

# 徐家围子断陷深层火石岭组致密火山岩 储层地应力分布规律研究

毛哲<sup>1,2</sup>, 曾联波<sup>1,2</sup>, 秦龙卜<sup>3</sup>, 祖克威<sup>1,4</sup>, 刘国平<sup>1,2</sup>, 田鹤<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

3. 大庆油田有限责任公司勘探事业部, 黑龙江 大庆 163453;

4. 中国石化中原油田分公司勘探开发科学研究院, 河南 郑州 450018)

**摘要:** 徐家围子断陷位于松辽盆地北部, 其深层中生代火石岭组为致密火山岩气藏, 天然裂缝发育, 地应力分布非均质性强。结合诱导裂缝法与井径崩落法进行单井现今地应力方向分析, 利用声波测井法计算现今地应力大小的纵向分布。依据火石岭组构造顶底面图、火山岩相组及断层分布特征建立非均质三维地质模型; 在动、静态岩石物理参数拟合校正的基础上, 结合实验测试及已有研究成果, 确定不同岩相组和断层岩石物理参数, 建立三维力学模型; 利用 Ansys 有限元数值模拟软件建立火石岭组三维数学模型并进行相关运算获得三维现今地应力分布模型。计算结果表明在火石岭组地层中, 水平最大主应力方向主要为东西向, 应力值范围在 86~110 MPa; 水平最小主应力方向主要为南北向, 应力值范围在 67~84 MPa。分析模拟结果可知火山岩相、断层和构造起伏三者对火石岭组现今地应力分布影响较大。其中水平主应力的方向主要受断层和近火山口相分布的影响, 而水平主应力的大小则是受三者综合作用。在构造低部位, 近火山口相组发育处, 断层上盘及断层端部皆为主应力的集中区域。依据现今地应力研究成果可为徐家围子断陷下一步开发井网部署、压裂改造方案和水平井的设计以及注水管理提供重要指导。

**关键词:** 现今地应力; 岩石物理参数; 火山岩储层; 数值模拟; 火石岭组; 徐家围子断陷  
**中图分类号:** P618.13      **文献标识码:** A

## RESEARCH ON GROUND STRESS DISTRIBUTION RULES OF DEEP TIGHT VOLCANIC ROCK RESERVOIRS IN THE HUOSHILING FORMATION, XUJIAWEIZI FAULT DEPRESSION

MAO Zhe<sup>1,2</sup>, ZENG Lianbo<sup>1,2</sup>, QIN Longbu<sup>3</sup>, ZU Kewei<sup>1,4</sup>, LIU Guoping<sup>1,2</sup>, TIAN He<sup>1,2</sup>

(1. College of Earth Science, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing 102249, China;

3. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Company, Ltd., Daqing 163453, Heilongjiang, China;

4. Research Institute of Exploration and Development, Zhongyuan Oilfield Company, Sinopec, Zhengzhou 450018, Henan, China)

**Abstract:** The Xujiaweizi Fault Depression is located in the north of the Songliao basin, and its deep

**基金项目:** 国家科技重大专项 (2017ZX05009001)

**作者简介:** 毛哲 (1991-), 男, 在读硕士, 研究方向为非常规油气储层地质评价、应力场分析与应用。E-mail: maozhe.cup@gmail.com

**通讯作者:** 曾联波 (1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向为储层裂缝形成、分布及预测技术, 应力场分析与应用, 非常规油气储层地质评价等。E-mail: lbzeng@sina.com

