

渤海湾盆地南堡凹陷3区多期叠加断裂体系形成机制

冯建伟¹, 王志坤², 商琳²

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

2. 中国石油冀东油田分公司勘探开发研究院, 河北 唐山 063004]

摘要:针对渤海湾盆地南堡凹陷3区内广泛发育的多期叠加断裂体系形成机制及演化过程不清的问题,以构造地质学、地质力学理论为指导,采用三维地震解释、构造物理模拟、有限元数值模拟等综合、联合技术,梳理断裂几何特征及组合样式,恢复不同构造活动期的应力状态,分析平面上变应力场条件下的断裂形成演化规律,探讨垂向上断陷盆地深部先期构造对晚期断裂形成和演化的控制作用,建立研究区多期叠加断裂体系动力学模式。结果表明:以沙河街顶不整合为界分为上、下两套断裂系统,常呈现为“X”型叠加样式,中间具短期反转特征,上部为SN向伸展兼左旋走滑的复合断裂系统,力学机制为纯剪,下部为NW-SE向伸展断裂系统,力学机制为单剪。叠加断裂体系的发育主要受控于地质力学层分布、晚期应力强度、先期断裂与后期应力方向之间的夹角。先期断裂的存在影响着局部应力场的重新分布以及后期断裂的发育,晚期断裂要么继续扩展,要么产生新的断裂。以不整合面为主要特征的岩层界面作为一种力学薄弱面,受力作用时,容易发生“变形不协调或滑移”现象,使得断裂发育在垂向上具有明显的不连续性或间断性;区域上,多期叠加断裂系统的形成和发育直接受控于郑庐断裂古近纪以来构造应力场的转变。

关键词:叠加断裂;形成机制;物理模拟;数值模拟;南堡凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Genetic mechanisms of superimposed fault systems in Block 3 of Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

Feng Jianwei¹, Wang Zhikun², Shang Lin²

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

2. Exploration and Development Research Institute, Jidong Oilfield Branch, PetroChina, Tangshan, Hebei 063004, China)

Abstract: This research focuses on investigating the genetic mechanisms and evolutionary processes of the superimposed multi-stage fault systems in Block 3 of Nanpu Sag, Bohai Bay Basin. The workflow herein adopted a variety of modern techniques such as 3-D seismic interpretation, physical simulation of structure and finite element numerical simulation, and took the theories of structural geology and geomechanics as guidance. We recognized the geometry and combination modes of faults, restored the paleostress state of different tectonic periods, analyzed the development and evolution patterns of faults under variable stress field, discussed the control of pre-existing structures on later fault formation and evolution, and established geodynamic models of the superimposed multi-stage fault systems in the study area. The results showed that, bounded by unconformity on the top of Shahejie Formation, the X-pattern normal faults could be divided into two vertically superposed fault systems with short-term inversion characteristics. The upper tone is a SN-trending composite extensional and sinistral strike-slip fault system with pure shear deformation being predominant, while the lower tone is a NW-SE-trending extensional fault system with single shear deformation being predominant. Distribution of geomechanical layers, later tectonic stress intensity, and angle between pre-existing fault strike and later principle stress direction were regarded as the three main factors controlling the development of superposed fault systems. The pre-existing faults could influence the redistribution of local stress field and the development of later faults, which either continued to expand along early faults, or created new faults. As a mechanical weak surface, the unconformity was easy to generate uncoordinated de-

收稿日期:2015-08-03;修订日期:2017-08-10。

第一作者简介:冯建伟(1979—),男,副教授,构造地质学。E-mail:linqu_fengjw@126.com。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(17CX05010);国家自然科学基金项目(41572124);国家科技重大专项(2016ZX05047-003, 2016ZX05014002-006)。

formation or slipping, resulting in significant vertical discontinuous development of faults. Regionally, the formation and evolution of the superimposed fault system in Block 3 of Nanpu Sag was directly controlled by transition of tectonic stress field by Tan-Lu fault since the Paleogene.

Key words: superimposed faults, genetic mechanism, physical simulation, numerical simulation, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

我国内陆大部分含油气盆地基本上都属于叠合盆地,其形成和发展演化受控于中国区域大地构造的发展具有多旋回性^[1-2]。南堡凹陷是作为渤海湾盆地北侧的一个小型含油气凹陷,油气资源十分丰富,具有多期成盆、多期成藏、复式聚集的含油气特点^[3]。南堡凹陷3区位于凹陷东南部,为凹陷内的一个局部构造带,自白垩纪以来,经历了古近纪断陷发育和新近纪拗陷发育两个阶段(图1),最终形成了沙河街组一段顶部区域不整合和以此为分界的上、下两套断裂体系,如沙河街组的地堑-地垒体系为和东营组的半地堑体系,两者在垂向上构成“X”型和“Y”型叠加构造,共同控制着油气的运移和空间分布。前人多认为这种剖面“X”型断裂样式属于正常均匀伸展背景下的一种“共轭”断裂类型^[4-5],也有人认为它可以分为对称性和非对称性两种形态,主要受控于地壳的纯剪变形,并以构造物理模拟实验进行了有效验证,还有人认为这是由

于基底先存构造对裂陷盆地断裂的强烈控制作用所致^[6],并应用脆性断裂新理论阐述了其中的力学机理。本次研究主要在南堡凹陷3区东营组和沙河街组构造解释的基础上,分析断裂几何特征及组合关系,结合构造演化恢复构造关键期应力状态,基于构造复合叠加理拟实验和有限元数值模拟相结合的方法,定量研究变化应力场环境下不同地质力学层之间的“变形不协调效应”^[7],探讨基底先存构造对裂陷盆地断裂形成和演化的控制作用规律,为下一步的中深层油气勘探和成藏模式建立提供指导。

