

引用格式: 卿颖, 冯建伟, 杨少春, 等. 基于物理-数值联合模拟的多期断裂形成机制及演化研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 60-70.

QING Ying, FENG Jianwei, YANG Shaochun, et al. Formation mechanism and evolution of multi-phase fault based on physical and numerical simulation[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 37(1): 60-70.

# 基于物理-数值联合模拟的多期断裂 形成机制及演化研究

卿颖<sup>1</sup>, 冯建伟<sup>2</sup>, 杨少春<sup>2</sup>, 任启强<sup>2</sup>

(1. 中国石油冀东油田分公司 勘探开发研究院, 河北 唐山 063004;

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

**摘要:** 针对多期叠加构造体系形成机制研究中存在的问题, 以南堡凹陷3号构造古近系中大量存在的“X”型断裂样式为例, 应用构造体系复合理论、构造物理-数值联合模拟分析裂陷盆地深部先期构造对晚期断裂形成和演化控制作用以及叠加构造形成力学机理, 建立空间展布几何模式。研究认为: 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; 先期断裂可以影响局部应力场的分布以及地层的力学强度, 进而影响后期发育断裂的分布, 后期应力场既可以使早期断裂继续扩展, 也可以导致地层发生破裂产生新的断裂; 伸展背景下, 当后期张应力与早期断裂夹角小于 $30^{\circ}$ 时, 只沿先期断裂扩展而不产生新的断裂; 以不整合面分割形成的空间地质力学结构层, 受后期强烈作用时, 容易发生“变形不协调”现象, 垂向上断裂系统具有明显不连续性, 产状发生改变。因此, 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地质力学性质的转变。

**关键词:** 南堡凹陷; 叠加断裂; 形成机制; 物理模拟; 数值模拟

中图分类号: P542; P554

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2018)01-0060-11

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.01.006

## Formation Mechanism and Evolution of Multi-phase Fault Based on Physical and Numerical Simulation

QING Ying<sup>1</sup>, FENG Jianwei<sup>2</sup>, YANG Shaochun<sup>2</sup>, REN Qiqiang<sup>2</sup>

(1. Exploration and Development Research Institute, China Petroleum and Jidong Oilfield Branch, Tangshan, Hebei 063004, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China)

**Abstract:** To solve problems in studying the formation mechanism of multi-phase superimposed structures, this paper took X-pattern normal faults in Nanpu No. 3 region as the example to investigate the controlling role of pre-existing structure in the depth of rift basin on the formation and evolution of later fault and to analyze the mechanism of superimposed structures by using tectonic superposition theory and physical and numerical simulation. A geometric model of space distribution was established. Through these studies, several laws were obtained as follows. First,

收稿日期: 2016-06-06

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(14CX05016A)

作者简介: 卿颖(1979—), 男, 甘肃敦煌人, 高级工程师, 主要从事油气勘探及评价工作. E-mail: linqu\_fengjw@126.com

冯建伟(1979—), 男, 山东临朐人, 副教授, 博士后, 主要从事构造地质学和岩石力学研究, 本文通信作者.

E-mail: linqu\_fengjw@126.com

superposition manners mainly depend on the mechanical strength of pre-existing faults, the tectonic stress intensity of the later faults, and the relation between the pre-existing fault strike and the stress orientation of late period. Secondly, the pre-existing faults, which can influence local distribution of stress field and the mechanical strength of stratum, influence the distribution of later fault development. In other words, the later stress field not only causes the further propagation of pre-existing faults, but also the generation of new rupture in overlying strata. However, under extension setting, the later stress field results in the propagation along pre-existing faults only without, generating new faults when the inclined angle is less than 30°. Besides, under the influence of strong later force, it is easy for the spatial mechanical stratigraphic sequences resulted from the segregation of plane of unconformity to produce the non-coordination strain phenomenon and to cause discontinuous faults vertically with changed occurrence. Therefore, the formation and development of the superimposed fault system is directly controlled by the change of geo-mechanical properties of Tan-Lu fault since Paleogene.

**Key words:** Nanpu sag; superimposed faults; formation mechanism; physical simulation; numerical simulation

我国内陆大部分含油气盆地属叠合盆地<sup>[1]</sup>,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。南堡凹陷作为渤海湾盆地北侧一个小型含油气凹陷,油气资源十分丰富,具有多期成盆、多期成藏的复式油气聚集特点<sup>[2]</sup>。南堡凹陷 3 号构造简称为南堡 3 区,位于凹陷东南部,属于凹陷内的一个局部构造带,自白垩纪以来,经历了古近纪断陷和新近纪拗陷两个阶段(图 1),并控制形成了以沙一段顶部不整合为界的上下两套断裂体系,如深部沙河街组为地堑-地垒断裂体系,东营组为半地堑断裂体系,两者在垂向上叠加成“X”型和“Y”型样式,控制着油气的运移和空间分布。前人<sup>[3-4]</sup>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,也有人认为“X”型断裂组合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<sup>[5-7]</sup>,并应用脆性断裂新理论阐述了其中的力学机理,确定了基底先存构造活动的变化规律。本研究在南堡凹陷 3 号东营组和沙河街组构造解释基础上<sup>[1]</sup>,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”<sup>[7]</sup>,探讨基底先存构造对裂陷盆地断裂形成和演化的控制规律,为下一步中深层油气勘探和成藏模式的建立提供指导。