**收稿日期:** 2018-01-23; **修回日期:** 2018-04-13

范二平编辑

Mesozoic Huoshiling formation is a dense volcanic gas reservoir with natural fracture development and strong heterogeneity of the stress distribution. The present ground stress orientation of single well is analyzed by induced fracture method and well diameter caving method, and the longitudinal distribution of present ground stress is calculated by acoustic logging method. The heterogeneous three-dimensional geological model is established according to the top-and-bottom surface maps, volcanic facies groups and fault distribution characteristics of the Huoshiling Formation. Based on the fitting and correction of dynamic and static rock physical parameters, the physical parameters of different lithofacies groups and fault rocks are determined in combination with experimental tests and existing research results, and the three-dimensional mechanical model is established. Ansys finite element numerical simulation software is used to establish the three-dimensional mathematical model of the Huoshiling Formation and to obtain the three-dimensional present ground stress distribution model by correlative calculation. The calculated results show that in the Huoshiling Formation the preferred orientation of the maximum horizontal principal stress is EW, with the stress values range from 86 to 110 MPa, and the minimum horizontal principal stress preferred orientation is SN, with the stress values range from 67 to 84 MPa. The simulation results show that the volcanic facies, characteristics of faults and structural relief have great influences on the present ground stress of the Huoshiling Formation, Xujiaweizi Fault Depression. Among them the horizontal principal stress orientation is greatly affected by the distribution of faults and the near-crater facies, while the value of the horizontal principal stress is controlled by them three. The horizontal stress in the lower position of the depression, the near crater facies and the fault ends are high. The results of present ground stress can provide important guidance for the next-stage of well networks arrangement, fracturing reformation scheme, horizontal well design and water injection management in the Xujiaweizi Fault Depression.

**Key words:** present ground stress; rock physical parameters; volcanic reservoir; numerical modeling; the Huoshiling Formation; the Xujiaweizi Fault Depression

## 0 引言

地应力是客观存在的一种自然力, 狭义的地应力是指赋存于地壳中的内应力<sup>[1]</sup>, 广义的地应力是指地球内不同时期的应力状态, 亦称原岩应力<sup>[2]</sup>。根据应力状态存在的时间差异, 可将地应力分为古地应力和现今地应力, 而现今地应力是相对古应力而言的, 包括构造运动产生的应力、上覆岩层的自身重力、孔隙中流体产生的压力和地下深部热产生的应力等<sup>[3]</sup>。正确认识现今地应力是油气田开发井网布置、评价天然裂缝有效性、调整开发方案的必要条件<sup>[4-5]</sup>, 也是油气层压裂改造的重要参考依据<sup>[6-7]</sup>。相关学者针对徐家围子断陷沙河子组和营城组的现今地应力特征做了大量研究<sup>[8-9]</sup>, 但由于火石岭组埋深大, 构造起伏大, 火山岩相多且地球物理资料较少, 导致其现今地应力研究几近空白, 严重制约了该区深层天然气勘探开发进程。

现今地应力研究方法主要有震源机制解法、水力压裂法、井径崩落法、声发射法、应力解除法、应力场数值模拟法等, 其中数值模拟方法具有经济实惠、数据要求较低、普适性强等特点。应力场数值模拟主要分为有限元和离散元两种方法, 其常见的应用软件有 Petrel、FLAC、PFC、ABAQUS、ANSYS 等。目前现今地应力数值模拟主要是进行二维数值模拟, 无法展示地应力在垂向上的变化, 而少量的三维数值模拟<sup>[10-11]</sup>, 也多将同一地层赋以相同的岩石物理参数, 未考虑单层组内垂向上的岩相分布非均质性以及平面岩相非均质性地应力的影响。文章以徐家围子断陷深层火石岭组为研究对象, 在单井地应力计算的基础上, 结合区域地质概况和构造背景, 根据不同层位的几何形状及大小、构造格架、岩相特点和区域边界, 利用 ANSYS 有限元软件进行现今地应力场三维数值模拟, 并以矫正后的测井计算结果作为数值模拟结果的检验标准, 反复调整模型, 以得到较为真实的三维地应力展布规律。然后对