1 基本地质特征

根据断裂几何特征和成因机制分析,南堡凹陷3区断裂样式主要划分为3种基本类型,分别为伸展构造样式、张扭构造样式和挤压构造样式,进一步可细分

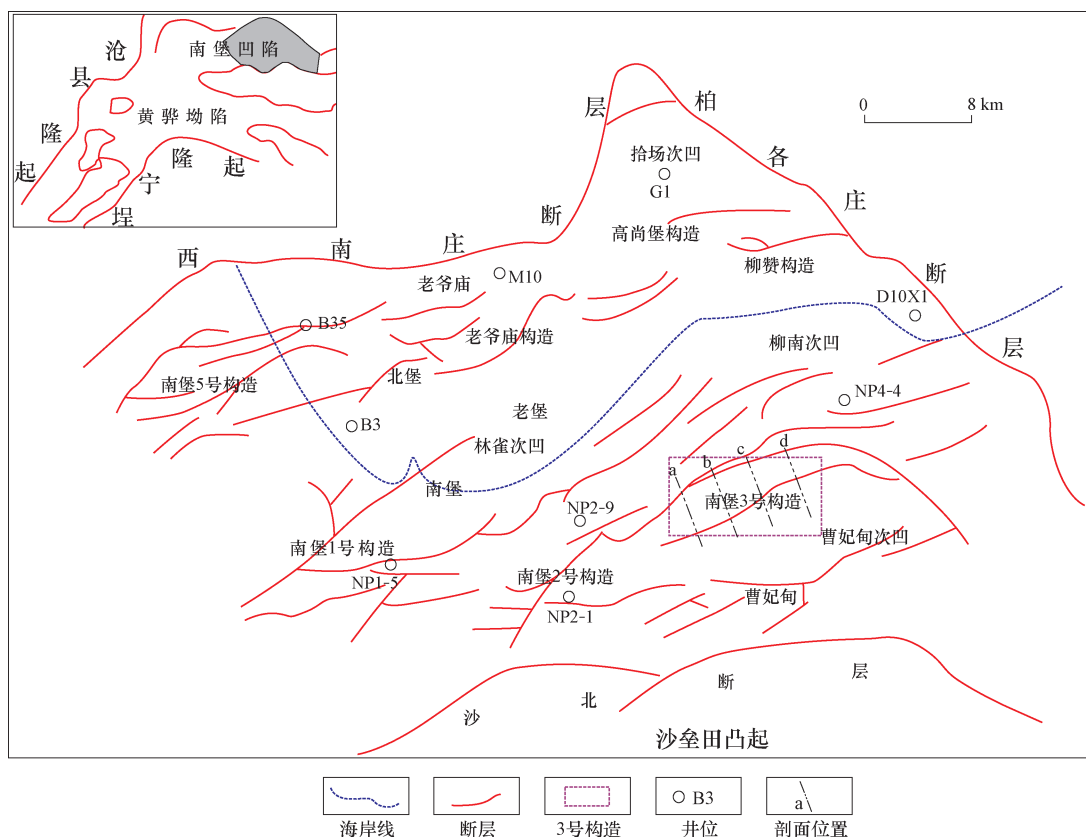


图1 南堡凹陷区域构造简图

Fig. 1 Regional structural diagram of Nanpu Sag

为 12 种局部构造样式,即“Y”形组合、“入”字形组合、断阶组合、地堑组合、地垒组合、调节型、逆牵引型、差异压实型、韧性剪切带、垂向剪切型和反转型。从层间分布来看,上部东营组单断裂类型主要为板状和铲状形态,前者活动时间较短,后者时间较长,且断裂样式在剖面上的特有形态与平面上的形态一一对应,如剖面上的“Y”形或反“Y”形断裂^[8-9],在平面上则表现为斜交式组合,剖面上的同向断阶组合断裂,在平面上则表现为雁列式展布,剖面上的反向断阶组合断裂,在平面上则呈平行式排列,剖面上为的地堑或白菜心式断裂,在平面则呈平行式或斜交式展布,剖面上的调节型断裂,平面上则呈正交式或分叉式组合等(图 2)。下部沙河街组单断裂类型主要为铲式和躺椅式,代表了长期活动特征,且后者比前者活动时间更长。剖面上的“入”字型的断裂,在平面上则为斜交式组合,剖面上的地垒式组合断裂,在平面上则呈平行式排列,剖面上的垂向剪切型断裂,在平面上则呈雁列式展布等。由此可见,研究

区以沙河街顶部不整合面为界分为上、下两套断裂系统,上部东营组为一套 SN 向伸展兼具左旋走滑的复合断裂系统,力学机制为纯剪,下部沙河街组为一套 NW – SE 向伸展断裂系统,力学机制为单剪,总体上构成了一套“X”型深浅叠加变形组合,中间存在短期的反转现象(图 2)。根据南堡凹陷中央隆起带剖面断裂特征,“X”型断裂组合具有非对称与对称两种形式,一种表现为下部一支由一条大断距断裂构成,其余各支均由多条小断距断裂构成;另一种表现为下部两支均为大断距断裂,上部两支由多条小断裂构成,最后这些断裂及其组合相互连锁构成更复杂的“X”构造样式^[3]。

2 叠加断裂形成机制

叠加断裂实际上属于一种纵向上先存断裂与晚期断裂之间相互影响、改造的叠合系统,其形成机制在于两套地质力学层之间的强度差异及应力状态的改变。

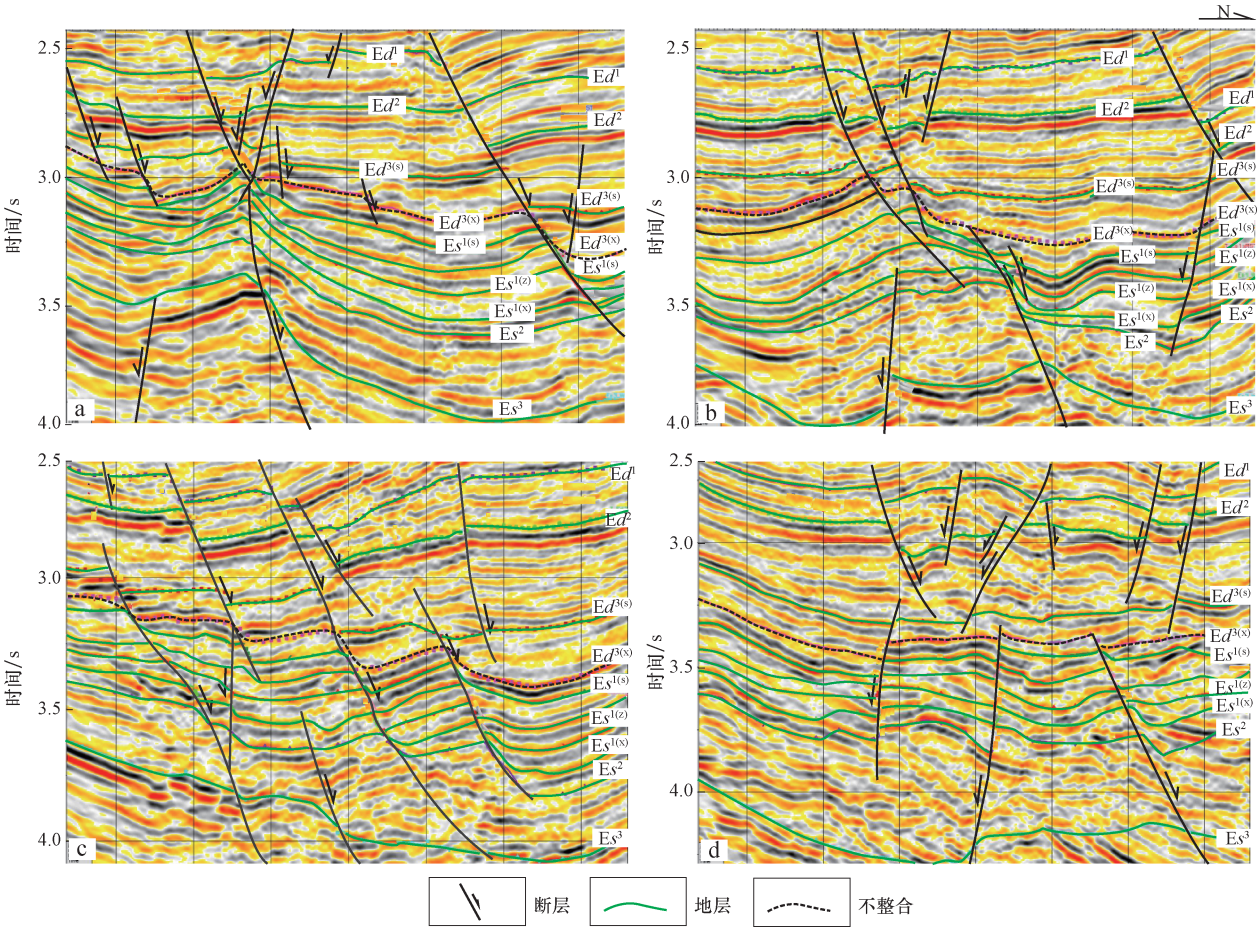


图 2 南堡凹陷 3 区叠加断裂体系地震解释结果(南北向剖面)

Fig. 1 Superimposed fault systems interpreted on seismic section (south-north) in Block 3 of Nanpu Sag
a—d. 地震剖面位置如图 1 中所示

Ed¹. 东营组一段底;Ed². 东营组二段底;Ed^{3(s)}. 东营组三段上砂层组底;Ed^{3(x)}. 东营组三段下砂层组底;Es^{1(s)}. 沙河街组一段上砂层组底;Es^{1(z)}. 沙河街组二段中砂层组底;Es^{1(x)}. 沙河街组一段下砂层组底;Es². 沙河街组二段底;Es³. 沙河街组三段底

具有先存断裂的地层在受到后期应力作用下发生破裂,有时可以沿先存断裂扩展,有时是完整的地层产生新的破裂^[10]。从破裂机理来看,此种情况可细分为两类:张破裂和剪破裂。

