

# 基于应力场模拟解释河西务构造带 孔店—沙四期断层特征

戴俊生<sup>1</sup>, 邹娟<sup>1</sup>, 赵贤正<sup>2</sup>, 芦丽菲<sup>2</sup>, 孙治华<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. 中国石油华北油田分公司, 河北 任丘 062552)

**摘要:**目前地震、测井等断层解释方法都存在难以解释断层成因机制等缺点,因此选用构造应力场数值模拟从动力学方面解释断层。通过分析河西务构造带断层分布特征及活动特征,发现孔店—沙四期,在构造带南部发育了一系列南东倾向的次级正断层,且断层在平面上呈雁列式展布。为了解释这些次级断层的成因机制,运用 Ansys 软件对河西务构造带孔店—沙四期的古应力场进行数值模拟,分析应力场的分布特征。结果表明:孔店—沙四期,最小主应力基本为张应力,最小主应力与最大主应力差值在构造带南部较高,控制形成次级断层;构造带南部平面剪应力为左旋,控制断层优势走向为 NE 向;剖面剪应力为左旋,控制断层优势倾向为 SE 向。

**关键词:**河西务构造带;断层特征;成因机制;应力场模拟

**中图分类号:** TE121

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-1926(2014)10-1529-08

**引用格式:** Dai Junsheng, Zou Juan, Zhao Xianzheng, *et al.* Fault characteristics interpretation of Ek-Es<sub>4</sub> sedimentary period in Hexiwu tectonic belt through stress field simulation[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(10): 1529-1536. [戴俊生, 邹娟, 赵贤正, 等. 基于应力场模拟解释河西务构造带孔店—沙四期断层特征[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(10): 1529-1536.]

## 0 引言

断层是涉及地震地质学、地震学及地球动力学中一系列理论问题的重要构造地质现象,在油田研究中,断层解释是整个构造解释的关键<sup>[1-2]</sup>。目前断层解释的方法很多,如地震解释方法:早期的常规三维地震解释,周期长,主观性强;Brown 等<sup>[3]</sup>提出了断层切片的方法,需要反复的生成断层切片,工作量更大,无法识别顺层断层;而后又出现了许多增强断层地震属性的方法,如 Bahorich 等<sup>[4]</sup>提出的地震相杆体技术,应用于断层识别<sup>[5]</sup>,Gao<sup>[6]</sup>、Chopra 等<sup>[7]</sup>应用纹理属性来识别断层,Lisle<sup>[8]</sup>论述了高斯曲率与张开裂缝之间的关系,逐渐将曲率运用到断层识别中,这些方法在时窗选取上存在一定问题,而且无

法消除噪音和残余厚度的影响;2000 年以后,许多断层自动或半自动识别方法陆续被提了出来,Randen 等<sup>[9]</sup>提出“人工蚂蚁”的方法,Jacquemin 等<sup>[10]</sup>使用双霍夫变换等,这些方法有效地压制了噪音的影响,但提取的断层比较零散,难以组合,受人为因素影响<sup>[11]</sup>。测井解释纵向分辨率较高,可以识别断层,但该方法需要准确确定标志层,需要较密集的井网资料<sup>[12]</sup>。Stanley 等<sup>[13]</sup>(20 世纪 70 年代)率先提出重力异常定量解释断层,但不适用于垂直断层。地震、测井、重力等方法在断层识别方面存在多解性,对微小断层识别存在一定困难,多限于解释断层的平面展布,而且难以从动力学机制上解释断层。目前有限元数值模拟应用广泛,以其定量性、离散逼近性等优势在油气田勘探开发中起着越来越重要的

收稿日期:2013-12-25;修回日期:2014-05-11.

基金项目:中国石油华北油田公司科技项目(编号:HBYS-WTY-2011-JS-303);国家重大科技专项(编号:2011ZX05042-001-001)联合资助。

作者简介:戴俊生(1958-),男,山东寿光人,教授,博士生导师,主要从事油气区构造解析、构造应力场及大地构造研究。

E-mail: djsh3@163.com.

作用:起于 20 世纪 30 年代的油藏数值模拟,采用有限元方法,通过大规模的计算,形象而直观地再现油水在地下的分布规律,从而研究剩余油饱和度,评价勘探潜力,提高采收率等;60 年代出现的构造应力场数值模拟,将岩石力学实验与有限元数值模拟相结合,通过定量计算构造应力场的空间分布,有效地预测裂缝和油气有利聚集区,为裂缝性及其他类型油气藏的勘探和开发提供了支持<sup>[14-16]</sup>。断裂构造的破裂和活动方向受形成该破裂时的构造应力场的制约,因此也可以通过应力场数值模拟实现从动力学机制上有效、客观地解释次级断层平面、剖面的发育特征以及成因机制等。

河西务构造带位于廊固凹陷东部,分隔廊固凹陷与武清凹陷,主要发育的断层走向为 NE 向(图 1)。孔店—沙四期河西务构造带内部发育了刘其营、半截河等一系列 NEE 走向的次级断层,与河西务断层斜交,构成了众多的断垒构造,是油气运移的主要指向区、富集区,这些断层的构造活动与油气运聚成藏息息相关<sup>[17-18]</sup>。

因此笔者将从动力学方面,通过对河西务构造带孔店—沙四期的构造应力场进行有限元数值模拟来分析该时期古构造应力场的分布特征,从而解释这些次级断层的发育特征以及成因机制,以便于更好地指导油气勘探。