### 1 基本地质特征

根据断裂几何特征和成因机制,南堡凹陷 3 号构造断裂样式主要划分为三种区域构造样式:伸展、张扭和挤压构造样式,进一步细分为 12 种局部构造样式,如“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:①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,后者较长,且断裂样式在剖面上的特有形态与平面形态一一对应,如:剖面上为“Y”形或反“Y”形的断裂<sup>[8]</sup>,在平面上表现为斜交式分布;剖面上为同向断阶组合类型的断裂,平面上表现为雁列式展布;剖面上为反向断阶组合类型的断裂,平面上呈平行式排列;剖面上为地堑或白菜心式断裂,平面上呈平行式或斜交式展布;剖面上为调节型断裂,平面上呈正交式或分叉式组合等(图 2)。

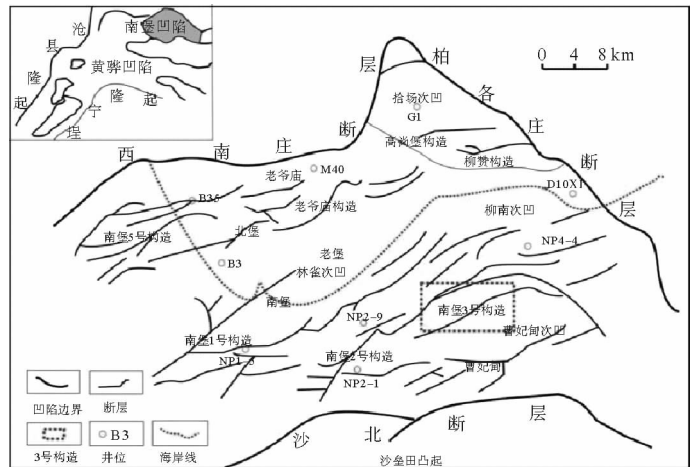


图 1 南堡凹陷区域构造简图

Fig. 1 Geological sketch of Nanpu sag

②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。断裂在剖面上为“入”字型断裂,在平面上呈斜交式;剖面上为地垒组合的断裂,平面上呈平行式特征;剖面上为垂向剪切型断裂,平面上呈雁列式展布等。

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构造,中间存在短期反转现象(图 2)。根据南堡凹陷中央隆起带剖面断裂特征,复杂“X”型断裂组合具有非对称与对称两种形式: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;或下部两支均为大断距断裂构成,上部两支由多条小断裂构成。另外,多个 X 型断裂可能相互连接构成更复杂的“X”构型<sup>[3]</sup>。

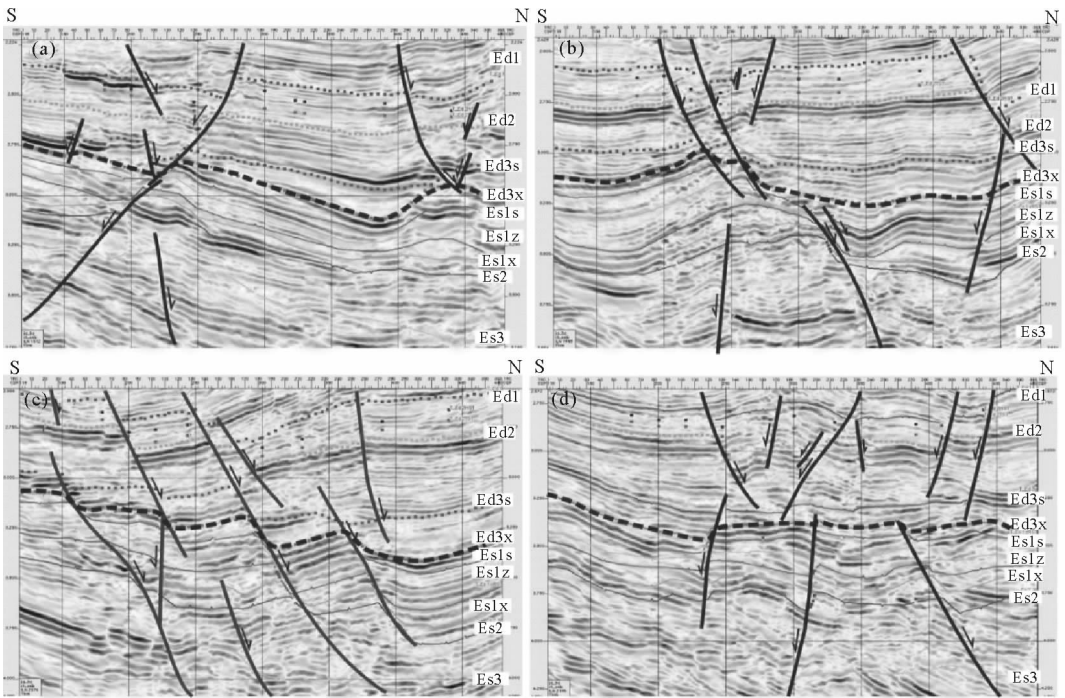


图 2 三维地震资料显示的 X 型叠加断裂组合(南北向剖面)