2.1 晚期张破裂

根据原始地层的强度变化以及应力方向与先存断裂之间的夹角关系,张破裂又可以细分为两种成因类型:沿先存断裂张开型和完整地层破裂型。当先存断裂被后期流体或角砾岩胶结充填时,有一定的抗拉强度,当先存断裂未被充填而开启时,抗拉强度几乎为零。因此由于先存断裂的存在,会造成地层抗张强度远远降低,当受到后期张应力作用时,如果张应力方向与先存断裂走向垂直,最容易发生沿先存断裂扩展的张破裂^[10]。在三向不等的应力场作用下,也可以造成地层发生张破裂,条件是在最小主应力方向上产生张应变,张破裂的延伸方向与最大主应力方向平行。

2.2 晚期剪破裂

在受到后期三轴不等压应力场作用下,具有先存断裂的地层既可以发生沿先存断裂的剪切破裂,也可以发生完整地层的剪切破裂,而产生新的断裂。沿先存断裂的剪切破裂主要取决于先存断裂的强度,完整地层的剪切破裂主要取决于地层的强度,而且与后期应力场方向与先存断裂的夹角有关。假设地层中有一组与最大主平面呈 α 角的先存断裂(图3a),先存断裂的强度曲线为图3a中斜线1,地层强度曲线为图中斜线2。在最小主应力不变时,在最大主应力作用下地层发生剪切破裂具有以下几种情况。当最大主应力 $\sigma_1 = \sigma_{\min}$ 时,应力圆与先存断裂的强度曲线相切。若断裂与最大主平面的夹角 $\alpha = 1/2 \angle DO_1C$ 时,将沿先存断裂发生剪切破裂,若 $\alpha \neq 1/2 \angle DO_1C$,地层不会发生破裂。当最大主应力 σ_1 继续增大,处于 $\sigma_{\min} \leq \sigma_1 \leq \sigma_{\max}$ 范围内,如图3a中应力圆②所示,应力圆与先存断裂强度曲线交于A、B两点,若 $1/2 \angle BO_2C \leq \alpha < 1/2$

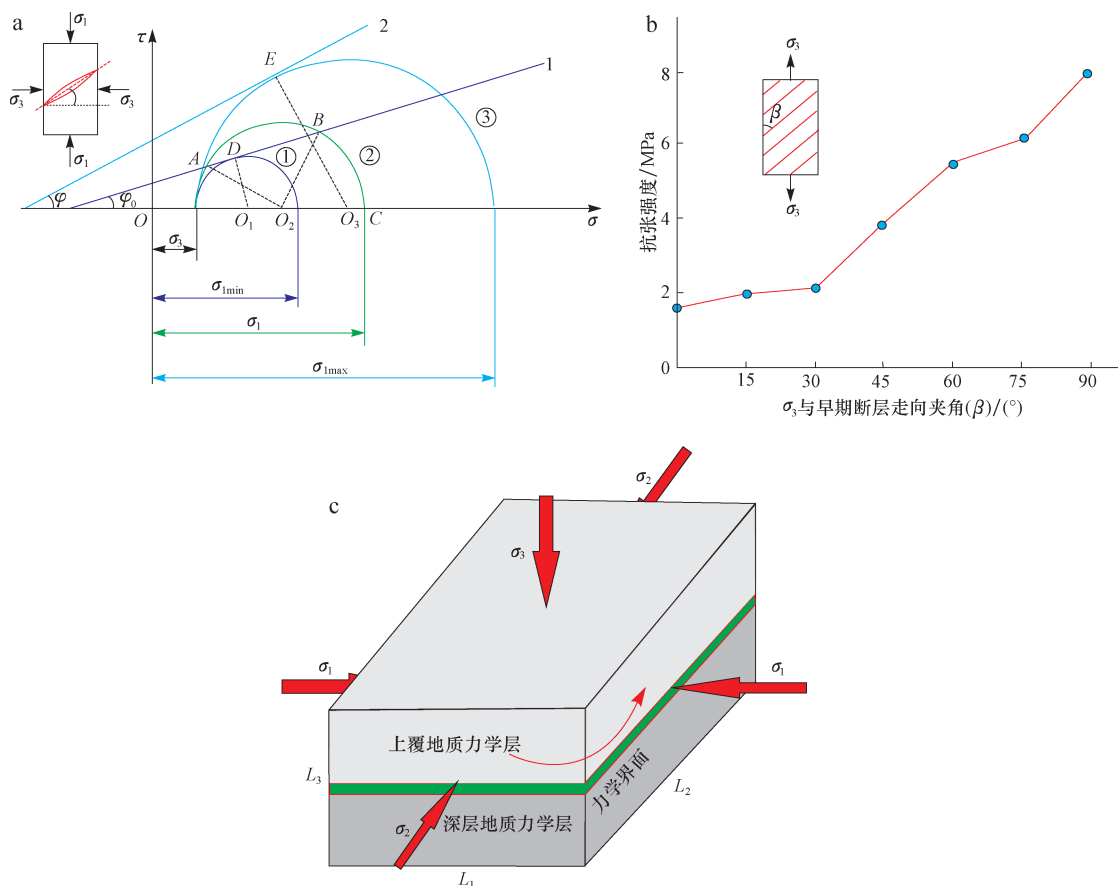


图3 先存构造破裂机理及地质力学层应变不协调效应图(据 Mclamore, 1967)

Fig. 3 Diagrams showing mechanisms of shear rupture and uncoordinated deformational effect in geomechanical layers (Mclamore, 1967)

a. 挤压条件下先存构造破裂三维莫尔圆; b. 拉张条件下岩石强度随应力变化关系曲线; c. 地质力学层变形示意图

$\angle A O_2 C$ 时,地层将发生沿先存断裂的剪切破裂。当最大主应力 σ_1 超过 $\sigma_{\max}$ 时,应力圆可以与地层的强度曲线相切甚至相交,可以达到完整地层发生剪切破裂的条件,会有新的断裂产生。由此分析认为,具有先存断裂的地层发生破裂的方式,即发生沿先存断裂的破裂还是产生新的断裂,与后期应力场和先存断裂走向的夹角及后期应力大小密切相关。

2.3 叠加断裂形成机制

先存断裂的走向与后期应力场方向之间的关系,影响两期断裂的叠加。Donath^[11], McIlmore^[12], Jahanian^[13] 通过对具有先存断裂的地层进行试验认为,当后期张应力与早期断裂夹角 β 小于 30° 时,地层的抗张强度最小,仅为地层无断裂时抗张强度的 $22\% \sim 28\%$ (图 3b)。由此认为当后期张应力与先存断裂夹角 β 小于 30° 时,地层只沿先存断裂扩展而不产生新的断裂。McIlmore^[12] 对具有先存断裂的地层在不同围压下进行实验,结果表明当先存断裂走向与最大主应力夹角 β 在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 时,地层抗剪强度最低,容易沿先存断裂发生扩展而不形成新断裂;当 β 小于 30° 或 β 大于 60° 时,可以产生新断裂。