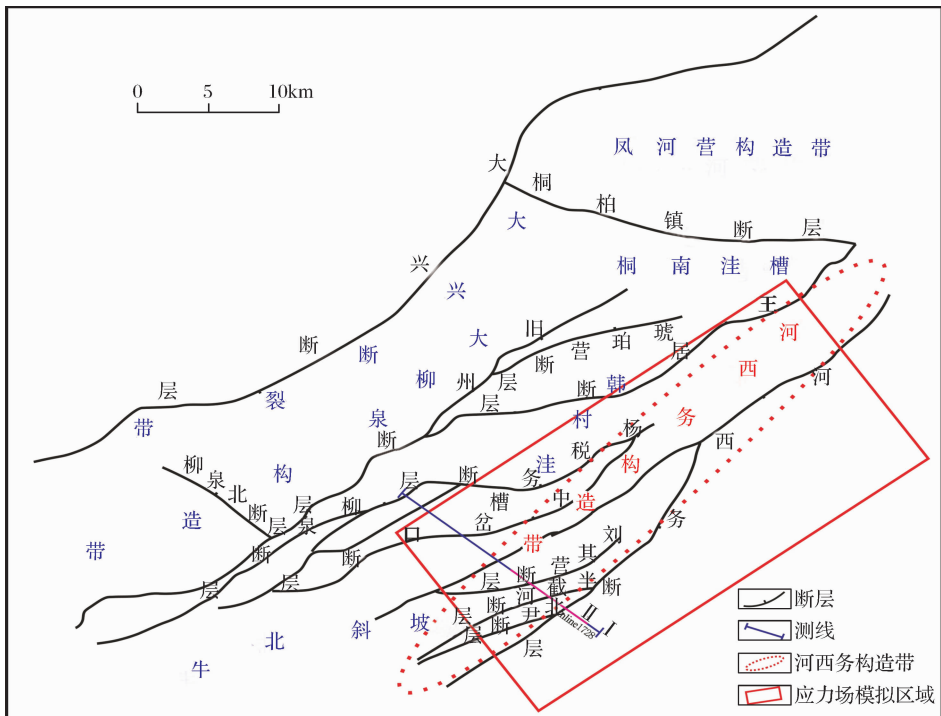


图 1 河西务构造带位置

Fig. 1 The position of Hexiwu tectonic belt

## 1 断层特征

### 1.1 断层分布特征

河西务构造带在河西务断层和杨税务断层 2 大边界断层的控制下发育了一系列分割断块区以及分割含油断块的次级断层。其中河西务断层为河西务构造带的主控断层,切割整个古近系—新近系地层,分隔河西务构造带与武清凹陷,断层走向总体呈 NNE 向,倾向为 SE 向,延伸距离长达 60km,断面较陡。

在孔店—沙四期,研究区主要发育一系列 NE

走向的次级断层,刘其营断层、半截河断层等相对较大的断层主要展布在构造带南部,低级序断层展布于整个研究区。构造带南部断层走向主要为 NEE 向,北部断层多以 NE 走向为主。其中刘其营断层面上陡下缓为犁式断层,由于局部拉张作用,在剖面上与半截河断层呈反“Y”字形组合;刘其营断层及西侧相邻的 2 条四级正断层倾向都为 SE 向,在剖面上相互平行排列,节节下掉,形成阶梯状组合(图 2)。平面上半截河断层等一系列性质相似、走向为 NEE 向、倾向为 SE 向的正断层彼此平行,在平面上呈雁列状展布;构造带中部四级断层斜交在刘其营