Fig. 2 Superimposed fault combination of X-type recognized in 3D seismic data (south-north profile)

## 2 断裂活动差异

### 2.1 断裂走向

根据地震解释结果,从沙河街组( $Es_3$ 、 $Es_2$ 、 $Es_1$ )至东营组( $Ed_3$ )逐层统计断裂走向,并编制走向玫瑰花图(图 3)。断裂优势走向为  $NE40^{\circ}$ - $NE60^{\circ}$ 和近 EW 向,NW 向较少。断裂数量由  $Es_3$  至  $Ed_3$  逐渐增多,同时近 EW 向所占比例逐渐增大,说明深部沙河街组地层发育的断裂与浅部东营组地层发育的断裂具有继承性发育特征,主要体现在以下几点:①深、浅断裂体系总体走向变化小,仅在断裂端部发生轻微改变,由 NE 向到 EW 向逐渐偏转;②浅层断裂多近 EW 向展布,尤其是较小规模的断裂大多分布在中部 NE 走向主断裂附近及东部地区,推测主要受早期 NE 向主断裂这一力学薄弱带的影响所致。根据伸展盆地构造理论认为,从沙河街组至东营组沉积期南堡 3 区伸展应力方向逐渐由 NW 向向 NS 向偏转,具体偏转时期为  $Es_3^p$ - $Es_1^p$  沉积阶段。

### 2.2 断裂活动性

目前,断裂活动研究方法主要有生长指数法、古落差法、断裂活动速率法和位移-长度关系分析法、高分

辨率断裂落差图技术和古滑距法等<sup>[9]</sup>,其中生长指数法简单直观、易于理解,被广泛使用。但在两盘存在剥蚀的情况下,生长指数计算结果会偏大甚至趋近无穷,无法正确体现断裂活动强度,而位移-长度关系分析法改进为平面密度法后,能够体现不同层位沉积期断裂活动的结果,并能弥补生长指数法的不足,因此,只有将两者有机结合才能综合表征某一时期的断裂的活动性。这里,将断裂密度定义为单位面积的断裂长度,即研究区所有断裂长度总和与面积的比值,单位为  $\text{km}^{-1}$ 。一定面积内,该值的大小与断裂数目、断裂级别以及比重等有关。由图 4 可知,断裂密度从深层  $\text{Es}_3$  开始增大,到  $\text{Es}_2$ - $\text{Es}_1^{\text{中}}$  时相对稳定, $\text{Es}_1^{\text{上}}$  时再次增大,直到  $\text{Ed}_3^{\text{下}}$  时达到最高值, $\text{Ed}_3^{\text{上}}$  时却又突然降低。为了表征断裂的活动性差异,将生长指数大致分为三段:1.0~1.15,1.15~1.35,>1.35,分别对应弱活动、较强活动、强活动三个级别。由图 4 可知, $\text{Es}_3$  时全区断裂的活动强度一般,只有局部断裂生长指数达 1.35 以上, $\text{Es}_2$  时期断裂活动强度总体高于  $\text{Es}_3$  期,到  $\text{Es}_1^{\text{下}}$  和  $\text{Es}_1^{\text{中}}$  时期活动强度开始增强,部分断裂生长指数达 1.35 以上,到了  $\text{Es}_1^{\text{上}}$  时期断裂活动强度普遍增强,局部断裂生长指数达 2.0 以上,进入  $\text{Ed}_3$  时期断裂活动又降低进入了平稳期。

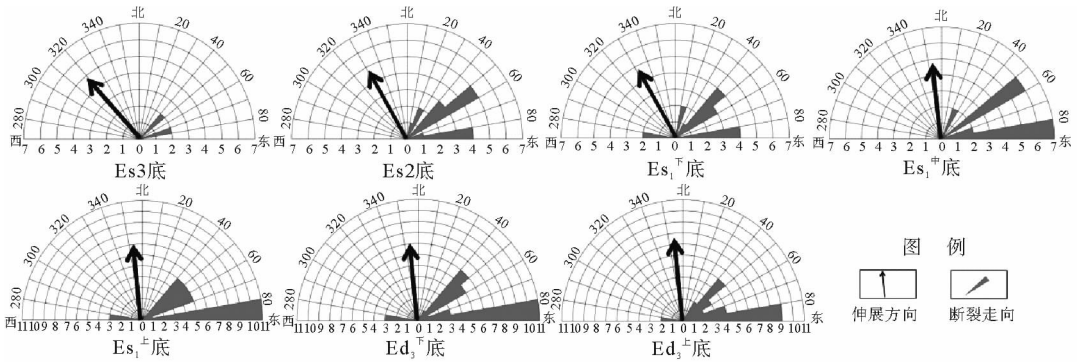


图 3 南堡 3 区不同层位断裂走向统计及伸展方向图

Fig. 3 Extensional orientation and fault strike of each formation in Nanpu No. 3 region