当下伏或深部地层中的断裂系统在垂向重力作用下,受晚期应力场影响较小且主应力方向发生旋转时,新断裂主要发生在上覆地层中,由于上、下两套地层地质力学强度存在差异,从而导致接触截面“应变不协调效应”和横向旋转现象(图 3c)^[14]。在 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 三轴应力作用下的复合地层,认为两者是紧密粘合的,受力变形后地层界面不会发生滑动,上覆地层的弹性模量用 E_s 表示,泊松比用 μ_s 表示,下伏地层的弹性模量用 E_m 表示,泊松比用 μ_m 表示。一般情况下, $E_s > E_m$, $\mu_m > \mu_s$, 在三轴挤压应力作用下,深部地层由于压实作用较强烈,变形量相对较小,在地层界面处,会因横向应变约束条件派生出张、压应力,下伏地层的侧压应力 σ_{1m} 将会增加,而上覆地层的侧压应力 σ_{1s} 将会明显减小。从而使复合地层界面处的应力状态发生改变,根据应力、应变关系可以得出在界面处的各应力分量:

$$\begin{cases} \sigma_{1s} = \sigma_1 - \sigma'_{1m} \\ \sigma_{2s} = \sigma_2 - \sigma'_{2m} \\ \sigma_{3s} = \sigma_3 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sigma_{1m} = \sigma_1 + \sigma'_{1s} \\ \sigma_{2m} = \sigma_2 + \sigma'_{2s} \\ \sigma_{3m} = \sigma_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sigma'_{1s} = -\sigma'_{1m} \\ \sigma'_{2s} = -\sigma'_{2m} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\sigma_{1s}, \sigma_{2s}, \sigma_{3s}$ 表示上覆地层在界面处的应力; $\sigma_{1m}, \sigma_{2m}, \sigma_{3m}$ 表示下伏地层在界面处的应力; σ'_{1s} 是上覆地层对下伏地层产生与最大主应力同向的压应力, σ'_{1m} 是下伏地层对上覆地层产生与最大主应力反向的张应力,这是一对作用力与反作用力; σ'_{2s} 是上覆地层对下伏地层产生与中间主应力同向的压应力, σ'_{2m} 是下伏地层对上覆地层产生与中间主应力反向的应力,也是一对作用力与反作用力。根据弹性力学理论,固体变形时在两种地层内部单位体积应变能为^[15]:

$$\begin{cases} \bar{\omega}_s = \frac{1}{2}(\sigma_{1s}\varepsilon_{1s} + \sigma_{2s}\varepsilon_{2s} + \sigma_{3s}\varepsilon_{3s}) \\ \bar{\omega}_m = \frac{1}{2}(\sigma_{1m}\varepsilon_{1m} + \sigma_{2m}\varepsilon_{2m} + \sigma_{3m}\varepsilon_{3m}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\bar{\omega}_s$ 和 $\bar{\omega}_m$ 是上覆地层和下伏地层内部单位体积的应变能; $\varepsilon_{1s}, \varepsilon_{2s}, \varepsilon_{3s}$ 表示上覆地层在界面处的应变; $\varepsilon_{1m}, \varepsilon_{2m}, \varepsilon_{3m}$ 表示下伏地层在界面处的应变。

脆性地层断裂的最大应变能准则认为:当岩石内部积累的弹性应变能大于产生断裂体表面所需要的能量时,便发生断裂^[16-17]。由于下伏地层中的应力、应变减小,上覆地层中应变会相应增大,对比不难看出,上覆压实较弱的岩层使界面处单位体积的弹性应变能较深部压实较强地层明显小,从而产生断裂的难度增大。可见,在软硬叠置型的地层中,若两者面积相差不大,那么断裂是继承性发展还是沿着上覆地层产生新的破裂,与先存断裂展布、应力性质以及两套地层之间的力学性质差异程度密切相关。

3 叠加断裂物理模拟

综合以上分析,同时结合前人研究成果,确定了构造物理模拟实验的相似系数、实验材料和边界、基底条件。南堡3区实际面积约为 $15\,352 \times 8\,951 \text{ m}^2$,沙河街组厚度约 790 m,东营组厚度约 630 m,取相似系数为 672,故上、下模型为 $23 \text{ cm} \times 13 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 和 $23 \text{ cm} \times 13 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ 。利用聚苯塑料块并进行处理使其边缘形状与沙河街组沉积末凹陷周边的凸起形状吻合:在南侧设置聚苯塑料模拟沙北断裂及沙垒田凸起,东侧、西侧设置固定铁板模拟曹妃甸洼陷和2区,北侧设置活动聚苯塑料,提供实验材料位移空间,代表凹陷北部沉积区(图 4a, b)。选用延展性较好的橡胶皮来模拟凹陷基底,通过橡胶皮的引张带动上覆地层实现拉张和剪切作用。考虑到实际地层的岩性特征,且为了保证实验材料与实际地层的流变性质相似,以及减少流变性差异对破裂带几何形态的影响,本次实验选取密度为 2.4 g/cm^3 的沙子,加一定量的粘土,混合均

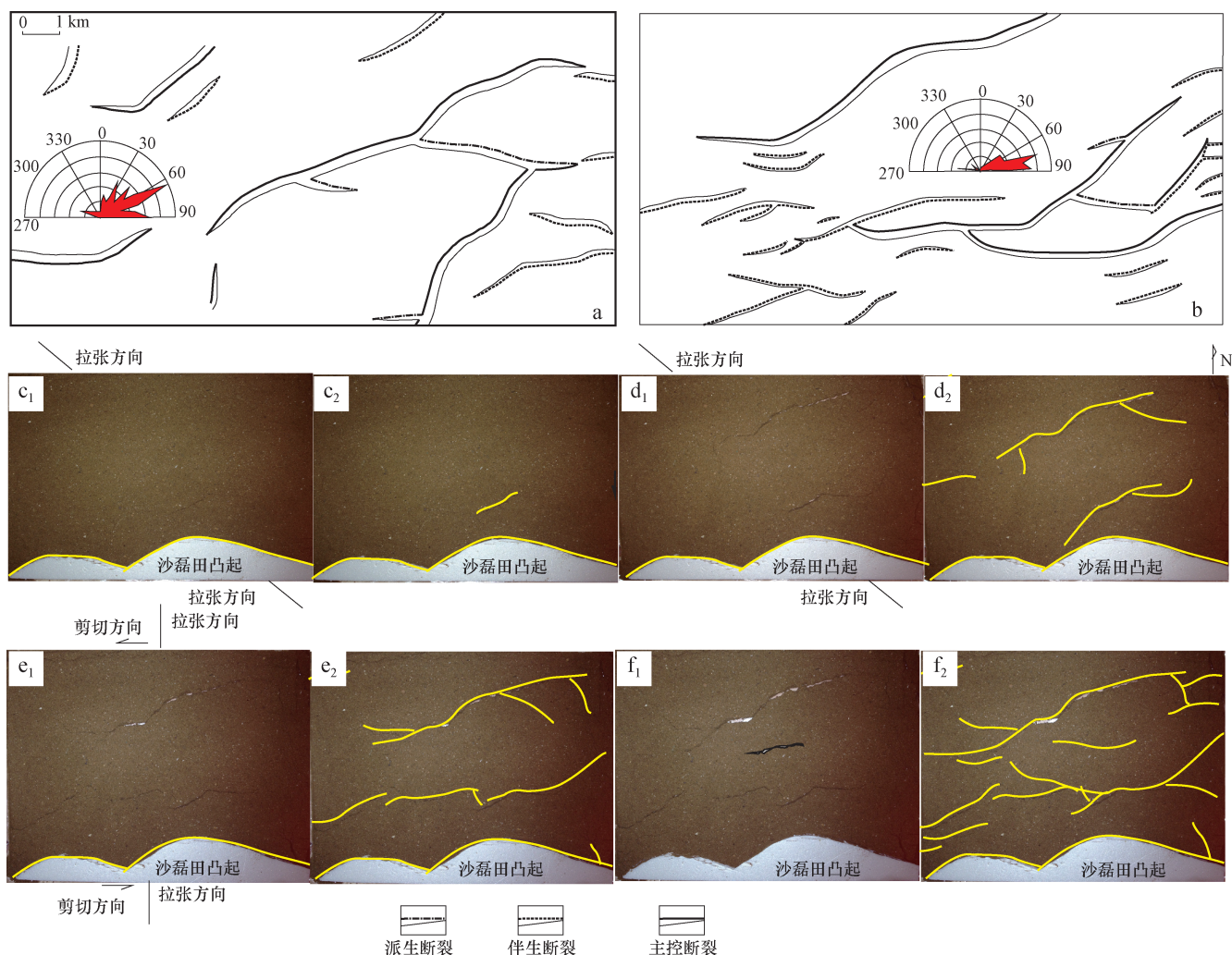


图4 南堡3区叠加断裂构造物理模拟实验过程及结果

Fig. 4 Structural physical simulation of superimposed fault systems in Block 3 of Nanpu Sag

a. 南堡3号构造 E_{s1} 底断裂系统; b. 南堡3号构造 E_{d2} 底断裂系统; c_1, c_2 . 实验进行3 min 结果; d_1, d_2 . 实验进行6 min 结果;
 e_1, e_2 . 实验进行11 min 结果; f_1, f_2 . 实验进行16 min 结果