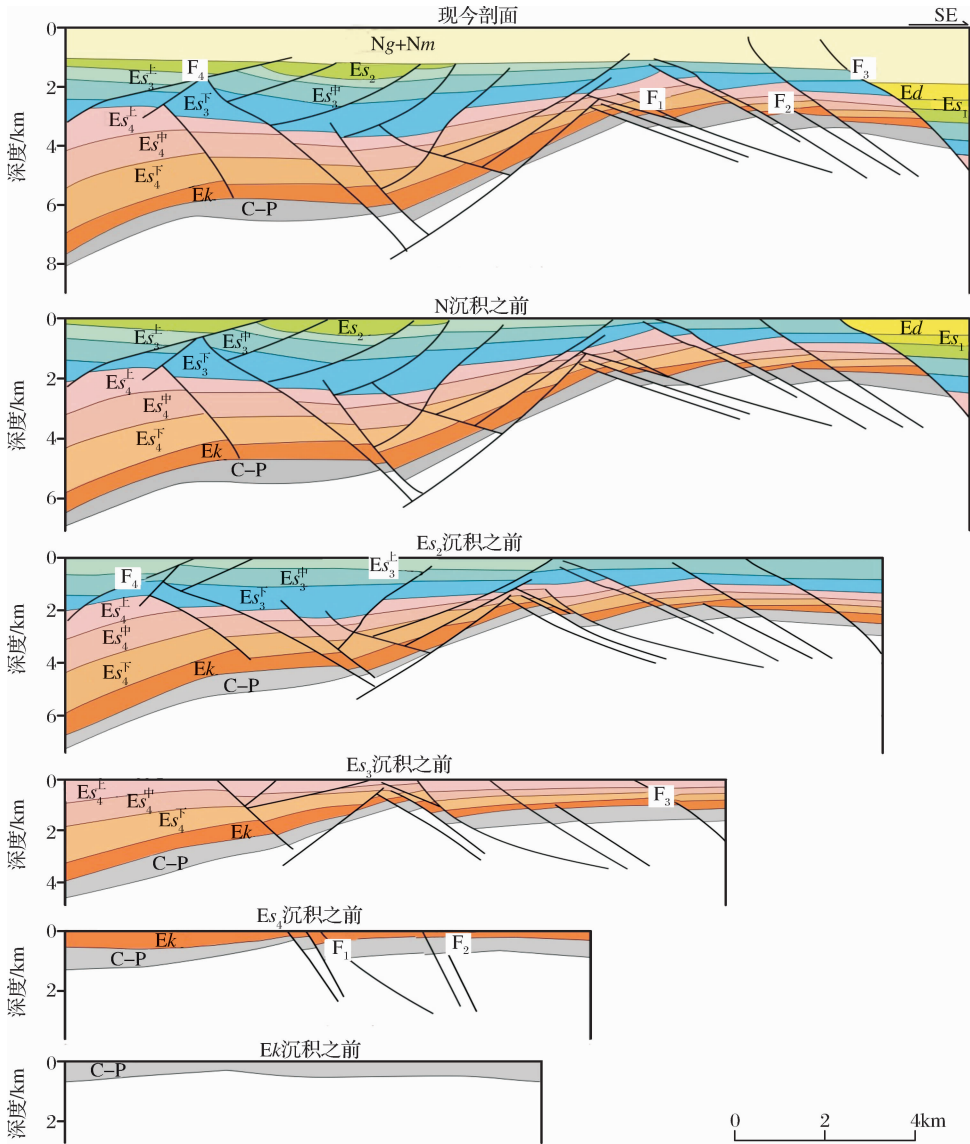


图2 廊固凹陷 1728 测线构造演化剖面(图 1 中测线 I)

Fig. 2 Tectonic evolution profile of seismic line 1728 ,Langgu Sag (line I in Fig. 1)

F<sub>1</sub>: 刘其营断层; F<sub>2</sub>: 半截河断层; F<sub>3</sub>: 河西务断层; F<sub>4</sub>: 杨税务断层

断层上,并且终止于刘其营断层,平面上呈斜交式展布(图 3)。

### 1.2 断层活动特征

河西务断层系沙四末期开始形成,沙三早期自北向南逐渐发育,向下切割古生界,此时活动较弱;沙二期河西务断层强烈活动,断距超过 5 000m,基底断块沿河西务大断层强烈抬升形成古潜山,不断遭受剥蚀,在剖面上河西务断层落差自深层到浅层基本是逐渐减少(图 2)。

孔店—沙四期在河西务构造带的南部发育了刘其营断层、半截河断层等一系列三级、四级断层。刘其营断层平均落差 130m,北部活动比南部稍强,半

截河断层南北活动强度差异不大,落差 170m 左右。该时期研究区多数断层落差不超过 200m,延伸长度基本不超过 10km,构造活动较弱(图 3)。

### 1.3 断层对应力场方向的指示作用

包括共扼节理、共扼断层面、断层产状、擦痕、褶皱及缝合线等在内的构造形迹都可以作为判断构造应力场状态的依据。断层是构造应力作用在地壳表面的表现形式,构造应力状态直接决定在其作用下所产生断层的几何形状。因此,通过对研究区内断层性质、形态及组合规律的分析,可以判断出古构造应力场的分布及演化历程,反演出断层形成时期的构造应力场状态<sup>[19-20]</sup>。

一级、二级断层多为继承性断层,三级、四级等次级断层往往是由该时期构造应力场控制产生的新断层。一个地区,尽管单条断层走向的变化具有随机性,但断层分布格局总体都呈现某种规律性。对研究区孔店一沙四期所有三级、四级断层走向进行统计,绘制断层走向玫瑰花图(图4),断层优势走向为NE55°—SW235°,根据安德生模式,当 $\sigma_1$ 直立, $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 水平时形成正断层,且 $\sigma_2$ 与断层走向呈水平平行, $\sigma_3$ 与断层走向呈水平垂直。因此河西务构造带孔店一沙四期最小主应力( $\sigma_3$ ,即张应力)方向为NW325°—SE145°。

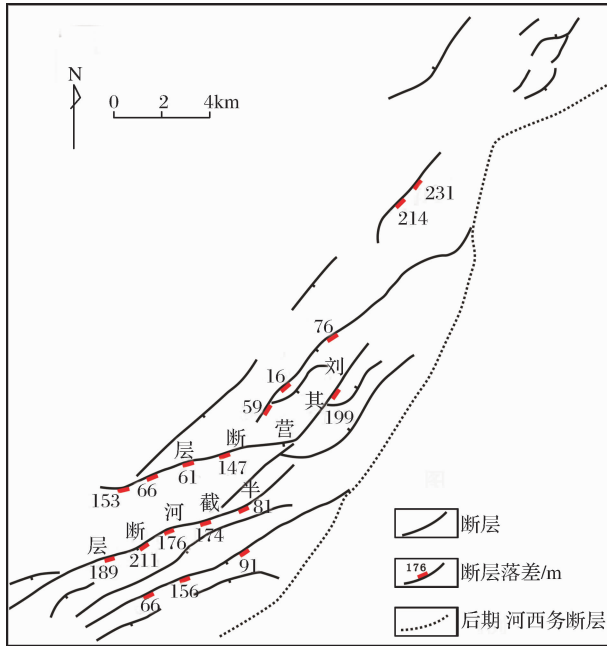


图3 河西务构造带孔店一沙四期断层落差  
Fig. 3 Faults throw graph of Hexiwu tectonic belt of Ek-Es<sub>4</sub> sedimentary period