综上所述,南堡 3 区沙河街组至东营组经历了 NW-SE 伸展和 SN 向伸展走滑两期构造变形,活动强度大致表现为“强—弱—强—弱—强—弱”交替变化特征,转折期为  $\text{Es}_1^{\text{中}}$ 。结合童亨茂等<sup>[10]</sup>对南堡凹陷的研究成果认为, $\text{Es}_3$  期构造变形是在基底先存构造基础上,经历了 NW-SE 方向伸展作用的结果; $\text{Es}_1^{\text{中}}$  以来的变形是在  $\text{Es}_3$  期先存断裂基础上,经历了近 SN 伸展兼具近 EW 向走滑的结果; $\text{Es}_1^{\text{中}}$  和  $\text{Es}_1^{\text{上}}$  是区域应力体制转换的关键阶段。

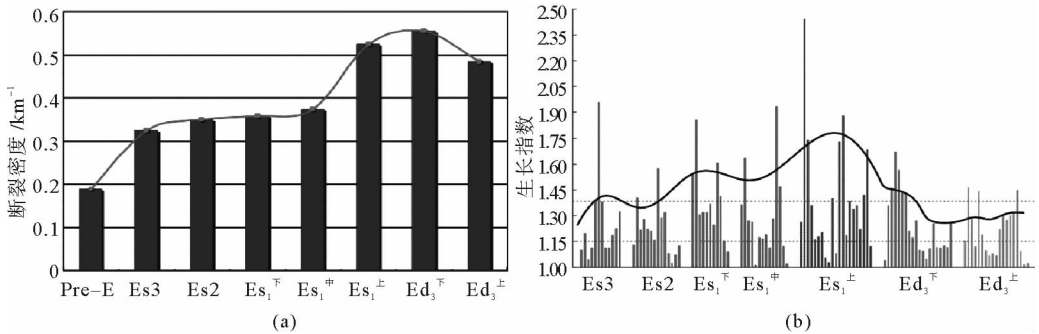


图 4 南堡 3 区不同层位断裂密度及不同时期断裂生长指数统计图

Fig. 4 Fault growth index at different times and fault density of each formation in Nanpu No. 3 region

### 3 叠加断裂体系物理模拟

综合分析,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  $15\ 352 \times 8\ 951\ \text{m}^2$ ,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 5)。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,并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  $4.0\ \text{g}/\text{cm}^3$  的沙子,加一定量的粘土混合均匀,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。结合前人实验,选择 1 min 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。

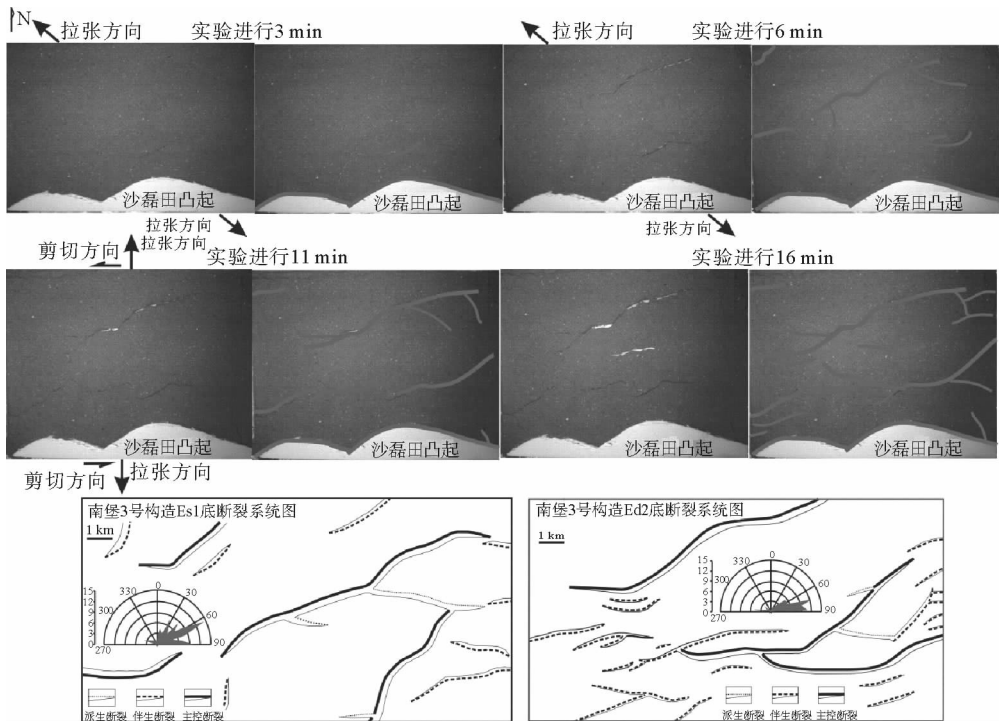


图 5 构造物理模拟实验过程及结果

Fig. 5 Process and results of tectonic physical simulation experiment in Nanpu No. 3 region