匀,加适量水,在垂直力作用下轻微压实成层。在实验中按地质历史时期再现地质运动与构造变形是不可想象和不可能的,但却可以从材料的应力、时间与变形的关系式中找出作用力的时间常数,从而达到实验过程中形变与时间的对应关系与地质情况相吻合。依据多数前人的实验,选择1分钟代表自然界中的1 Ma,沙河街组沉积末到东营组关键变形期所经历的时间约为13.5 Ma,本次实验中沙河街组NW-SE向拉伸时间取10 min,再叠加东营组SN向拉伸兼具左旋剪切取6 min,另外根据3区断裂活动性定量计算结果,从沙三段沉积末开始到东三段沉积末经历了“强-弱-强-弱-强-弱”的演化历程。

实验初始,设定地层为水平状态,弹性布四周粘结在实验设备的圆形底座上,准备就绪后,左边拉杆以0.04 mm/s速率进行北西-南东向拉伸。实验进行

3 min后,在沙北断裂的控制下,开始发育一条NE走向的断裂,说明在NW-SE向的伸展作用下产生近垂直的正断裂(图4c)。实验进行6 min后,新产生两条NE-SW向的断裂,且前期南部断裂逐渐扩展在尾端产生次级断裂,3条主断裂从南向北依次展布形成阶梯状排列(图4d),根据断裂力学理论可知,由于断裂部位(尤其是端部)会产生应力集中现象,断裂之间常以横向调节断裂近似连接。实验进行9 min后,在前期变形的基础上添加新的东营组,调整拉伸速率为0.02 mm/s,轻微顺时针旋转一定角度,继续拉伸2 min,然后转动圆形底盘,使拉伸方向较沙河街期旋转45°,近南北方向(图4e),到11 min时,研究区在前期断裂的位置开始出现断裂痕迹,同时在断裂尾端出现一系列左旋雁列式断裂,进一步增大拉伸速率为0.05 mm/s,直至16 min结束后,先期的NE-SW

向主断裂继承发育,在断裂之间出现大量次级断裂,近东西向展布,伴随产生的还有一定数量的横向调节断裂(图 4f)。

4 叠加断裂数值模拟

南堡凹陷 3 区自古近纪以来,纵向上经历了沙河街期的 NW-SE 向强烈伸展断陷阶段、东营期的 S-N 向弱伸展兼具走滑断拗阶段,其中深部太古界-古生界潜山的发育也一定程度上影响着上覆地层的变形。由此,引入有限元数值模拟手段,基于相似材料比例法,设置地质模型的尺寸、材料强度参数、力学边界条件、加载速率,并将地质历史时期的两期构造运动综合起来,采用“统一模型、分段施力”的原则,最终实现纵向断裂系统的叠加过程模拟和次级断裂产生机制研究(图 5a)。

为了获得地层围压条件下的岩石力学特征,对研究区 8 口井 13 块岩心进行分组力学实验,岩性涵盖含砾粗砂岩、粗砂岩、中砂岩和细砂岩等,按实际地质情况,围压等级设计为 10 MPa 和 20 MPa。有围压存在时,破裂形态为张剪性,随围压增大剪切作用增强,破裂角增大,破裂形态变得复杂,甚至出现破裂不连续的现象。从另一角度来看,研究区围压小于某值时,内摩擦角 φ 较大,换算出的破裂角 $\theta = 45^\circ - \varphi/2$ 相对较小,以张性破裂为主,围压大于某值时,内摩擦角 φ 变小,破裂角逐渐增大,且由张性破裂逐渐变为张剪性甚至压剪性破裂。根据试验结果绘制应力摩尔圆,求取不同岩石类型的内摩擦角、内摩擦系数和内聚力,沙河组一段和东营组三段的密度接近,尽管东三段以湖相泥岩为主,沙一段以三角洲前缘砂岩为主,由于不整合面

长期的风化林虑作用,地层变得疏松,密度减小,平均为 2.38 g/cm^3 ,东三段为 2.507 g/cm^3 ,不整合附近密度为 2.39 g/cm^3 ,沙一段峰值强度平均为 171.34 MPa ,东三段峰值强度平均为 213.41 MPa ,不整合附近强度平均为 191.73 MPa ,相比来看,东三段泥岩峰值强度要高于沙一段,不整合面强度居中,而且围压越大,峰值强度越高(表 1)。由于缺少断裂带内岩石力学参数,本次研究采用前人研究成果^[18-19],取断裂泊松比为 0.27,弹性模量取 18.0 GPa ,密度取 2.40 g/cm^3 ,边框的断裂泊松比取 0.22,弹性模量取 18.0 GPa ,密度取 2.40 g/cm^3 。以构造形迹统计结果为基础,经过反复试验,最终确定了沙一段末和东三段末两期古应力方向及大小: NW 48° , 49 MPa 和 SN, 47 MPa ,鉴于东三段末存在一定的左旋剪切应力场,剪应力设置为 14 MPa 。

模拟结果显示:凹陷内东营组最小主应力分布不规则(图 5b),整体为张应力,在断裂 F5 的西段应力值最高, F6 断裂西段次之,以此为中心向四周呈降低趋势,应力等值线的走向与凹陷的边界或断裂带近于平行。此种张应力环境下发育的断裂以拉张性质为主,应力高值和较高值集中区是断裂发育的优势区域。东营组最大主应力主要表现为负值,即为挤压力环境,只在 F4 和 F5 交叉部位以及 F6 西段为张应力。最大主应力具东西分带特征,西部和东部为高值区,中部为低值区,代表了底部上拱构造环境。由于南堡凹陷在古近纪期间受控于郯庐断裂的正断活动,兼有右行滑动,加上基底断裂的影响,总体上以伸展作用为主,主断裂之间存左在旋剪切作用,部分断裂呈雁列式展布。如在东营组变形期左旋、右旋应力并存,以断裂 F4 和 F6 为界,西侧和东侧以左旋剪应力为主,西北侧和南侧则

表 1 南堡 3 区岩石力学参数测试结果
Table 1 Rock mechanical parameters of Block 3 in Nanpu Sag

岩心组	岩性	地层	围压/MPa	应力峰值强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角(φ)/($^\circ$)	内摩擦系数
A 组	油斑细砂岩	Es ^{1(中)}	10	154.83	15.62	0.213	62.44	1.912
	块状细砂岩	Ed ^{3(下)}	20	297.92	26.08	0.195		
B 组	油斑含砾粗砂岩	Es ^{1(中)}	10	155.87	18.20	0.231	49.02	1.151
	中砂岩	Es ^{1(中)}	20	210.92	21.48	0.243		
C 组	中砂岩	Es ^{1(中)}	10	143.17	17.50	0.217	46.30	1.046
	中砂岩	Es ^{1(中)}	20	196.46	18.79	0.218		
D 组	粗砂岩	Es ^{1(中)}	20	228.18	20.55	0.213	34.40	0.647
	细砂岩	界面	20	201.23	20.15	0.219		
	含砾粗砂岩	Ed ^{3(下)}	20	141.09	14.07	0.129		
E 组	含砾粗砂岩	Es ^{1(中)}	10	126.98	14.02	0.229	48.25	1.120
	中砂岩	界面	20	164.28	17.92	0.275		
F 组	中砂岩	Es ^{1(中)}	10	154.35	20.87	0.265	48.25	1.120
	含砾粗砂岩	界面	20	209.69	22.61	0.219		