火石岭组现今地应力分布规律进行了研究, 总结了该区致密火山岩储层地应力的分布规律, 为徐家围子断陷深层火石岭组致密火山岩天然气的勘探开发提供地质依据。

## 1 区域地质概况

徐家围子断陷位于我国松辽盆地北部<sup>[12]</sup>, 北至安达市, 南至肇源县, 构造位置上属于松辽盆地深层东南断陷区和中央拗陷区两个一级构造单元交界处的二级构造单元(见图1)。断陷南北长135 km, 东西宽约15~45 km, 总面积为5350 km<sup>2</sup><sup>[13]</sup>。在近南北向徐西控陷断裂、近北西向徐中断裂和徐东断裂带的控制下, 构成了徐家围子断陷中部宽、埋深大, 南北狭窄、埋深浅的典型西断东超式箕状地堑。

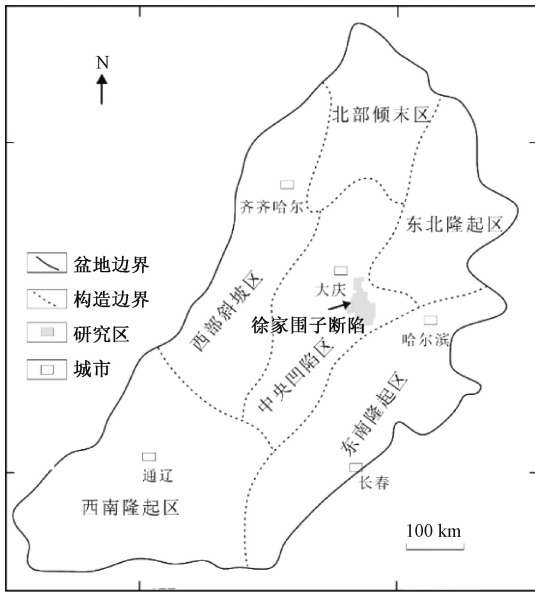


图1 松辽盆地构造单元划分<sup>[12]</sup>

Fig. 1 Division of tectonic units in the Songliao Basin

徐家围子断陷共经历了6个构造阶段: 火石岭期——初始断陷阶段, 沙河子期——强烈断陷阶段, 沙河子期末——挤压反转阶段, 营城期——断拗转换阶段, 登娄库期——拗陷沉降阶段。断陷自下而上发育上侏罗统火石岭组、下白垩统沙河子组、营城组和登娄库组。其中火石岭组埋深大多超过3500 m, 以中基性火山岩为主, 含少量酸性岩<sup>[14]</sup>, 其物性变化范围较大, 孔隙度约为3%~18.8%, 渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 120 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 属于深层火山岩致密储层。目前在营城组2

套火山岩中发现了规模较大的气藏, 火石岭组火山岩将成为下一步勘探的重要目标。深层致密储层中优势区域多为裂缝较为发育区<sup>[15]</sup>, 且通常需要进行人工压裂改造以获取工业产能, 故对火石岭组现今地应力进行研究具有重大意义。

## 2 井点实测应力状态

### 2.1 地应力方向

井壁崩落法和钻井诱导裂缝法是判断深部地应力方向的有效方法。井壁崩落是由于当地层中存在水平差应力时, 井眼周围会产生应力集中现象, 且在最小主应力方向切向应力最大, 若切向应力大于岩石的破裂强度, 井壁岩石会破碎崩落并形成椭圆形井口。通常井壁崩落方位可以通过双井径和成像测井资料进行确定<sup>[16]</sup>, 但是常规测井方法确定方位时存在较大误差, 故选择精度高的FMI等成像测井图像确定井壁崩落方位。井壁崩落后椭圆形井口的长轴方向是水平最小主应力方向, 短轴方向是水平最大主应力方向。

