概念及计算方法

地壳或岩石圈的伸长程度可以用各种参数表示。如图2所示^[4], 设剖面地壳的原始长度为 L_0 , 经伸展构造变形后其长度变为 L_1 , 则地壳的伸长程度可用下列参数表示:

$$I = L_1 - L_0$$

$$e = (L_1 - L_0) / L_0$$

$$\beta = L_1 / L_0 = 1 + e$$

式中: I 为剖面上地壳伸长的总量, 称为伸长量或伸展量, 常以 km 为单位;

e 为单位长度的地壳伸长量, 称为伸长度或伸长率, 其量纲为 km/km, 常以百分数表示;

β 为伸展构造变形前后地壳的长度比, 称为伸长比或伸展系数, 其量纲也为 km/km。

当 β 值大于1时表明地壳伸展, 小于1时表

明地壳缩短, e 、 β 能反映伸展构造造成地壳伸展的相对程度; I 则是反映伸展构造造成地壳伸展的总体规模。

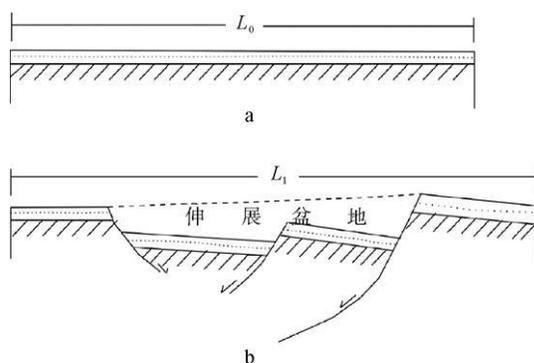


图2 伸展构造变形引起的地壳伸展量

Fig. 2 Crustal extension caused by extensional tectonic deformation

2.1.2 垦东凸起伸展系数

根据伸展系数计算原理, 针对垦东凸起的3条南北向剖面(Inline)、4条东西向剖面(CDP)计算了伸展系数(图3), 并由此分析垦东凸起伸展情况。

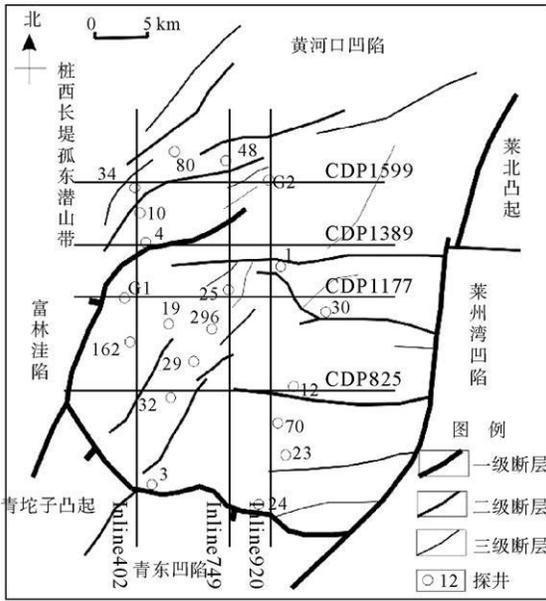


图 3 垦东凸起测线号分布

Fig. 3 Distribution map of seismic lines of Kendong Uplift

经过计算, 7 条剖面中最小的伸展系数为 1.008, 最大的为 1.352, 平均为 1.113 (图 4)。在统计的各个时期中, 沙河街组沙三段伸展系数平均值最大, 为 1.198; 其次是沙二段、沙一段、馆下段、馆上段, 而明化镇组伸展系数平均值最小, 为 1.027。在统计的 7 条剖面中, 垦东连片 CDP1599 测线各个时期伸展系数平均值最大, 为 1.197, Inline920 测线各个时期伸展系数平均值最小, 为 1.044。

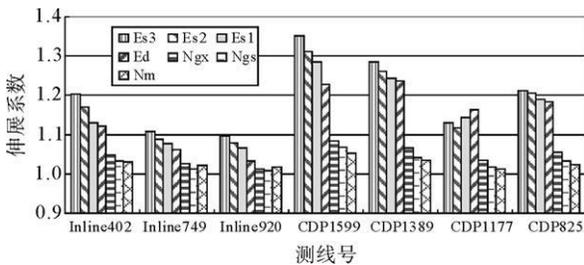


图 4 垦东凸起伸展系数柱状图

Fig. 4 Extensional index of Kendong Uplift

2.1.3 垦东凸起及邻区伸展情况分析

在晚白垩世初期, 太平洋板块运动到中国东部大陆边缘, 并由早白垩世的斜向俯冲转为正向中速俯冲, 这一正向俯冲一直持续到古近纪, 西太平洋板块的俯冲速度和角度的重大改变, 使得中