以右旋剪应力为主(图5c)。此类应力环境与图中中东三段次级雁列式断裂体系分布特征十分吻合。

与东营组相比,沙河街组最小主应力只在研究区东南部显示为挤压性质,其它地区皆为拉张性质,且拉/压边界受NE走向主断裂的影响明显,尤其在断裂F2附近存在强烈的伸展应力环境,控制产生了F2和F1之间的横向断裂(图5d)。沙河街组平面剪应力性

质具有明显的分区特点,在断裂F1和F3之间为右旋拉伸,其它地区为左旋拉伸,且在F2西段存在强烈剪切走滑趋势,总体趋势与东营组正好相反。作为岩石变形或破裂的主导因素,应力强度(最大主应力减去最小主应力)在东营组和沙河街组内分布差异大(图5e—j)。尽管两者高值区都位于F2和F5断裂的西段,但东营组高值区主要分布在断裂F5和F6之间,呈近东西向

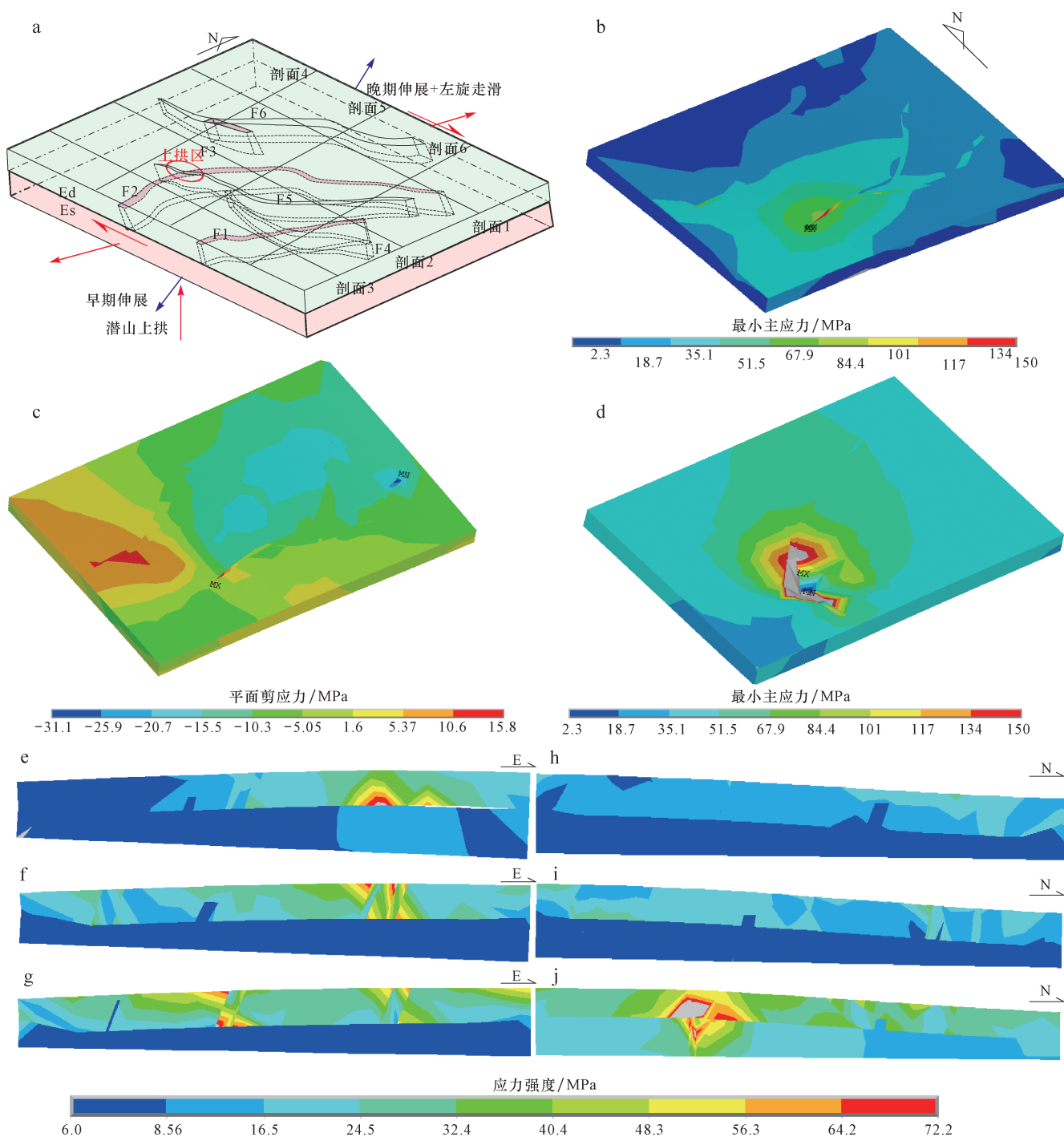


图5 南堡3区叠加断裂体系有限元模拟及应力分布

Fig. 5 Finite element simulation for superimposed fault systems and the distribution map of stresses in Block 3 of Nanpu Sag

a. 有限元多层地质模型; b. 东营组最小主应力; c. 东营组平面剪应力; d. 沙河街组最小主应力; e—j. 应力强度剖面

条状展布。另外,东南部作为断裂发育的有利部位,高应力强度区分布呈环形特征。结合以上地质特征分析,由于深部潜山上拱以及不整合面这一力学界面的存在,先存基底断裂受力后,不仅会继承性延伸,同时会在上覆地层内形成新的次级断裂。早期地层在深部潜山和古地貌的影响下,会发育一系列不对称的地垒或单断构造,当晚期地层内应力场发生改变后,首先会以不整合面为薄弱带发生两套力学层之间的“应力-应变不协调”效应,促使能量消耗一部分,然后优选与张应力方向夹角小于 30° 的断裂发生继承性活动并在平面内延伸^[20,9],又可以消耗一部分能量。当先存断裂不能够继续活动时,则累计的构造能量会在上部地层内产生新的主断裂,并进一步影响局部应力场产生次级断裂,如左旋剪切应力场下容易产生一系列雁列式断裂。最终,由于内摩擦角和力学环境的差异,上、下层的断裂产状不仅会产生差异,而且受潜山的顶托作用,张应力会发生局部集中,在F2和F5断裂重叠部位构造活动尤其强烈,最终形成了研究区特殊的“X”型断裂垂向叠加现象。

前人研究表明,南堡凹陷在属性上它具有典型主动裂谷的特征,在演化上具有多幕拉张,中、新生代继承性发育的特点,是一个中新生代上下叠置的复合型凹陷^[21]。对渤海湾盆地的多期裂谷作用,前人早有论述,通常划分为3个裂谷演化阶段,即早侏罗世断陷期、早白垩世断陷期和古近纪孔店组、沙河街组、东营组断陷期。中、新生代以来南堡凹陷与渤海湾盆地构造演化规律大体相似^[22-23],但其古近纪构造演化还赋有许多新的特点,主要表现在两个方面:新生代裂谷演化具有明显的多幕发育特点,新近纪中新世中期以来的构造性质发生明显转变,即由中新世早期的构造衰弱期转化为新的构造活化期,主要表现在:断裂作用加剧、拉张作用增强、沉积速率加快。

对于郯庐断裂带在新生代的的活动,大多数观点认为郯庐断裂古近纪以来发生右旋走滑拉张和左旋走滑挤压,现今以右旋走滑挤压为主^[24],不同时期的构造活动,对于南堡凹陷的形成、演化和改造都有着重要的影响。其活动时间上可分为5期,即古新世至早始新世、中始新世至渐新世、中新世至早更新世、中更新世、晚更新世至今5个活动阶段^[19],平面上可分为3段(北段:肇兴—沈阳;中段:沈阳—宿迁;南段:宿迁—广济)。尤其是近年来沿断裂带频繁发生的地震表明,郯庐大断裂具有明显的压扭特征,时而左旋,时而右旋。可以认为:渤海湾盆地内新生代发育的NNE—NE向、NWW—EW向控陷断裂是分期伸展变形叠加的结果。