钻井诱导缝是因为在致密储层钻井过程中, 地层应力会在井筒中得到释放, 并在井壁附近形成一组近于平行的应力释放缝。裂缝的产状受地应力状态控制, 裂缝特征可以从FMI图像上反映出来, 裂缝面法线方向平行于最小主应力方向<sup>[17-18]</sup>。在钻井过程中由于泥浆压力高于地层破裂压力, 引起地层破裂形成张性的重泥浆压裂缝, 在FMI图像上一般呈180°对称出现的暗色垂直条带<sup>[18-19]</sup>, 其走向与水平最大主应力方向平行。

根据徐家围子断陷钻遇火石岭组5口井的FMI成像测井资料, 该区的井壁崩落的优势方位为近180°和360°, 反映水平最大主应力方位为90°(见图2)。诱导裂缝发育段在FMI图像上呈180°对称出现的暗色垂直条带并伴生两组羽状微裂缝, 诱导裂缝的平均走向89°, 反映水平最大主应力的优势方向为89°(见图3), 井壁崩落法和钻井诱导裂缝法确定的水平最大主应力方位基本一致, 均为东西向。统计火石岭组5口井的成像测井解释结果和营城组48口成像测井解释结果显示研究区火石岭组现今地应力的最大主应力方向为近东西向的分布(见图4), 营城组水平最大主应力方位以东西向为主, 局部地区为北西西—南东东向(见图5)。