## 2 孔店一沙四期应力场数值模拟

孔店一沙四期在河西务构造带南部发育的一系列NEE走向的次级正断层,与河西务断层斜交,构成了众多的断垒构造圈闭,控制着油气的运聚成藏。因此运用Ansys软件建立地质模型进行古构造应力场数值模拟,来解释这些次级正断层的发育特征、成因机制等至关重要。

### 2.1 模型建立

模型的建立以沙四段底面构造图为基础,以工区三维地震边界为参考模型边界。根据断层走向的统计结果,将模型平面上设置为长边延伸方向为NE55°的矩形,以便于力的加载。为了消除边界效应,平面范围要适当的大于河西务构造带的范围,最

终设置模型长边为28km,短边为13km,根据孔店一沙四期的沉积特征,将模型的厚度设置为1km,三维模型体积设为364km<sup>3</sup>。

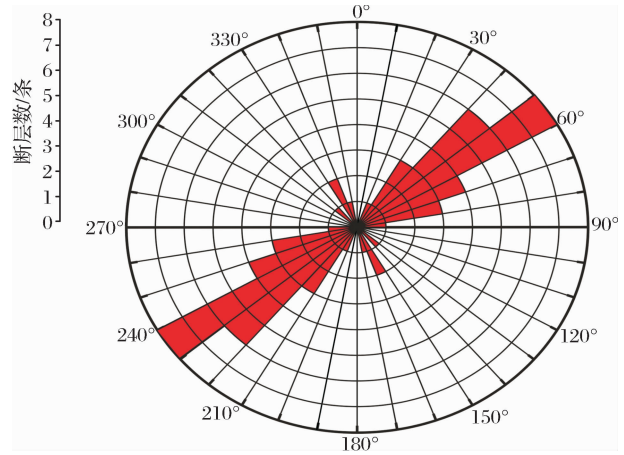


图4 孔店一沙四期断层走向玫瑰花  
Fig. 4 Rose diagram of faults strike of Ek-Es<sub>4</sub> sedimentary period

不同构造单元力学性质不同,一般断裂带较正常沉积地层强度更弱,凹陷区地层较凸起区地层强度更强<sup>[21-22]</sup>。根据河西务构造带的实际情况,此时期杨税务断层及河西务断层并未形成,经简化抽象,将整个构造带地区都赋予统一的沉积地层参数值。力学参数的大小参照部分实验测试(表1)<sup>[23-25]</sup>。在加载力学参数的基础上,采用Solid45单元进行网格划分,共划分出22 140个单元,参与运算的节点共5 955个。

表1 河西务构造带构造应力场模拟力学参数  
Table 1 Mechanical parameters simulating structural stress field of Hexiwu tectonic belt

	泊松比( $\mu$ )	弹性模量(E)/GPa	密度( $\rho$ )/(kg·m <sup>-3</sup> )
地层	0.15	2.6	2 400
断层	0.20	2.2	2 300

### 2.2 力的加载及边界约束

根据断层走向玫瑰花图,结合应变椭球体,分析河西务构造带孔店一沙四期最小主应力(即张应力)方向为NW325°—SE145°。根据古应力、应变的分析,不断改变模型加载,选择一种最为合理的加载方式。廊固凹陷处于整体拉张应力环境下,张应力分量最大不超过4MPa(岩石抗拉强度在2MPa左右),否则就会产生较大的拉张量,断层活动过于剧烈,因此古构造应力场的大小取值在2~3MPa之间为宜,孔店一沙四期,断层活动相对微弱,因此在模

型北西、南东界面施加 2.2MPa 拉张力;孔店—沙四期,河西务构造带东部发生翘倾,因此在模型底面河西务构造带东部位置施加 30MPa 上拱力,来表征东部抬升的影响;依据模型厚度,在模型顶面施加 6MPa 的压力,消除地表影响;重力由岩层密度和重力加速度计算得出,Ansys 程序自动产生。另外在模型底面北西、南东两侧边界线施加 Z 方向约束,满足有限元分析要求。

### 2.3 模拟结果

河西务构造带孔店—沙四期最小主应力基本为正值(张应力),方向整体为 NW—SE 向,河西务断层位置最小主应力方向较周围区域有所变化,向逆时针方向偏转,呈近 EW 向[图 5(a)]。最大主应力全为负值(压应力),高值区位于河西务构造带南部,向周围呈环带状分布,逐渐减小,低值区位于河西务断层位置,方向基本垂向[图 5(b)]。

平面剪应力在河西务构造带以正值(左旋)为主,高值区位于构造带南部,向北呈环带状分布,数值递减,仅在河西务断层位置出现负值(右旋)[图 5(c)]。最小主应力与最大主应力的差值,在河西务构造带南部出现高值区,与次级断层聚集处对应,向北差值逐渐减少。模型南部 NW—SE 向剖面剪应力在后期河西务断层发育位置周边(构造带南部)为正值(左旋),向 NW 方向剖面剪应力转变为负值(右旋)。