郯庐大断裂在古近纪早期的活动性质及强度在不同的地段具有不同的表现,可划分为4段;南段张裂活动、中段(沂沭断裂带)右行走滑运动、北段张裂活动,最北端断裂活动不明显,在相当于凹陷孔店组沉积时期,断裂中段对南堡凹陷产生了重要影响,派生的北西向张力形成了一系列北东向断裂,这些断裂的发育一直延续到沙河街沉积期(图6)。

中始新世初期,太平洋板块开始向西俯冲,造成了我国东部构造应力场的转变,以SE 102° —NW 282° 的主压应力为主,郯庐断裂带活动性质也随之改变。基本以莱州湾为界,分为南、北两段,在南段,由于受近东西向挤压应力作用,以挤压—逆冲活动为特征为主^[25],北段具有一定的继承性,以正断活动为主,兼有右行滑动,但活动强度较前一时弱。这个时期相当于南堡凹陷的沙河街和东营期,其中沙河街早中期是应力场发生转化的时期,由北东向伸展逐渐转换为南北向伸展兼具走滑特征,因此,在东营组沉积开始后,便在早期北东向断裂的基础上继承性发育形成一系列近东西向断裂,活动主断裂之间另外发育了一系列左旋走滑雁列式断裂。中新世至早更新世时期,我国东部地区构造应力场的主压应力方向为NE 70° —SE 170° ,在这一背景下,郯庐断裂带发生了正断或走滑运动,其活动强度为南弱北强,且以渤海湾活动最为强烈。

根据地震解释结果,南堡3区内主要发育3组断裂体系:边界弧形断裂体系(新近纪趋于停止)、北东向断裂体系(为二级断裂,分支断裂为北西向,极为发育,渐新世早期开始发育,晚期断裂活动加剧,至古近纪断裂活动趋于停止)、东西向断裂系(形成于渐新世,结束于古近纪末期,是控晚期叠加构造演化的主要因素)。根据里德尔剪切发育模式,沙二段沉积期主要以北东向一级主控断裂为主(相对级别),容易派生形成斜交断裂,同时断裂间伴生左旋走滑次级断裂,但不代表区域应力场。进入东营期,由于拉张活动强度的逐渐减弱和右旋走滑活动的产生,断裂体系也发生相应的改变,在郯庐大断裂整体南北向拉张兼具右旋走滑的背景下,早期北东向沙河街断裂及古潜山构造派生次级右旋走滑分力,东营组盖层容易变形,发生左旋剪切成雁列式断裂。根据格里菲斯准则,北东向断裂在尾端部位发生继承性活动,与早期断裂呈近 45° 斜交,平面上整体呈“S”形或反“S”形特征。同时由于研究区厚层泥岩中包裹了透镜体砂岩,在上覆地层重力作用下容易形成差异压实型断裂,但空间延伸距离短,一般在层内发育。当早期断阶式主控断裂继承性发育时,往往形成弱垂向剪切作用下的雁列式断裂,造成了

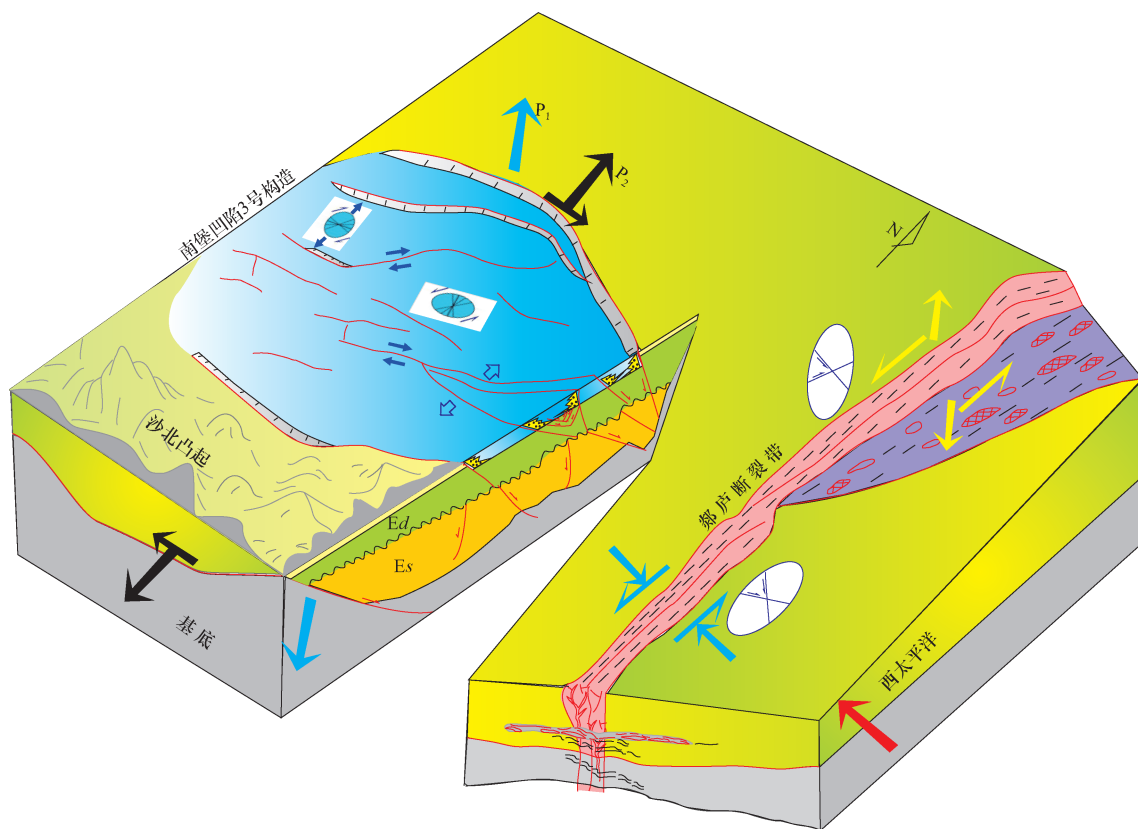


图6 郯庐断裂中始新世—渐新世活动对南堡3区断裂发育的控制模式

Fig. 6 Controlling mode of major Tan-Lu faulting on development of faults in Block 3 of Nanpu Sage from the Eocene to Oligocene

垂向上断裂的不连续发育现象(图2)。

5 结论

1) 南堡凹陷3区古近系东营组—沙河街组中“X”型叠加断裂体系普遍发育,主要呈现为对称和不对称两种组合形式,下部先期断裂主要以NE走向平行排列为主,断距大,密度低,上部晚期断裂以近EW走向平行排列和斜列式为主,断距小,密度大,两套断裂系统在潜山和地垒重叠部位相交而不相连,具有明显的多期叠加特征。

2) 采用构造物理模拟和有限元数值模拟相结合的手段恢复叠加断裂体系的形成和演化过程,不仅能够实现叠合盆地内区域地质背景对多期构造形成和演化的控制作用,还能定量模拟应力场分布特征,揭示软硬互层地质力学层之间的“应力—应变不协调效应”,预测低级序断裂的有利发育位置。

3) 两期断裂系统的叠加规律主要受控于先期断裂的力学强度、晚期应力强度、先期断裂走向与后期应力方向之间的关系,当后期应力场发生改变时,可能引起构造(尤其是断裂)的叠加,平面上,当后期张应力与早期断裂夹角小于 30° 时,地层抗张强度最小,此

时,只沿先期断裂扩展而不产生新的断裂,垂向上,沙河街和东营组两套地质力学层间以不整合面为薄弱力学层,在后期受力作用较强时,容易发生“变形不协调”和应力集中现象,导致断裂的快速发育。

4) 南堡凹陷“X”型叠加断裂系统的形成直接受控于郯庐大断裂古近纪以来活动的旋回性、分段性和力学性质转变,经历了古近纪地壳单元的单剪切变形和纯剪切变形机制的叠加,进入东营期后,在郯庐大断裂整体南北向拉张兼具右旋走滑的背景下,早期NE向沙河街断裂及古潜山上拱派生次级右旋走滑分力,东营组盖层容易变形,发生左旋剪切形成雁列式断裂。

参 考 文 献

- [1] 金之钧,王清晨. 中国典型叠合盆地与油气成藏研究新进展—以塔里木盆地为例[J]. 中国科学D辑地球科学,2004,34(增刊1):1-12.
Jin Zhijun, Wang Qingchen. New development of typical Superimposed basin and hydrocarbon accumulation in China[J]. Science China D Series Earth Science,2004,34(1):1-12.
- [2] 韩保清,罗群,黄捍东,等. 叠合盆地及其基本地质特征[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报),2006,28(4):12-14.
Han Baoqing, Luo Qun, Huang Handong, et al. Superimposed basin and its fundamental geological characteristics[J]. Journal of Oil & Gas Technology,2006,28(4):12-14.