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  $0.04\ \text{mm}/\text{s}$  速率进行北西-南东向拉伸。过程如下:

实验进行 3 min 后,在沙北断裂的控制下,开始发育一条 NE 走向断裂,说明在 NW-SE 向伸展作用下产生近垂直的正断裂。

实验进行 6 min 后,新产生两条 NE-SW 向断裂,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,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,在前期变形基础上添加新的东营组地层,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。

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 5)。

### 4 叠加断裂体系数值模拟

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在一定程度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 6)。

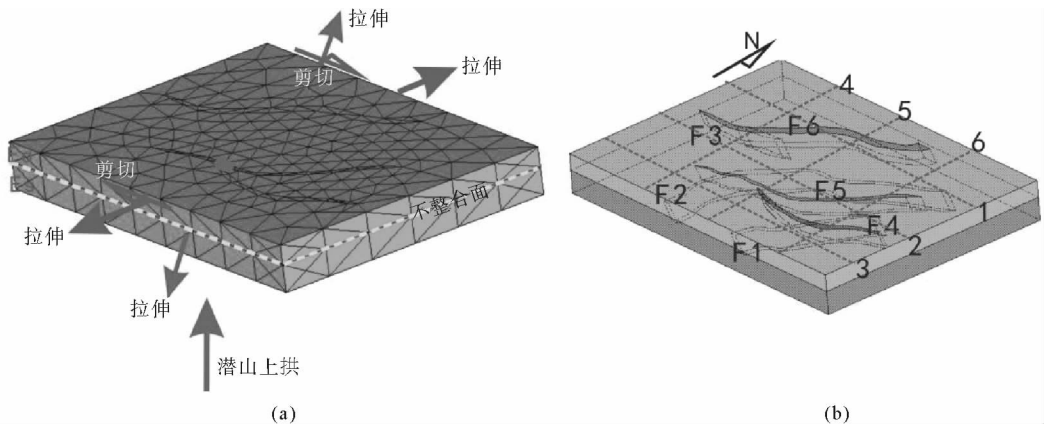


图 6 叠加构造地质模型建立及力学边界条件设置图

Fig. 6 Geological model of superimposed faults and setting of mechanical boundary conditions

为了获取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、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  $\varphi$  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  $\varphi$  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。

以构造形迹统计结果为基础,经过反复试验,最终确定沙一段末期和东三段末期两期应力方向: NW48°、47 MPa 和 SN、47 MPa,鉴于东三段末期存在一定左旋剪切应力场,剪应力设置为 14 MPa。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<sup>[11-12]</sup>,断裂泊松比取 0.27,弹性模量 18.0 GPa,密度 2.40 g/cm<sup>3</sup>;边框的断裂泊松比取 0.22,弹性模量 18.0 GPa,密度 2.40 g/cm<sup>3</sup>。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,沙河组顶部一段和东营组下部三段的密度接近,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,由于不整合面的长期风化淋滤作用,地层变得疏松,密度平均减小为 2.38 g/cm<sup>3</sup>,东三段为 2.507 g/cm<sup>3</sup>,不整合面附近密度为 2.39 g/cm<sup>3</sup>,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,不整合面附近强度平均为 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,本研究采用前人研究成果<sup>[11-12]</sup>,断裂泊松比取 0.27,弹性模量 18.0 GPa,密度 2.40 g/cm<sup>3</sup>;边框的断裂泊松比取 0.22,弹性模量 18.0 GPa,密度 2.40 g/cm<sup>3</sup>。以构造形迹统计结果为基础,经过反复试验,最终确定沙一段末期和东三段末期两期应力方向: NW48°、47 MPa 和 SN、47 MPa,鉴于东三段末期存在一定左旋剪切应力场,剪应力设置为 14 MPa。