### 2.4 应力场的分布对次级断层的解释

#### 2.4.1 最大最小主应力差值控制次级断层发育程度

构造应力场数值模拟中通常采用格里菲斯准则作为张破裂计算准则,用库伦—莫尔准则作为剪切破裂计算准则<sup>[26-27]</sup>。该研究区岩石的破坏主要是剪切破坏,根据库伦—莫尔准则,当某截面上  $\tau \geq |\tau|$  ( $\tau$  为截面上剪应力,  $|\tau|$  为临界剪应力)时,该截面发生剪切破坏,其中  $\tau$  用主应力表示为  $\tau = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \sin 2\alpha$

( $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为最大和最小主应力,  $\alpha$  为破裂面法线与最大主应力间的交角),  $\sigma$  变化不大,因此差应力是影响岩石发生剪切破裂的关键因素,差应力值越大,岩石的剪切破裂程度就越强<sup>[28]</sup>。且模拟结果显示  $\sigma_1$  直立、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  水平,据安德森模式,  $\sigma_1$  逐渐增大或  $\sigma_3$  逐渐减小时,会导致正断层的形成<sup>[19]</sup>,即最大最小主应力差值对断层发育程度影响最为显著,最大最小主应力差的高值区,利于次级断层的发育。河西务构造带南部,最大主应力与最小主应力的差值较大,控制产生了一系列次级正断层,如刘其

营断层、半截河断层等,并且随着最大最小主应力差值向周围呈环带状减小,次级正断层发育程度减弱<sup>[29]</sup>(图 6)。

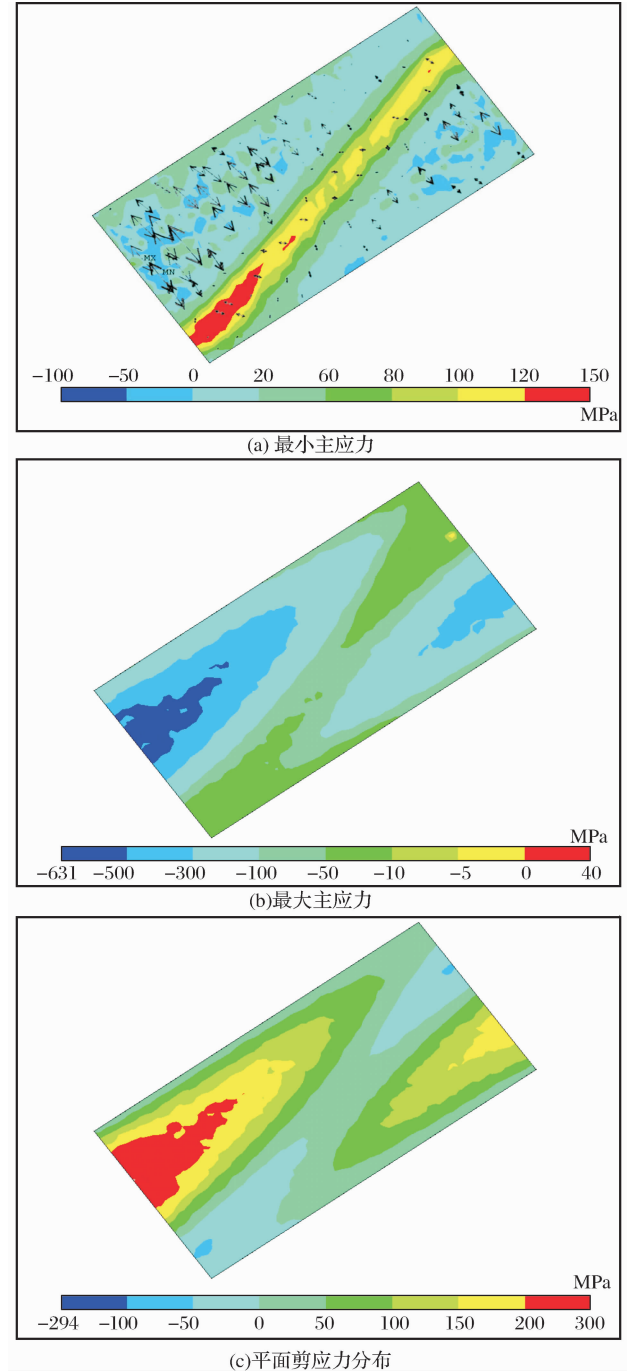


图 5 河西务构造带孔店—沙四期平面应力分布  
Fig. 5 Plane stress distribution of Hexiwu tectonic belt of Ek-Es<sub>4</sub> sedimentary period

#### 2.4.2 平面剪应力控制次级断层走向

断层走向线是指断层面与水平面的交线,平面应变椭圆中,2 组共轭剪切破裂线代表着 2 组断层的走向线<sup>[28]</sup>。受平面剪应力分布的控制,2 组断层