国东部大陆下出现了软流圈上涌、岩石圈减薄, 从而造成中国东部的伸展活动和大规模断陷的发生^[5]。在研究区内的垦东凸起, NE 向的成山断层活动加剧, 主要表现出伸展正断层的性质, 沙四段地层在断层下降盘沉积速度加快, 沉积范围扩大, 并逐渐上超到古隆起的翼部, 形成披覆构造。在南部的青东凹陷, 孔店组、沙四段中广泛发育正断层, 且这一时期形成的断层断距都比较大, 说明伸展的幅度较大。由于垦东凸起主体部位未沉积孔店组、沙河街组沙四段地层, 定量分析伸展情况比较困难。

渐新世晚期, 西太平洋板块开始了大规模的弧后扩张, 中国东部处于近 EW 向应力场的控制, 使得区域活动由伸展阶段进入挤压阶段^[6,7]。在这种挤压应力的作用下, 垦东伸展凸起带抬升, 但是由于这一时期沉积充填速度大于升降速度, 使得沙二段不仅发育在潜山带周边的洼陷地区, 而且还超覆于中、低潜山构造带的翼部, 沙一段和东营组沉积逐渐上超到高位潜山的翼部^[8], 披覆于中、低潜山之上。据计算的 7 条剖面伸展系数, 沙三段在 1.096~1.352 之间, 沙二段在 1.079~1.312 之间, 反映出断裂活动时期伸展作用强烈, 是垦东凸起及邻区凹陷的断陷剧烈拉张期; 沙一段伸展系数在 1.066~1.284 之间, 东营组在 1.032~1.236 之间, 反映出断裂活动继承沙二段演化特征, 但水平伸展作用强度减弱, 是垦东凸起及邻区凹陷的断陷稳定扩展期。到渐新世末期, 受区域性东营运动的影响, 潜山带整体抬升, 东营组地层遭受区域性剥蚀, 形成不整合面, 至此, 潜山构造带基本成型。

中新世中晚期以后, 欧亚板块的陆陆碰撞和西太平洋的弧后扩张活动逐渐减弱, 加之应力远程传播过程中的不断消耗, 中国东部虽整体仍处于挤压应力的作用下, 但是, 应力已经大大减弱, 整体基本处于稳定的沉降环境下。在垦东潜山带, 潜山边界断层继续同沉积活动, 但活动强度减弱, 凸起与洼陷的高差变小^[9,10], 馆陶组、明化镇组和第四系覆盖全区, 形成新近系和第四系的披覆构造, 从而形成现今的披覆层。根据计算的 7 条剖面伸展系数, 馆陶组下段伸展系数在 1.008~1.084 之间, 馆陶组上段伸展系数在 1.002~1.068 之间, 反映断陷活动晚期, 垦东凸起及周围

凹陷伸展作用减弱;明化镇组伸展系数在 1.012~1.052 之间,反映断陷活动接近终止。

根据不同测线的伸展指数计算,可以看出,不同测线由于处于垦东凸起不同的部位,伸展程度也不相同。在南北向测线中,Inline402 总体来看伸展系数较高,各个层系伸展系数都较其他测线高,垦东凸起伸展程度自东向西增强,西部临近垦东 4—垦东 34 断裂带的区域伸展程度最强,推测是由于断层密集、伸展作用强烈所致。在 EW 向测线中,CDP1599 测线总体来看伸展系数较高,各个层系伸展系数都较其他测线高,中部凸起上的 CDP1177 测线伸展系数较低。垦东凸起伸展程度呈现自北部斜坡向中部凸起减弱、从中部凸起向南部再次增强的趋势,推测是由于北部断层较多、伸展作用强烈所致,中部凸起地区断层较少,是古地台发育区,伸展作用较弱。