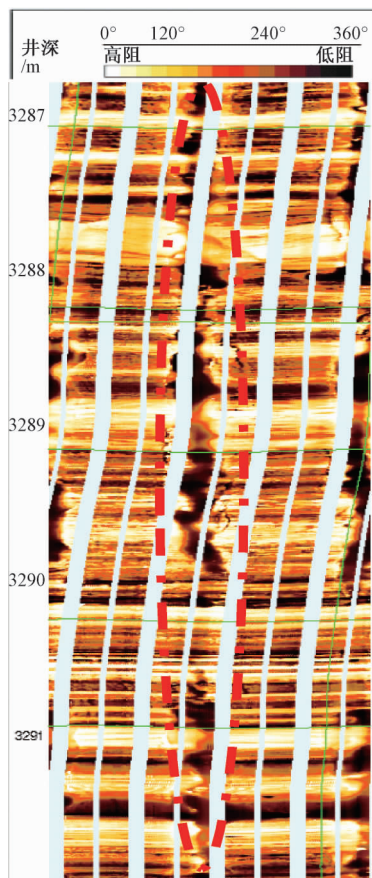


图2 Ds 11井井径崩落FMI图

Fig. 2 The borehole breakout FMI image of well Ds 11

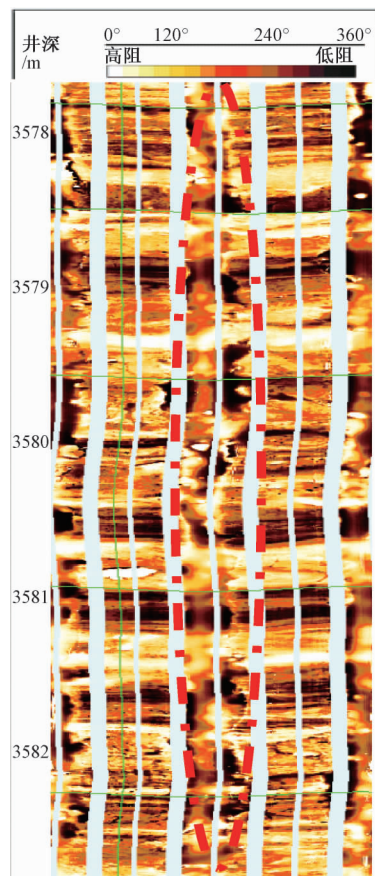


图3 Xs 17井钻井诱导缝图

Fig. 3 Drilling induced joint of well Xs 17

## 2.2 地应力大小

声波测井资料是计算单井地应力大小分布规律的有效手段。利用声波测井法计算地应力是根据声波传播速度在不同的岩石和流体中不同的原理，间接求得地应力大小的方法。由于岩石力学参数与岩体中赋存的地应力密切相关，故在进行地应力计算时必须采用合理的岩石力学参数。根据岩石力学参数的获取方式可分为静态力学参数和动态力学参数，静态参数主要是室内的岩石力学实验获取，而动态参数则是利用地球物理信息如声速测量、测井或地震等方法间接获取。文章利用声波测井法对研究区力学参数进行计算，并将计算结果与实验室测得的静态岩石力学参数进行比较，两者之间具有一定的差别。在实际施工过程中，应以静态参数作为施工标准<sup>[20-22]</sup>，因此需要将动态参数转换为静态参数。对研究区动、静态岩石力学参数进行回归分析（见图6），可以看出两种杨氏模量相关性较好，相关系数达到0.915，而两种泊松比相关性较差。利用公式（1）对动态杨氏模量进行校正，而泊松比直接采用动

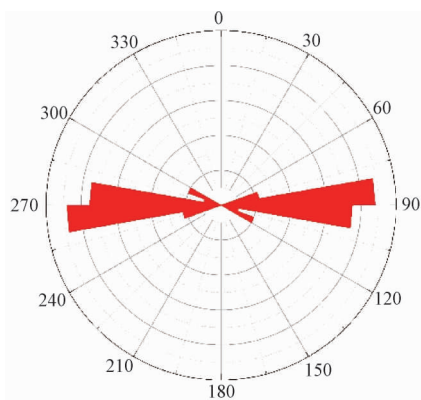


图4 火石岭组水平最大主应力方位图

Fig. 4 Orientation diagram of the horizontal maximum principal stress of the Huoshiling Formation

态泊松比。

$$E_{\text{静态}} = 3.827 \times E_{\text{动态}} - 164.1 \quad (1)$$

目前，应用于声波测井的单轴应变模型主要有金尼克模型、Mattews 和 Kelly 模型、Terzaghi 模型、Anderson 模型及 Newberry 模型等，其中 Newberry 模型主要应用于低渗透、具有裂缝的地层<sup>[23]</sup>。火

石岭组为火山岩致密储层, 微裂缝较为发育, 储层具有低孔低渗的特征, 满足 Newberry 模型应用条件。因此采用 Newberry 模型计算水平最小主应力, 通过双井径模型中的应力非平衡系数<sup>[24]</sup>计算水平最大主应力值。

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1 - \mu}(p_0 - \alpha p_p) + p_p \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1 + K \left[ 1 - \left( \frac{D_{min}}{D_{max}} \right)^2 \right] \frac{E}{E_{ma}} \quad (3)$$

$$\sigma_H = \lambda \times \sigma_h \quad (4)$$

公式中:  $\sigma_h$  为水平最小主应力, MPa;  $\sigma_H$  为水平最大, MPa;  $P_p$  为孔隙压力, MPa;  $P_0$  为上覆岩层压力, MPa;  $\mu$  为泊松比;  $\alpha$  为比奥数;  $\lambda$  为

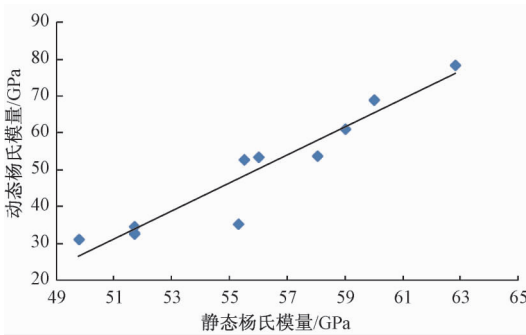


图6 动态力学参数和静态力学参数关系图

Fig. 6 The relation graph between dynamic and static mechanical parameters

应力非平衡系数;  $K$  为刻度系数, 取值范围为 1 ~ 3;  $D_{min}$ 、 $D_{max}$  分别为双井径的最大值和最小值, m;  $E$ 、 $E_{ma}$  分别为杨氏模量和岩石骨架杨氏模量, GPa。