的发育程度通常不同,在左旋平面剪应力环境中具有左旋性质的一组断层发育程度高,同样在右旋平面剪应力环境中具有右旋性质的一组断层发育程度高。

河西务构造带孔店一沙四期整体是受 NW—SE 向拉张,平面应变椭圆长轴为 NW—SE 向,短轴为 NE—SW 向,左旋剪切破裂线为 NEE 向,右旋剪切破裂线为 NNE 向。河西务构造带南部,该时期平面剪应力为正值(左旋),即该区处于左旋平面剪应力环境中。因此在左旋剪应力控制下,构造带南部发育了一系列优势走向为 NEE—SWW 向的次级断层,并且由于应力场中剪应力的作用,使得断层具有较强的走滑性质,在平面上呈雁列式分布(图 7)。

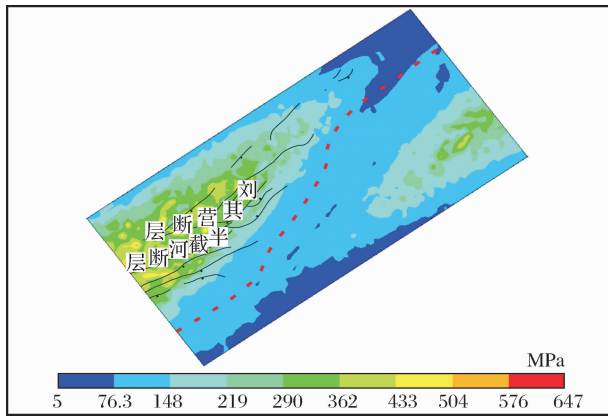


图 6 河西务构造带孔店一沙四期最大与最小主应力差值  
Fig. 6 The difference between the minimum and maximum principal stress of Hexiwu tectonic belt of Ek-Es<sub>4</sub> sedimentary period

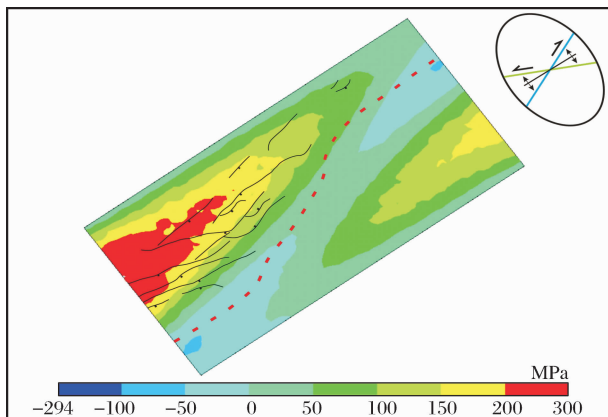
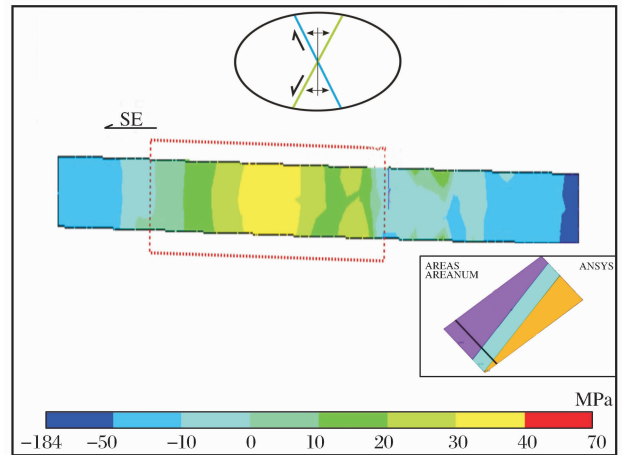


图 7 河西务构造带孔店一沙四期平面剪应力与断层分布  
Fig. 7 Plane shearing stress and faults distribution of Hexiwu tectonic belt of Ek-Es<sub>4</sub> sedimentary period

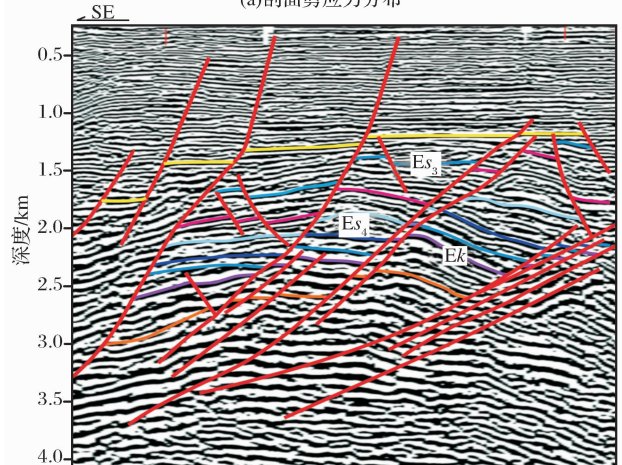
2.4.3 剖面剪应力控制次级断层倾向  
应变椭球体中 2 组剪切破裂面具有共轭性,其

钝夹角被最小主应力所平分,一组剪切破裂面具有左旋性质,另一组剪切破裂面表现为右旋性质。所有破裂面均包含或平行  $\sigma_2$  所在的轴<sup>[30]</sup>,因此以最小主应力  $\sigma_3$  方向为长轴,以最大主应力  $\sigma_1$  方向为短轴,垂直于  $\sigma_2$  方向的剖面应变椭圆中,剪切破裂线可以代表断层的视倾斜线,从而确定断层的视倾向。