通过计算垦东凸起及邻区不同测线伸展系数可以看出,垦东凸起及邻区伸展系数总体呈现“深大浅小”的特点,反映出垦东凸起及周围凹陷构造演化活动具有断陷早期活动剧烈、断陷晚期逐步减弱并基本中止的特点。

2.2 断层生长指数

自从 Thorsen C E 于 1963 年提出断层生长指数(growth index, 缩写为 GI)以来,生长指数在国内外,尤其是在我国含油气盆地同生断层的研究中得到了较为广泛的应用,普遍认为是研究同生断层的有效手段。他将断层生长指数定义为断层两侧同一地层单元的下降盘厚度与上升盘厚度之比。在生长指数图上比较不同时代断层生长指数的大小,可以了解断层在不同时代的活动强度(图 5)。断层生长指数图一般可以说明,断层开始活动的时间即下降盘地层出现厚度增长的最老时代(图 5A);断层活动最强烈的时期即下降盘地层增长最大的时代(图 5B);断层活动的末期即下降盘地层增长的最新时代(图 5C)。

2.2.1 前提或假设条件

应用生长指数反映断层活动强度有以下前提和假定条件:①假定在断裂活动期间,沉积及时、补偿完全,凹陷内不同部位的沉积速率一致,否则沉积厚度不能代表断裂的沉降幅度;②断层上下盘没有较大的沉积间断;③准确对比上下盘的地

层单位来计算生长指数的地层单位,因为,生长指数应用正确与否、精确程度取决于地层对比的可靠程度和上、下盘地层的保存条件;④生长指数没有将沉积压实因素考虑进去。只有当凹陷内不同部位的沉积速率一致时,才能用生长指数对比断层之间活动的相对强弱;只有各时代的沉积速率保持不变时,才能用生长指数确定断层在时间演化上的强度变化。

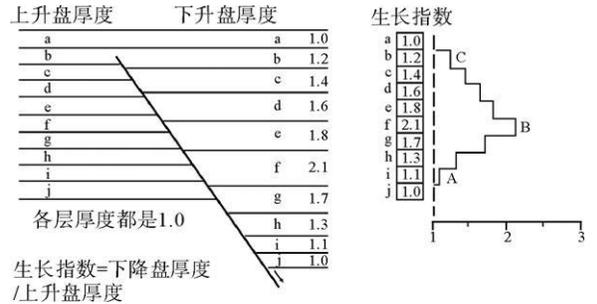


图 5 断层生长指数(引自文献 [11])

Fig. 5 Fault growth index diagram (from referenc[11])

2.2.2 生长指数的定义

断裂上盘某地层的厚度与其下盘同层位地层厚度的比值可用来表示该地层沉积期断裂活动的速率,即生长指数或增长指数。一条生长断层在时期 i 的生长指数为:

$$Gi = Hi / hi$$

式中: Gi 为第 i 时期生长断层的生长指数;

Hi 为第 i 时期下降盘厚度, m;

hi 为第 i 时期上升盘厚度, m。

生长指数是一个能判定伸展和挤压时间及速率的参数。生长指数大小反映了断层的生长速度,即断裂的活动强度,生长指数比值越大,反映断层的活动强度越大。基本内容如下:①断层生长指数等于 1 时,即上、下盘相应地层厚度差消失的层位,说明断层两盘厚度相等,断裂活动停止;②当断层生长指数大于 1 时,说明上盘厚度大于下盘厚度,发生同沉积正断作用,其值越大,正断速率越大;断裂活动最强烈时期,即下降盘地层增长最大的年代,生长指数表现为最大值,可达 5~10,我国渤海湾油区断裂的主要发育期的生长指数大多为 1.3~2.5;③当断层生长指数小于 1 时,表示上盘厚度小于下盘厚度,断层活动,而且是逆断层或反转断层,发生同沉积逆断(挤压)作

用, 其值越小, 逆断速率越大。正断层生长指数越大或逆断层(反转断层)生长指数越小, 表示断层活动越强烈^[11-13]。

2.2.3 垦东断层生长指数计算情况

垦东凸起断层众多, 断裂活动频繁。为了研究垦东凸起及邻区构造运动特征, 分析构造演化历史, 选取 4 条测线, 对断层参数、生长指数分别进行了计算, 结果如表 1 所示:

表 1 垦东凸起断层生长指数

Table 1 Fault growth index of Kendong Uplift

反射面	数据采集个数	最小值/m	最大值/m	平均值/m
T0	29	1 004.2	1 248.7	1 088.6
T1	30	0 894.0	1 245.3	1 031.8
T1	23	0 825.0	1 520.7	1 017.5
T2	11	0 880.5	1 401.3	1 047.0
Tr	10	1 012.3	2 556.4	1 463.2
Tg	4	1 000.0	1 339.8	1 198.7

2.3 断层落差分析

2.3.1 前提或假设条件

在研究断层演化史及活动性时, 生长指数法运用比较多且理论发展较为完善, 而断层落差法则涉及的较少。应用断层落差法反映断层活动强度的前提条件与生长指数法有相通性, 但也有其区别之处: ①准确可靠的上下盘地层单位的对比; ②假定剥蚀区断层上下盘剥蚀厚度一致; ③断层落差没有考虑沉积压实因素。当然, 计算断层古落差应考虑塑性流动和古水深等因素的影响。

2.3.2 断层落差的定义与求取

断层落差是指某地质历史时期垂直于断层走向的剖面上两盘相当层之间的铅直距离, 也称铅直断层滑距(如图 6), 单位为 m。

$$D_i = H_i - h_i$$

式中: D_i 为第 i 时期断层的落差, m;

H_i 为第 i 时期下降盘厚度, m;

h_i 为第 i 时期上升盘厚度, m。

2.3.3 断层落差的应用

生长断层是在沉积过程中长期发育的断层, 也称同沉积断层, 其上部的年轻地层沉积时发生的断裂活动产生的落差必定累积叠加到下部较老

地层上, 因此, 生长断层的落差随深度的增大而增大。通过对生长断层落差进行分析, 可以定量分析生长断层的相对活动强度。

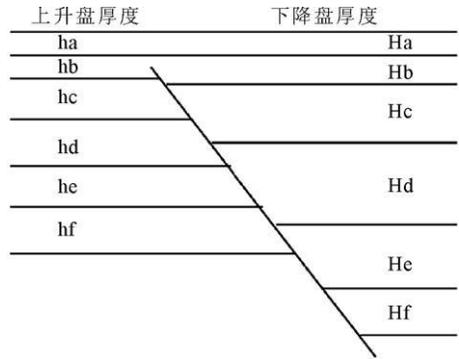


图 6 断层落差(引自文献 [11])

Fig. 6 Fault throw diagram (from reference [11])

2.3.4 垦东凸起断层落差及分析

根据前述断层数据的统计得出的结果见表 2:

表 2 垦东凸起断层垂直断距落差

Table 2 Fault throw of Kendong Uplift

反射面	数据采集个数	最小值/m	最大值/m	平均值/m
T0	29	5	230	71
T1	30	17	266	78
T1	23	29	302	98
T2	11	22	449	129
Tr	10	29	1 205	343
Tg	4	235	379	309

由图 7 可以看出, 中生界断距较大; 沙河街组沙二段—沙四段由于断陷强烈扩张, 断距达到最大; 之后断距数据缓慢下降, 沙河街组沙一段和东营组断距小于沙河街组沙二段—沙四段, 馆陶组又小于东营组, 明化镇组小于馆陶组。进一步反映出垦东凸起及周围凹陷构造演化活动具有断陷早期活动剧烈、断陷晚期逐步减弱并基本中止的特点。

2.4 平衡剖面技术

平衡剖面技术^[14]是为了建立合理的地质横剖面而提出的一种几何学方法, 所谓平衡剖面是指可以把剖面上的变形构造通过几何学原则全部

复原成合理的未变形状态的剖面。平衡剖面技术起源于20世纪早期。Chamberlin(1919)最早用平衡剖面技术计算了下伏同期褶皱的滑脱深度^[15]。Bucher(1933)首先提出了建立平衡剖面的两条基本原则:层长不变和构造特性原则^[16]。到了20世纪60年代以后,随着计算机技术的飞速发展和石油地质勘探工作的深入,平衡剖面技术在石油勘探和开发上的应用越来越广泛。Dahlstrom(1969)给出了平衡剖面的明确定义:从变形状态恢复过来的沉积时的剖面^[17]。Ramsay(1987)在解释平衡剖面的概念时用天平图示形象地说明变形前后的物质是不变的,在地质解释中就是保持两者相等^[18]。到了20世纪后期,平衡剖面技术趋于完善和成熟。