表 1 岩石力学参数测试结果

Tab.1 Test results of rock mechanics parameters

岩心组	岩性	地层	围压/MPa	峰值强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	内摩擦系数
A 组	油斑细砂岩	Es <sub>1</sub> <sup>中</sup>	10	154.83	15.62	0.213	62.44	1.912
	块状细砂岩	Ed <sub>3</sub> <sup>下</sup>	20	297.92	26.08	0.195		
B 组	油斑含砾粗砂岩	Es <sub>1</sub> <sup>中</sup>	10	155.87	18.20	0.231	49.02	1.151
	中砂岩	Es <sub>1</sub> <sup>中</sup>	20	210.92	21.48	0.243		
C 组	中砂岩	Es <sub>1</sub> <sup>中</sup>	10	143.17	17.50	0.217	46.30	1.046
	中砂岩	Es <sub>1</sub> <sup>中</sup>	20	196.46	18.79	0.218		
D 组	粗砂岩	Es <sub>1</sub> <sup>中</sup>	20	228.18	20.55	0.213	34.4	0.647
	细砂岩	界面	20	201.23	20.15	0.219		
	含砾粗砂岩	Ed <sub>3</sub> <sup>下</sup>	20	141.09	14.07	0.129		
E 组	含砾粗砂岩	Es <sub>1</sub> <sup>中</sup>	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 <sub>1</sub> <sup>中</sup>	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		

模拟结果显示:东营组最小主应力分布不规则(图 7),整体为张应力,断裂 F5 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,加上基底断裂影响,总体上以伸展作用为主,主断裂之间存在左旋剪切作用,部分断裂呈雁列式展布。如东营组变形期左旋、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,西北侧和南侧则以右旋剪应力为主(图 7)。此类应力环境与图中东三段次级雁列式断裂体系分布特征十分吻合。

沙河街组最小主应力只在研究区东南部显示为挤压性质,其他地区皆为拉张性质,且拉/压边界受 NE 走向主断裂影响显著,尤其在断裂 F2 附近存在强烈伸展应力环境,控制产生了 F2 和 F1 之间的横向断裂。沙河街组平面剪应力性质具有明显分区特点,在断裂 F1 和 F3 之间为右旋拉伸,其他地区为左旋拉伸,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分布差异大(图 8)。尽管两者高值区都位于 F2 和 F5 断裂西段,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,还会在上覆地层形成新的次级断裂。早期地层在深部潜山和古地貌的影响下,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  $30^\circ$  的断裂发生继承性活动并在平面内延伸<sup>[4,13]</sup>,又可以消耗一部分能量。当先存断裂不能继续活动时,则累计的构造能量会在上部地层产生新的主断裂,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(图 8)。

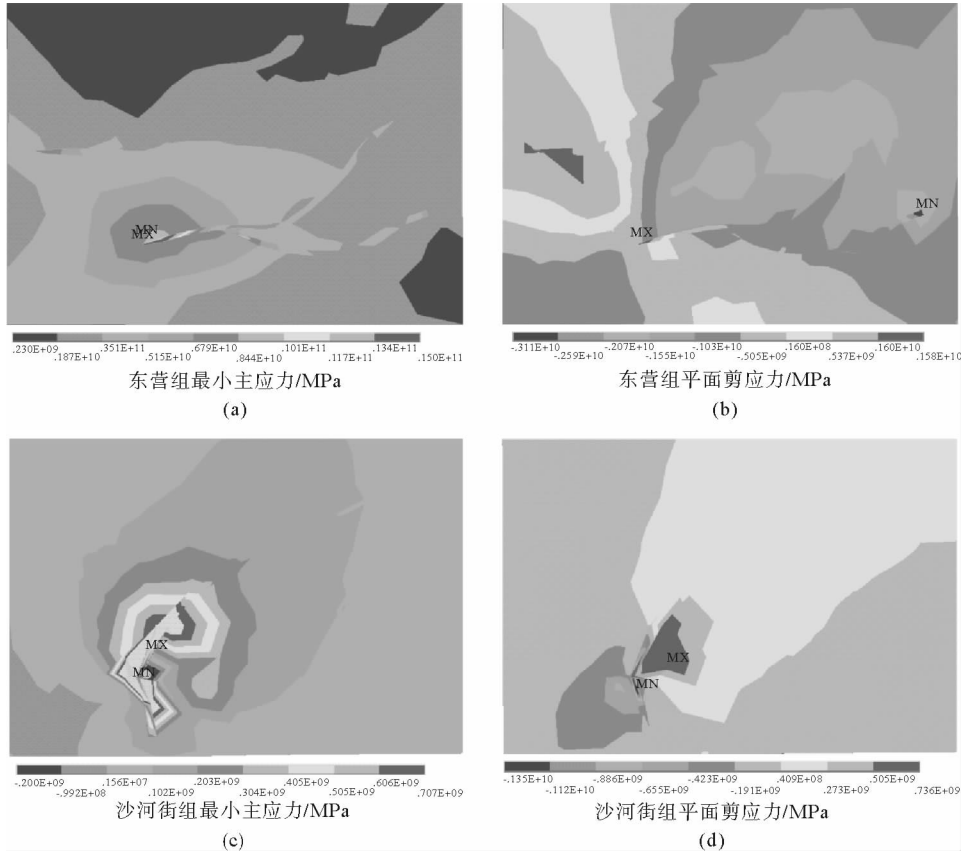


图 7 叠加断裂系统模拟主应力及剪应力平面分布图

Fig. 7 Stress distribution maps of superimposed fault system through finite simulation