- [3] 吕延防, 韦丹宁, 孙永河, 等. 南堡凹陷断裂对中-上部含油组合油气成藏的控制作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(4): 971-982.
- Lv Yanfang, Wei Danning, Sun Yonghe, et al. Control action of faults on hydrocarbon migration and accumulation in the middle and upper oil-bearing group in Nanpu Sag[J]. Journal of Jilin University (earth science edition), 2015, 45(4): 971-982.
- [4] 周天伟, 周建勋. 南堡凹陷晚新生代X型断裂形成机制及其对油气运聚的控制[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(1): 20-27.
- Zhou Tianwei, Zhou Jianxun. Formation mechanism of X-Pattern normal faults during late Cenozoic and their impact on hydrocarbon accumulation in the Nanpu Sag of Bohai Bay Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2008, 32(1): 20-27.
- [5] 孙同文, 付广, 吕延防, 等. 南堡1号构造中浅层油气富集主控因素分析[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(7): 1042-1050.
- Sun Tongwen, Fu Guang, Lv Yanfang, et al. Main controlling factors on the hydrocarbon accumulation in the middle-shallow layer 1st structure, Nanpu Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(7): 1042-1050.
- [6] 董亨茂, 赵宝银, 曹哲, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷断裂系统成因的构造解析[J]. 地质学报, 2013, 87(11): 1647-1659.
- Tong Hengmao, Zhao Baoyin, Cao Zhe, et al. Structural analysis of faulting system origin in the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(11): 1647-1659.
- [7] Byerlee J D. Friction of rocks[J]. Pure and Applied Geophysics, 1978, 116: 615-626.
- [8] 董大伟, 李理, 刘建, 等. 冀中坳陷中北部新生代构造演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 772-779.
- Dong Dawei, Li Li, Liu Jian, et al. Cenozoic tectonic evolution in the north-central Jizhong Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 772-779.
- [9] 董亨茂, 龚发雄, 孟令箭, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷北边界断层演化及其石油地质意义[J]. 地球科学前沿, 2017, 7(2): 276-287.
- Tong Hengmao, Gong Faxiong, Meng Lingjian, et al. New understanding of boundary fault evolution and its petroleum geological significance in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Advances in Geosciences, 2017, 7(2): 276-287.
- [10] Morley C K, Gabdi S, Seusutthiya K. Fault superimposition and linkage resulting from stress changes during rifting: Examples from 3D seismic data, Phitsanulok Basin, Thailand[J]. Journal of Structural Geology, 2007, 29: 646-663.
- [11] Donath F A. Experimental study of shear failure in anisotropic rocks[J]. AAPG, 1961, 72(6): 985-989.
- [12] McLamore R, Gray K E. The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks[J]. Journal of Engineering for Industry, 1967, 89(1): 62-73.
- [13] Kumar R, Verma A K. Experimental study of anisotropic shear strength of rock joints[D]. Kharagpur: Indian Institute of Technology, 2016.
- [14] 徐素国, 梁卫国, 莫江, 等. 软弱泥岩夹层对层状盐岩体力学特性影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 878-883.
- Xu Suguo, Liang Weiguo, Mo Jiang, et al. Influence of weak Mudstone intercalated layer on mechanical properties of laminated Salt rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 878-883.
- [15] 商琳, 戴俊生, 冯建伟, 等. 砂泥岩互层裂缝发育的地层厚度效应[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(1): 35-41.
- Shang Lin, Dai Junsheng, Feng Jianwei, et al. Influence of thickness effects on the fracture development in sand-mud interbed formation[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(1): 35-41.
- [16] 戴俊生, 冯建伟, 李明, 等. 砂泥岩间互地层裂缝延伸规律探讨[J]. 地学前缘, 2011, 18(2): 277-283.
- Dai Junsheng, Feng Jianwei, Li Ming, et al. Discussion on the extension law of structural fracture in sand-mud interbed formation[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(2): 277-283.
- [17] 曾联波. 低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- Zeng Lianbo. Formation and distribution of cracks in low Permeability Sandstone reservoirs[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [18] 邓俊国, 王贤. 南堡凹陷构造应力场演化史与油气聚集[J]. 保定师专学报, 1999, 12(2): 72-77.
- Deng Junguo, Wang Xian. The Evolution history on the tectonic stress field and the oil-gas accumulation[J]. Journal of Baoding Teacher's College, 1999, 12(2): 72-77.
- [19] 魏忠文, 熊保贤, 葛云龙, 等. 南堡凹陷北部东营末期构造应力场与油气运移关系的探讨[J]. 现代地质, 2000, 14(4): 435-439.
- Wei Zhongwen, Xiong Baoxian, Ge Yunlong, et al. Relationship between structural stress field and hydrocarbon migration in the northern Nanpu depression at the late stage of Dongying[J]. Geo science-journal of graduate school, China University of Geosciences, 2000, 14(4): 435-439.
- [20] 胡明, 姜宏军, 付广, 等. 似花状断裂密集带富油差异性—以渤海湾盆地南堡凹陷中浅层为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 528-535.
- Hu Ming, Jiang Hongjun, Fu Guang, et al. Characterization of petroleum pooling patterns in dense flower-like fault belts: Taking the middle and shallow layers in Nanpu Sag of Bohai Bay Basin as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 528-535.
- [21] 徐嘉伟, 马国锋. 郯庐断裂带研究十年回顾[J]. 地质论评, 1992, 38(4): 316-324.
- Xu Jiawei, Ma Guofeng. Review of ten years (1981-1991) of research on the Tancheng-Lujiang fault zone[J]. Geological Review, 1992, 38(4): 316-324.
- [22] 张庆龙, 王良书, 解国爱, 等. 郯庐断裂带北延及中生代构造体制转换问题的探讨[J]. 高校地质学报, 2005, 11(4): 577-584.
- Zhang Qingliang, Wang Liangshu, Xie Aiguo, et al. Discussion on northward extension of the Tanlu fault zone and its tectonic regime transformation[J]. Geological Journal of China universities, 2005, 11(4): 577-584.
- [23] 王书琴, 孙晓猛, 杜继宇, 等. 郯庐断裂带北段构造样式解析[J]. 地质论评, 2012, 58(3): 414-423.
- Wang Shuqin, Sun Xiaomeng, Du Jiyu, et al. Analysis of structural styles in northern segment of Tancheng-Lujiang fault zone[J]. Geological Review, 2012, 58(3): 414-423.
- [24] 张慧, 焦明若, 刘峡. 太平洋板块俯冲对中国东北深震影响机理的数值模拟[J]. 地震, 2012, 32(2): 135-142.
- Zhang Hui, Jiao Mingruo, Liuxia. Numerical simulations of the influencing mechanism of the Pacific plate subduction to NE China on deep and shallow earthquakes[J]. Earthquake, 2012, 32(2): 135-142.
- [25] 朱光, 徐嘉伟, 孙世群, 等. 郯庐断裂带平移时代的同位素年龄证据[J]. 地质论评, 1995, 41(5): 452-456.
- Zhu Guang, Xu Jiawei, Sun Shiqun, et al. Isotopic age evidence for the timing of strike-slip movement of the Tan-lu fault zone[J]. Geological Review, 1995, 41(5): 452-456.