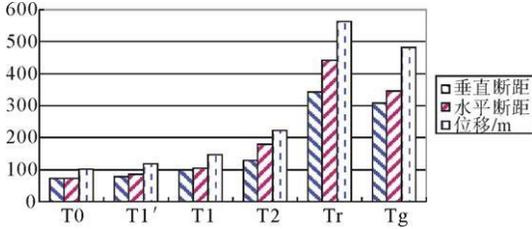


图7 垦东凸起不同反射面断层垂直断距、位移柱状图

Fig. 7 Fault throw and displacement of the reflectors in Kendong Uplift

由于平衡剖面将剖面变形前后的状态有机联系起来,因此,通过变形前后的应变分析,可以定量得出地层的变形过程和变形量的大小,并可以推测变形过程中应力场的变化情况,这些结论对于了解和掌握研究区的构造演化是非常有益的,再结合其他地球物理资料和地质资料,就可以清楚地得出研究区的构造模型和演化历史。

建立平衡剖面的过程,主要有两种方法:正演法和反演法^[19]。正演方法是由原始未变形的剖面演化至构造变形后的剖面,通过不断改变正演计算使用的主要变量如断面的几何形态、地层厚度、断层数目及位移量等,直到最后得到的剖面与现今变形后的剖面基本一致^[20]。反演法正好相反,是从变形后的剖面出发,最终得出剖面变形前的状态^[21]。本次研究过程中,建立平衡剖面主要采用反演法,从解释的剖面出发,通过逐层回剥,最终建立平衡剖面。

在垦东凸起及邻区选取7条测线,抽取地震剖面,进行平衡剖面分析。从图8中可以看出,在垦东凸起东部斜坡带,同样出现自北向南由黄河口凹陷向垦东凸起抬升过渡的趋势,并呈现多个断鼻构造。北部在垦东古2附近有明显的一个鼻状构造,古近系沙河街组地层基本超覆至此;中部垦东102附近和垦东12附近各有一个断鼻构造,东营组地层同样呈现向南超覆的趋势。古近纪Es₃、Es₂时期剖面伸展率最大,新近纪Nm时期伸展程度最小。

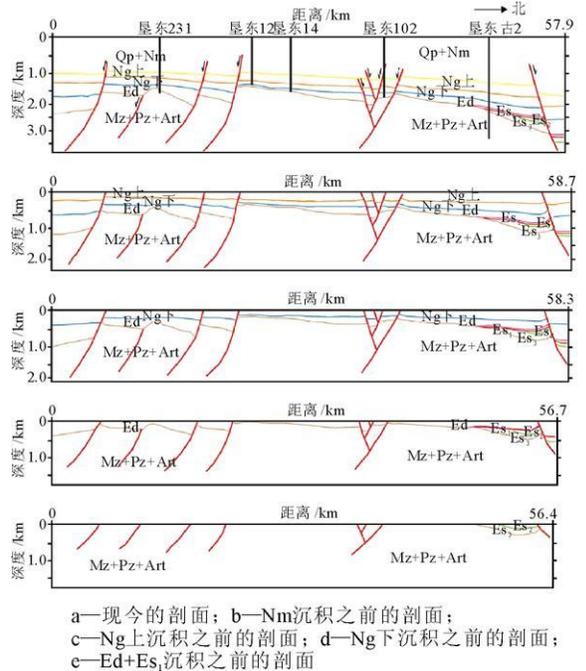


图8 垦东凸起 Inline920 测线构造演化

Fig. 8 Section of Inline 920, showing the tectonic revolution of Kendong Uplift

3 垦东凸起及邻区翘倾运动

盆地中的基底断块在裂隙作用过程中发生旋转运动,使其产状发生变化。断块体的旋转运动从运动学上可以分解为绕某个水平参照轴和某个垂向参照轴分别在水平面和纵剖面上发生似枢转运动^[22]。绕水平参照轴的似枢转运动造成断块体不均匀的抬升或下降,使断块体中的水平参照面发生倾斜,成为断块掀斜运动^[23];绕垂向参照轴的似枢转运动造成断块体定向方位改变,可称