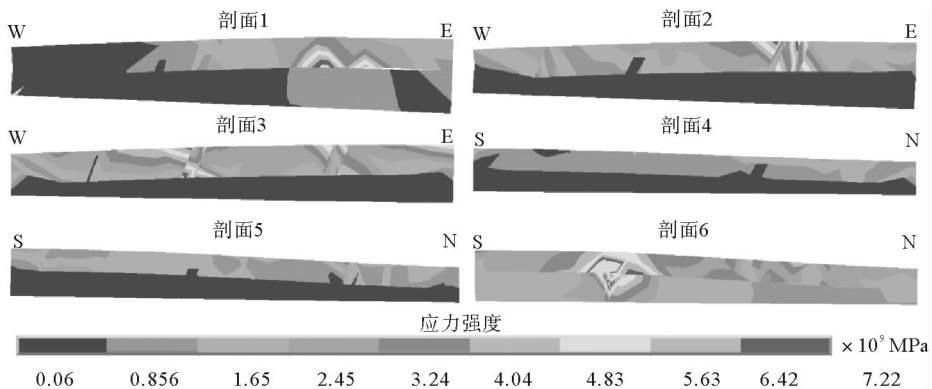


图 8 叠加断裂系统模拟应力强度剖面分布图

Fig. 8 Stress intensity distribution profiles of superimposed fault system through finite simulation



### 5 区域动力学背景

南堡凹陷在属性上具有典型主动裂谷特征,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<sup>[14]</sup>。渤海湾盆地的多期裂谷作用,通常划分为三个裂谷演化阶段: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<sup>[15-16]</sup>,但其新生代构造演化还具有许多新的特点,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。主要表现为断裂作用加剧、拉张作用增强、沉积速率加快等特点。

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<sup>[17]</sup>,不同时期的构造活动,对于南堡凹陷的形成、演化和改造均具有重要影响。其活动时间可分为五期: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、晚更新世至今五个活动阶段<sup>[18]</sup>,平面上可分为三段(北段:肇兴—沈阳;中段:沈阳—宿迁;南段:宿迁—广济)。尤其是近年来断裂带附件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。

郯庐大断裂古近纪早期的活动性质及强度在不同地段具有不同表现: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,派生的北西向拉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 9)。

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 SE102°~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:南段由于受近东西向挤压应力作用,以挤压-逆冲活动特征为主<sup>[19]</sup>;北段具有一定继承性,以正断活动为主,兼有右行滑动,但活动强度较前一时期弱。这个时期相当于南堡凹陷的沙河街期和东营期,其中沙河街早中期是应力场发生转化时期,由北东向拉张逐渐转换为南北向拉张兼具走滑特征,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 NE170°~NW350°,郯庐断裂带发生了正断或走滑运动,其活动强度南弱北强,以渤海湾活动最强烈。

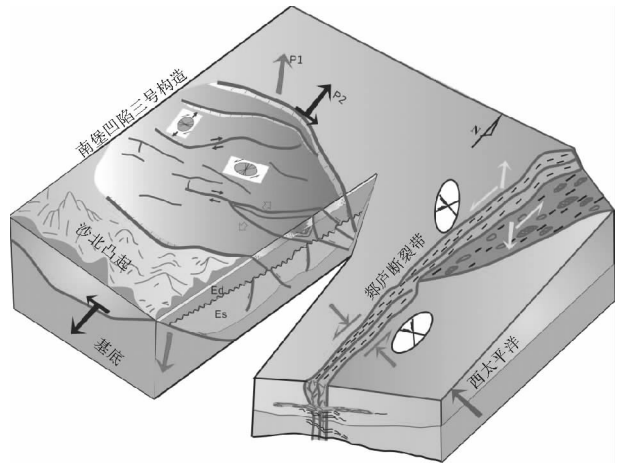


图 9 郯庐大断裂中始新世至渐新世活动对南堡 3 区断裂发育的控制模式  
Fig. 9 Control mode of major Tan-Lu fault over the fault development in Nanpu No. 3 region from the Eocene to Oligocene

根据地震解释结果,南堡 3 区主要发育三组断裂体系: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,至新生代断裂活动趋于停止)、东西向断裂体系(形成于渐新世,结束于新生代末期,是控制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雁列断裂,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  $45^\circ$  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,造成了垂向上断裂的不连续发育现象(图 2)。