根据徐家围子断陷钻遇火石岭组 5 口井的声波测井资料计算, 火石岭组水平最大主应力在 84 ~ 94 MPa 之间, 水平最小主应力在 72 ~ 80 MPa 之间; 随着深度增加, 水平主应力有增大的趋势(见图 7), 其中最大主水平应力随深度的增加的平均梯度为 0.021 MPa/m, 最小主水平应力增加梯度平均为 0.017 MPa/m。

### 3 应力场模拟及地应力分布规律

#### 3.1 应力场三维有限元数值模拟

为探究徐家围子断陷火石岭组现今地应力在三维空间中的分布特征, 研究采用了 ANSYS 软件有限元方法, 通过建立地质模型、力学模型、数学模型并施加边界条件等步骤进行现今应力场三维

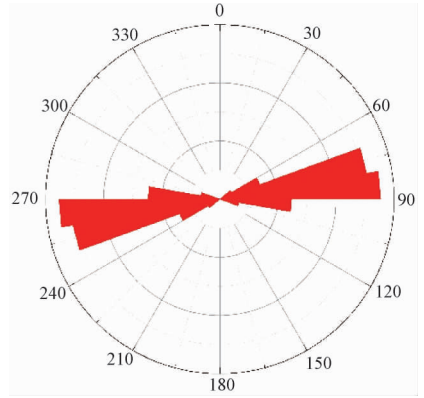


图5 营城组水平最大主应力方位图

Fig. 5 Orientation diagram of the horizontal maximum principal stress of the Yingcheng Formation