为断块水平旋转运动。在重力及重力均衡作用参与下的拉张作用过程中, 断块体旋转运动中的掀斜运动分量是主要的, 水平旋转运动分量相对较小。

促使断块体发生翘倾旋转的因素很多, 其中断层面倾斜的变化和深部拆离面及均衡面的存在是两个重要因素^[24], 如图 9a 所示, 铲式正断层两盘的水平伸展运动引起断层上盘不同位置垂直下降幅度不同, 迫使上盘发生掀斜旋转; 如图 9b 表示, 由于拆离层的均衡作用限制了断层上盘的重力下降幅度, 使断层面两盘断块通过掀斜旋转而不是以简单的差异升降来拟合水平伸展运动造成的断块间空隙。此外, 半地堑中沉积负荷的不均匀亦是断块体发生翘倾旋转的因素之一。

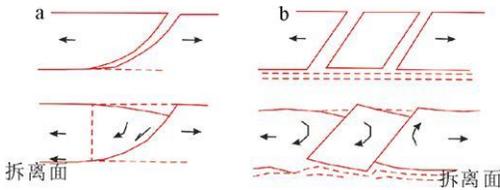


图 9 断块体翘倾运动成因

Fig. 9 Origin of block tilting movement

以垦东凸起南部青东凹陷为例, 翘倾运动的形成与发育主要受控于郯庐断裂带的走滑及伸展运动, 自东向西随着走滑应力场的减弱, 构造格局特别是断裂系统也随之发生相应的变化。同时, 在第三纪, 自南向北发生过多次的区域翘倾, 进一步改造青东凹陷的发育过程和构造面貌。总体来说, 青东凹陷经历了中古生界—孔店组单断——沙四段多个单断——沙三段—沙一段双断——新近系弱伸展拗陷或拗断的过程(图 10)。具体表现为:

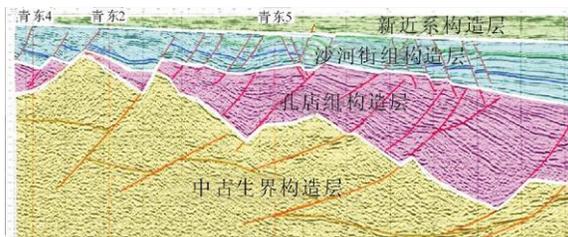


图 10 青东凹陷南北向剖面

Fig. 10 A profile from south to north of the Qingdong Sag

孔店组—沙四下沉积时期, 郯庐断裂带表现为强烈伸展及弱走滑运动, 活动性南强北弱, 造成宏观上古地形具有“南低北高”的特征, 区域沉降中心位于南部的昌潍凹陷; 受郯庐断裂带活动的控制, 青东地区发育一系列 NW 走向、WS 倾向的张性断层, 形成多个“北断南超”的小型山间断陷盆地, 由南向北各断陷内的地层沉积厚度依次减薄; 之后, 该区整体抬升, 早期沉积地层遭受一定程度的剥蚀。

沙四上一沙三段沉积时期, 郯庐断裂带表现为右旋走滑运动。伴随郯庐断裂带由南向北活动强度由弱向强的迁移, 郯庐断裂带西盘逐渐自 SW 抬升并最终向 NE 倾没, 沉降中心迁移至北部的黄河口凹陷, 南部断裂活动强度减弱, 沉积厚度减小; 受郯庐断裂带活动控制, 沙四上沉积期, 青东地区整体沉降, 发育一系列近 EW 向的南掉断层, 北部边界断层强裂活动, 形成一个“西断东超、北断南超”的断陷湖盆, 青东凹陷开始形成。近 EW 走向的南倾断层持续活动, 控制地层的沉积, 沙四上亚段地层具有向西向南超覆减薄的特征; 至沙三段沉积期, 南掉断层活动相对减弱, 发育一系列近 EW 走向的北掉断层, 形成了正、反向断层成对出现的构造面貌, 将区内的构造格局复杂化。

沙三沉积末期至今, 伴随郯庐断裂带的持续右旋走滑运动, 区域上, 南升北降发生强烈翘倾, 区域沉降中心逐渐迁移至渤中凹陷; 宏观上, 古地形具有“南高北低”的特征, 青东地区整体抬升遭受剥蚀, 仅凹陷中心残留了部分沙二段地层, 其余地区均为新近系馆陶组直接覆盖于沙三段地层之上。