孔店一沙四期研究区 NW—SE 向剖面的应变椭圆长轴(即张应力  $\sigma_3$  方向)为 NW—SE 向,短轴为垂向(即重力方向),该时期研究区 NW—SE 向剖面在河西务构造带南部靠近后期河西务断层发育位置的剖面剪应力为正值即左旋剪应力,根据剖面应变椭圆所示左旋剪切破裂线向 SE 方向倾。因此控制该区发育的次级正断层的视倾向为 SE 向[图 8(a)],与实际地震剖面相符合[图 8(b)]。



(a)剖面剪应力分布



(b)对应位置地震剖面

图 8 河西务构造带南部 NW—SE 向剖面中孔店一沙四期剪应力分布及对应位置地震剖面(图 1 中测线 II)  
Fig. 8 Shear stress distribution of NW-SE profile in the south of Hexiwu tectonic belt of Ek-Es<sub>4</sub> sedimentary period and seismic profiles of corresponding location(line II in Fig. 1)

### 3 结论

(1)河西务构造带孔店—沙四期,在构造带南部发育了刘其营断层、半截河断层等一系列次级正断层,平面上呈雁列式、斜交式组合,剖面上呈阶梯状、反“Y”字形组合,经统计该区断层走向主要为NE55°—SW235°,最小主应力方向为NW325°—SE145°。

(2)孔店—沙四期最小主应力基本为NW—SE向张应力;最小主应力与最大主应力的差值在河西构造带南部出现高值区,控制该区发育了一系列次级正断层,差应力值向四周呈环带状减小,次级断层发育程度随之减弱;构造带南部平面剪应力为正值即左旋剪应力,控制次级断层的优势走向为NEE—SWW向;次级断层发育处NW—SE向剖面剪应力为正值即左旋剪应力控制断层的倾向为SE向。

#### 参考文献(References):

- [1] Nie Chunlin. Study on the fault interpretation of the combination of well and seismic[J]. China Science and Technology Review, 2012, 28: 76-77. [聂春林. 井震结合断层解释方法研究[J]. 中国科技博览, 2012, 28: 76-77.]
- [2] Fan Guangming, Zhu Zhicheng. The progress and tendency of fault research[J]. Advance in Earth Sciences, 1992, 7(6): 25-30. [樊光明, 朱志澄. 断裂构造研究的进展和趋势[J]. 地球科学进展, 1992, 7(6): 25-30.]
- [3] Brown A R, Edwards G S, Howard R E. Fault slicing: A new approach to the interpretation of fault detail[J]. Geophysics, 1987, 52(10): 1319-1327.
- [4] Bahorich M, Farmer S. 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube[J]. The Leading Edge, 1995, 14(10): 1053-1058.
- [5] Cai Gang, Sun Dong, Pei Mingli, *et al.* Coherence cube technique and its application in hydrocarbon exploration field[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(4): 510-513. [蔡刚, 孙东, 裴明利, 等. 相干体技术及其在油气勘探中的应用[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(4): 510-513.]
- [6] Dengliang Gao. The first-order and the second-order seismic textures[J]. AAPG Abstracts with Programs, 1999, 8: 45.
- [7] Chopra S, Alexeev V. Application of texture attribute analysis to 3D seismic data[J]. The Leading Edge, 2006, 25(8): 934-940.
- [8] Lisle R J. Detection of zones of abnormal strains in structures using gaussian curvature analysis[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(2): 1811-1819.
- [9] Randen T, Pedersen S, Sonneland L. Automatic Extraction of Fault Surfaces from Three-dimensional Seismic Data[C]. 71st Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2001: 55-554.
- [10] Jacquemin P, Mallet J L. Automatic Faults Extraction Using Double Hough Transform[C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2005: 755-759.
- [11] Wang Wei. Technology of Seismic Geometric Attributes for Fault Identification and Its Application[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2009: 5-58. [王伟. 地震几何属性识别断层技术研究及应用[D]. 青岛: 中国石油大学, 2009: 5-58.]
- [12] Logging Unit of the Third Coal Geological Prospecting Party in Hunan Province. Early to talk about the fault log interpretation[J]. Coal Geology & Exploration, 1978, (6): 38-42. [湖南省第三煤田地质勘探队测井组. 测井解释断层初谈[J]. 煤田地质与勘探, 1978, (6): 38-42.]
- [13] Stanley J M, Green R. Gravity gradients and interpretation of the truncated plate[J]. Geophysics, 1976, 41(6): 1370-1376.
- [14] Sun Xiaoping. Present situation and prospect of application for finite element numerical simulation of palaeotectonic stress fields[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2008, 15(3): 31-33. [孙晓庆. 古构造应力场有限元数值模拟的应用及展望[J]. 断块油气田, 2008, 15(3): 31-33.]
- [15] Jin Yanxin, Lin Chengyan, He Xiaoyan, *et al.* Uncertainty analysis of remaining oil predicted with reservoir numerical simulation[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2004, 28(3): 22-29. [靳彦欣, 林承焰, 贺晓燕, 等. 油藏数值模拟在剩余油预测中的不确定性分析[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(3): 22-29.]
- [16] Qin Baiping, Lü Xiuxiang, Zhang Zhenhong, *et al.* Numerical simulation study and development meaning of Chang 1 reservoir in Ding 31 well area of Youfangzhuang Oilfield in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(5): 531-535. [秦百平, 吕修祥, 张振红, 等. 油气藏数值模拟及其对开发的意义——以鄂尔多斯盆地油房庄油田定 31 井区长 1 油藏为例[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(5): 531-535.]
- [17] Zhang Le, Jiang Zaixing, Guo Zhenting. Relationship between structural stress and hydrocarbon bearing pool formation[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(1): 32-36. [张乐, 姜在兴, 郭振廷. 构造应力与油气成藏关系[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(1): 32-36.]
- [18] Cai Youxing. Characteristics of fault developed in Jiyang Sag and its control over hydrocarbon migration and accumulation[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1): 56-61. [蔡佑星. 济阳坳陷断裂发育特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(1): 56-61.]
- [19] Du Zitu, Chen Jianqiang, Wang Xunlian, *et al.* Brush structure and its genetic mechanism on the northern margin of the Luxi Uplift[J]. Regional Geology of China, 1999, 18(3): 329-333. [杜子图, 陈建强, 王训练, 等. 鲁西隆起北缘帚状构造的厘定及成因机制[J]. 中国区域地质, 1999, 18(3): 329-333.]
- [20] Dai Junsheng. Structural Geology and Tectonics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 35-62. [戴俊生. 构造地质学及大地构造[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 35-62.]
- [21] Wang Hongcai, Wang Wei, Wang Lianjie, *et al.* Three dimensional tectonic stress field and migration of oil and gas in Tan-