## 6 结论

1) 南堡凹陷 3 区古近系东营组-沙河街地层中“X”型叠加断裂体系普遍发育,主要呈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,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  $30^\circ$  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,沙河街组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”现象,并出现应力集中现象,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]李四光.地质力学概论[M].北京:地质力学出版社,1999.
- [2]周海民,董月霞,夏文臣,等.断陷盆地油气勘探理论与实践:以渤海湾盆地南堡凹陷为例[M].北京:中国石油大学出版社,2001.
- [3]周天伟,周建勋.南堡凹陷晚新生代 X 型断层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.
- [4]童亨茂,聂金英,孟令箭,等.基底先存构造对裂陷盆地断层形成和演化的控制作用规律[J].地学前缘,2009,16(4):97-104. TONG Hengmao,NIE Jinying,MENG Lingjian,et al. The law of basement pre-existing fabric controlling fault formation and evolution in rift basin[J]. Earth Science Frontiers,2009,16(4):97-104.
- [5]MORLEY C K. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia[J]. Tectonophysics,2002,347(4):189-215.
- [6]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(4):646-663.
- [7]BYERLEE J D. Friction of rocks[J]. Pure and Application Geophysics,1978,116(4/5):615-626.
- [8]蔡蕊,刘浩.南堡凹陷高柳断裂带构造变形特征与物理模拟研究[J].特种油气藏,2013,20(4):41-44. CAI Rui,LIU Hao. Tectonic deformation and physical simulation of the Gaoliu fracture belt in Nanpu sag[J]. Special Oil and Gas Reservoirs,2013,20(4):41-44.
- [9]雷宝华.生长断裂活动强度定量研究的主要方法评述[J].地球科学进展,2012,27(9):947-956. LEI Baohua. Review of methods with quantitative studies of activity intensity of the growth fault[J]. Advances in Earth Science,2012,27(9):947-956.
- [10]童亨茂,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):1647-1661.

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): 1647-1661.

[11] 邓俊国, 王贤. 南堡凹陷构造应力场演化史与油气聚集[J]. *保定学院学报*, 1999, 12(2): 75-80.

DENG Junguo, WANG Xian. The evolution history on the tectonic stress field and the oil-gas accumulation[J]. *Journal of Baoding Teachers College*, 1999, 12(2): 72-77.

[12] 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]. *Geoscience*, 2000, 14(4): 435-439.

[13] 万天丰. 古构造应力场[M]. 北京: 地质出版社, 1988.

[14] 徐嘉炜, 马国锋. 郑庐断裂带研究十年的回顾[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.

[15] 王小凤, 李中坚, 陈柏林, 等. 郑庐断裂带[M]. 北京: 地质出版社, 2000.

[16] 张克鑫, 漆家福. 潍北盆地新生代构造演化及其与郑庐断裂带的关系[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2005, 27(6): 817-820.

ZHANG Kexin, QI Jiayu. Tectonic evolution of Weibei basin in Cenozoic and its relationship with Tanlu fault zone[J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 2005, 27(6): 817-820.

[17] 张慧. 太平洋板块俯冲对中国东北地区深地震影响机理的数值模拟研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2012.

[18] 朱光, 徐嘉炜, 孙世群, 等. 郑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.

(责任编辑: 高丽华)

## (上接第 59 页)

[14] 尉菲菲. 惠民凹陷商 741 地区沙一段火山岩储层分类评价[D]. 青岛: 山东科技大学, 2013.

[15] 董东. 济阳-昌潍拗陷火成岩油气藏体系形成机理和分布规律研究[J]. 北京: 中国科学院, 2001.

[16] 赵澄林, 刘梦慧, 胡爱梅, 等. 特殊油气储层[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 10-18.

[17] FENG Z H, YIN C H, LIU J J, et al. Formation mechanism of in-situ volcanic reservoirs in eastern China: A case study from Xushen gasfield in Songliao Basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(12): 2998-3014.

[18] ZOU C N, ZHU R K, ZHAO W Z, et al. Geologic characteristics of volcanic hydrocarbon reservoirs and exploration directions in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(1): 194-205.

[19] 王静, 国景星, 盛世锋, 等. 商河油田水下喷发火山岩储层特征[J]. *断块油气田*, 2008, 15(2): 40-42.

WANG Jing, GUO Jingxing, SHENG Shifeng, et al. Reservoir characteristics of igneous rock erupted under water in Shanghe oilfield[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2008, 15(2): 40-42.

[20] 单玄龙, 陈玉平, 唐黎明, 等. 火山岩储层综合评价方法与应用: 以松南气田营城组旋回三为例[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 30(3): 1-6.

SHAN Xuanlong, CHEN Yuping, TANG Liming, et al. Comprehensive evaluation method for volcanic rock reservoirs and its application: Taking Songnan gas field for example[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2011, 30(3): 1-6.

[21] 王岩泉, 边伟华, 刘宝鸿, 等. 辽河盆地火成岩储层评价标准与有效储层物性下限[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 2(40): 13-22.

WANG Yanquan, BIAN Weihua, LIU Baohong, et al. Evaluation criterion and cut-off value of igneous rock reservoirs in Liaohai Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2016, 2(40): 13-22.

(责任编辑: 李 磊)