4 结论及建议

在垦东凸起及邻区勘探实践的基础上, 对垦东凸起及邻区构造运动学特征进行了深入的研究, 对垦东凸起及邻区水平伸展运动和翘倾运动进行了分析。选取了不同方向的 7 条剖面, 详细计算了伸展系数, 分析了垦东凸起及邻区的水平伸展量和伸展运动特点; 计算了断层生长指数和断层落差, 分析了断层特征; 利用平衡剖面技术绘制了各侧线的构造演化图, 进一步佐证了伸展运

动的特征;通过阐释垦东凸起及邻区断块体翘倾(或掀斜)运动演化过程,解析了该地区翘倾运动特征。通过研究得出了以下结论:

(1) 垦东凸起及邻区受引张作用力影响,断块体运动的方式主要表现为水平方向的伸展运动、掀斜或旋转运动。

(2) 通过计算垦东凸起及邻区不同测线伸展系数,可以看出垦东凸起及邻区伸展系数总体呈现“深大浅小”的特点,反映出垦东凸起及周围凹陷构造演化活动具有断陷早期活动剧烈、断陷晚期逐步减弱并基本中止的特点。

(3) 由垦东凸起及邻区断层生长指数、断层落差数据分析:中生界断距较大;沙河街组沙二段—沙四段断陷强烈扩张,断距达到最大;之后断距缓慢下降,沙河街组沙一段和东营组断距小于沙河街组沙二段—沙四段,馆陶组又小于东营组,明化镇组小于馆陶组,反映出垦东凸起及邻区构造演化活动具有断陷早期活动剧烈、断陷晚期逐步减弱并基本中止的特点。

(4) 平衡剖面技术显示:在垦东凸起东部斜坡带,自北向南由黄河口凹陷向垦东凸起抬升过渡,并呈现多个断鼻构造。古近纪 E_{s3} 、 E_{s2} 时期剖面伸展率最大,新近纪 N_m 时期伸展程度最小。

(5) 垦东凸起及邻区翘倾运动的形成与发育主要受控于郯庐断裂带的走滑及伸展运动,自东向西随着走滑应力场的减弱,构造格局特别是断裂系统也随之发生相应的变化。同时,在第三纪,自南向北发生多次的区域翘倾,进一步改造该地区的发育过程和构造面貌。总体来说,垦东凸起及邻区经历了中古生界—孔店组单断——沙四段多个单断——沙三段—沙一段双断——新近系弱伸展拗陷或拗断的过程。

通过对垦东凸起及邻区构造运动学的分析,明确了该地区的构造演化过程,丰富了对该地区构造特征的认识。利用以上结论,对垦东凸起及邻区开展了区带评价和圈闭预测,发现了有利的断鼻、断块、滚动背斜、砂砾岩体等类型的油气圈闭 12 个,预测石油地质储量 4 000 万 t,取得了良好的成效。