- hai[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(2): 175-178. [王红才, 王薇, 王连捷, 等. 油田三维构造应力场数值模拟与油气运移[J]. *地球学报*, 2002, 23(2): 175-178.]
- [22] Shang Lin, Dai Junsheng, Jia Kaifu, *et al.* Numerical simulation for the distribution of different levels of tectonic fractures in carbonate buried hills; Taking Futai Oilfield in Bohai Bay Basin as an example[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(6): 1260-1267. [商琳, 戴俊生, 贾开富, 等. 碳酸盐岩潜山不同级别构造裂缝分布规律数值模拟——以渤海湾盆地富台油田为例[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(6): 1260-1267.]
- [23] Song Shujun. Four-dimensional Stress Field Model and Reservoir Prediction of Complex Fault Block Group[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003; 63-67. [宋书君. 复杂断块群四维应力场模型及油藏预测[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003; 63-67.]
- [24] You Mingqing. Effect of confining pressure on the Young's modulus of rock specimen[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(1): 53-60. [尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(1): 53-60.]
- [25] Bandis S C, Lumsden A C, Barton N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 1983, 20(6): 249-268.
- [26] Dai Junsheng, Wang Bifeng, Ma Zhanrong. Research on cracking principles of brittle low-permeability sands[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(4): 393-395. [戴俊生, 汪必峰, 马占荣. 脆性低渗透砂岩破裂准则研究[J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(4): 393-395.]
- [27] Feng Jianwei, Dai Junsheng, Ma Zhanrong, *et al.* The theoretical model between fracture parameters and stress field of low-permeability sandstones[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(4): 664-671. [冯建伟, 戴俊生, 马占荣, 等. 低渗透砂岩裂缝参数与应力场关系理论模型[J]. *石油学报*, 2011, 32(4): 664-671.]
- [28] Hasanpour R, Choupani N. Rock fracture characterization using the modified Arcan test specimen[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(2): 346-354.
- [29] Xia Bin, Qiu Liangbin, Cai Zhouong, *et al.* Characteristics of stress field and mechanism of "S" structure pattern in Xujia-wei rift sag[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(3): 415-419. [夏斌, 邱亮斌, 蔡周荣, 等. 徐家围子断陷应力场变化特征及"S"型构造格局成因探讨[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(3): 415-419.]
- [30] Wang Zhengrong. Plane projection of strain ellipsoid and its application in geologic structure analysis[J]. *Coal Technol*, 2006, 25(1): 92-95. [王正荣. 应变椭球体平面投影及在构造分析中的应用[J]. *煤炭技术*, 2006, 25(1): 92-95.]

## Fault Characteristics Interpretation of Ek-Es<sub>4</sub> Sedimentary Period in Hexiwu Tectonic Belt through Stress Field Simulation

DAI Jun-sheng<sup>1</sup>, ZOU Juan<sup>1</sup>, ZHAO Xian-zheng<sup>2</sup>, LU Li-fei<sup>2</sup>, Sun Zhi-hua<sup>2</sup>

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

2. Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu 062552, China)

**Abstract:** Some fault interpretation methods are difficult to explain the mechanism of fault, such as seismic, logging and so on, therefore, we choose the tectonic stress field numerical simulation to explain the the dynamics of the fault. Through the analyses of distribution and activity characteristics of the faults in Hexiwu tectonic belt, we find a series of secondary normal faults in the southern part of Hexiwu tectonic belt, which are northeast-trending, southeast-dipping and distribute in echelon form in the plane during Ek-Es<sub>4</sub> sedimentary period. In order to explain the formation mechanism of these secondary faults, we simulated the stress field of Hexiwu tectonic belt of Ek-Es<sub>4</sub> sedimentary period using Ansys software and analysed the distribution characteristics of stress field. The results show that: the minimum principal is mainly tensile stress; the difference between minimum and maximum principal stress is large in the southern part of the tectonic belt, which control the formation of secondary faults; the strike of the faults is northeast, which is controlled by plane sinistral shear stress; the faults are southeast-dipping, which is controlled by profile sinistral shear stress.

**Key words:** Hexiwu tectonic belt; Fault characteristics; Formation mechanism; Stress field modeling