在垦东凸起及邻区构造运动学分析的过程中,发现该地区受东部郯庐大断裂(渤海段)走滑运动和构造演化的影响较大,需继续开展相关内

容的深入研究。

致谢:在项目研究和论文撰写过程中,得到了石油勘探开发研究院战略规划研究所领导和专家的指导,得到了胜利油田分公司海洋采油厂同仁的大力帮助,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 李丕龙,张善文,曲寿利,等. 陆相断陷盆地油气地质与勘探(一)[M]. 北京:石油工业出版社,地质出版社,2003:105-108.
- [2] 漆家福,陈发景. 辽东湾——下辽河裂陷盆地的构造样式[J]. 石油与天然气地质,1992,13(3):272-283.
- [3] 付兆辉,高喜龙,陆友明,等. 渤海湾盆地垦东凸起构造特征与油气聚集[J]. 现代地质,2008,22(4):619-627.
- [4] 陈发景,汪新文,陈昭年,等. 伸展断陷盆地分析[M]. 北京:地质出版社,2004:248-251.
- [5] 万天丰,王明明,殷秀兰,等. 渤海湾地区不同方向断裂带的封闭性[J]. 现代地质,2004,18(2):157-163.
- [6] 吴奇之,王同和,李明杰,等. 中国油气盆地构造演化与油气聚集[M]. 北京:石油工业出版社,1999:93-95.
- [7] 陆克政,漆家福. 渤海湾新生代含油气盆地构造模式[M]. 北京:地质出版社,1997:150-156.
- [8] 张克鑫,漆家福,林会喜. 济阳地区埕岛—垦东构造带中生代的逆冲断层及其与郯庐断裂带的关系[J]. 地质科学,2006,41(2):270-277.
- [9] 付兆辉,李敏. 郯庐断裂对垦东地区构造和成藏的影响[J]. 海洋石油,2005,25(2):15-20.
- [10] 林玉祥,唐洪三. 垦东凸起石油地球化学特征与成藏系统划分[J]. 油气地质与采收率,2001,8(5):27-31.
- [11] Thorsen C E. Age of growth faulting in southeast Louisiana[C]//Thorsen. Trans Gulf-Coast Ass Geol Soc Age of growth faulting in southeast Louisiana, Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 1963, 23(2):103-110.
- [12] Chapman R E. Petroleum Geology [M]. Amsterdam & Oxford & New York: Elsevier Science Publishers, 1983:85-88.
- [13] 朱世新. 向斜中油气藏圈闭条件的探讨[J]. 石油实验地质,1985,3:50-55.
- [14] 朱世新,宋志祥,王定一. 油气田调查勘探与资源评价[M]. 北京:地质出版社,1987:60-67.
- [15] Chamberlin R T. The building of the Colorado Rockies [J]. Journal of Geology, 1919, 27: 225-251.
- [16] Bucher W H. The Deformation of the Earth's Crust [M]. Princeton: Princeton University Press, 1993:42-50.
- [17] Dahlstrom C D A. Balanced Cross Sections [J]. Canadian Journal of Earth Science, 1969, 6: 743-757.
- [18] Ramsay J G, Huber M L. The techniques of modern struc-

- tural Geology [C] // Folds and Fractures, London: Academic Press, 1987: 230-256.
- [19] 刘光炎, 蒋录全. 平衡剖面技术与地震资料解释 [J]. 石油地球物理勘探, 1995, 30(6): 833-844.
- [20] 肖安成. 平衡剖面的正演模拟方法 [J]. 江汉石油学院学报, 1999, 21(6): 1-7.
- [21] Eaton G P. Geophysical characteristics of the crust of the Basin and Range Province [C] // Continental Tectonics, Washington D C: National Academy of Sciences, 1980: 96-114.
- [22] Morley C K, Nelson R A, Patton T L, et al. East African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts [J]. AAPG Bull, 1990, 74(8): 1 234-1 253.
- [23] 刘和甫, 李晓清, 刘立群, 等. 走滑构造体系盆山耦合与区带分析 [J]. 现代地质, 2004, 18(2): 139-150.
- [24] 张善文, 王永诗, 石砥石, 等. 网毯式油气成藏体系——以济阳拗陷新近系为例 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 1-9.

KINEMATICS ANALYSIS OF KENDONG UPLIFT AND ADJACENT REGION, BOHAI BAY BASIN

Fu Zhaohui^{1,2}, Chen Fajing², Qin Weijun¹, Li Min³

(1 Strategic Planning Division, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2 School of Energy, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3 School of Software Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The Kendong Region is a new hydrocarbon exploration target in the central and southern Bohai Bay Basin. In order to study the tectonic characteristics and their bearing on hydrocarbon accumulation in the region for favorable traps, the types of block movement, especially the horizontal extensional movement and the tilting movement are carefully studied. Based on integrated geological and geophysical studies, the authors reached following conclusions. (1) The block movement in the Kendong Uplift and adjacent region is dominated by horizontal and extensional movement and tilting or rotating movement; (2) Through the study of extensional coefficient, fault growth index, fault throw and balanced cross section, it is revealed that the tectonic revolution in the Kendong Uplift and adjacent region is characterized by a strong movement in early stage and a weak movement in later stage; (3) The tilting movement in the region was controlled by the strike-slip and extensional movement of the Tanlu Fault, and had experienced four stages: single faulting in Mz-Ek, multiple single faulting in Es4, bilateral faulting in Es3-Es1, and weak extensional movement or dislocated down-warping in Neogene.

Key words: Kinematics Analysis; extensional movement; tilting movement; Kendong Region