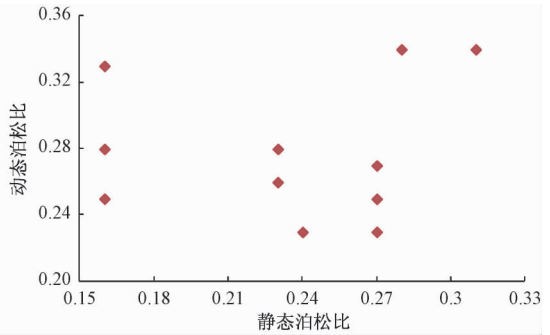


图6 动态力学参数和静态力学参数关系图

Fig. 6 The relation graph between dynamic and static mechanical parameters

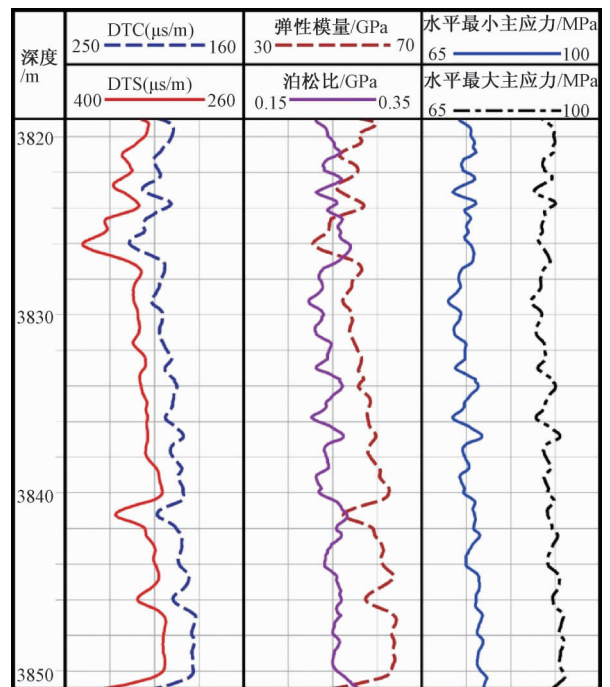


图7 Xs 17 井单井地应力剖面图

Fig. 7 The single well stress profile of well Xs 17

数值模拟<sup>[25]</sup>。首先建立地质模型,依据地层顶面构造图,建立地质模型的空间骨架;利用工区断层级次划分资料,保留影响研究区构造格局的断层,忽略小断层;根据火山岩岩相资料,刻画不同岩相空间分布,将同一岩体与上下相邻层隔离开,使得地质模型更加接近真实地质情况。然后建立力学模型,根据不同岩性样品的三轴力学实验结果和声波测井结果确定不同火山岩相的泊松比、弹性模量、残余内摩擦角、残余内聚和岩体抗拉强度等岩石力学参数范围,并且结合岩相分布特征反复模拟调整最终确定相关参数<sup>[26]</sup>(见表1)。研究区断裂发育,而断裂带内部样品又过于破碎和松散,无法通过三轴力学实验获取相关岩石力学参数,因此依据已有研究成果<sup>[27]</sup>,将正常岩体杨氏模量的40%~70%,泊松比增加0.02作为断裂带的初始岩石力学参数,结合岩相和断裂分布特征反复模拟最终确定断裂带相关参数(见表1)。其次建立数学模型,在力学模型的基础上运用ANSYS自带功能进行网格剖分和加密,在构造起伏较大的部位尽可能提高网格密度,在构造平缓区域降低网格密度,模型共划分207243个单元。最后施加边界条件,依据上文单井地应力研究结果在东西方向一侧施加水平最大主应力,其大小随着深度的变化即 $\sigma_{Hmax} = 0.021 \text{ MPa/m}$ ;在南北方向施加水平最小主应力,其大小随着深度的变化即 $\sigma_{Hmin} = 0.017 \text{ MPa/m}$ ;垂向方向应力为重力,岩石力学参数的密度值取平均密度 $\rho = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

表1 各个岩相及断裂带的力学参数  
Table 1 The mechanical parameters of each lithofacies and fault zone

岩相和断裂带	弹性模量/GPa	泊松比
近火山口相组	69	0.22
近源相组	62	0.21
远源相组	54.5	0.18
断裂带	14	0.35

经验表明<sup>[28]</sup>,模拟结果准确与否需经过声波测井结果进行检验,通常认为地应力大小的相对误差小于10%,地应力方向误差小于10°以内时,模拟结果较为可靠。为检验数值模拟结果的可靠性,利用声波测井计算的地应力结果对水平地应力大小进行了检验,利用井壁崩落法和钻井诱导缝资料得到的地应力方位对水平地应力方向进行了检验。根据钻遇目的层的5口井的检测与对比,

其水平最大主应力方向的相对误差平均为5.46%(见表2),其水平最小主应力大小的平均误差为5.6%(见表3),说明数值模拟结果是可信的。

表2 火石岭组地应力方位数值模拟结果检验对比表  
Table 2 Comparison of the simulation results of the orientations of principal stress by measurements in the Huoshiling Formation

井名	地应力方位/(°)	数值模拟结果/(°)	误差
Xs 33井	89.9	87	3.3%
Xs 17井	86.8	87.8	1.2%
Zs 14井	87.3	90.6	3.8%
Ds 11井	101	87	13.8%
Ds 13井	82.2	78	5.2%

表3 火石岭组地应力大小数值模拟结果检验对比表  
Table 3 Comparison of the simulation results of the principal stress calculated by logging data in the Huoshiling Formation

井名	最小主应力值/MPa	数值模拟结果/MPa	误差
Xs 33井	69.8	74.3	6.4%
Xs 17井	53.5	56.0	4.7%
Zs 14井	45.9	49.0	6.8%
Ds 11井	57.2	58.1	1.6%
Ds 13井	50.5	46.3	8.5%

### 3.2 地应力的空间展布规律

徐家围子断陷内火石岭组地应力表现为压应力,现今地应力方向模拟结果表明,火石岭组水平最大主应力方向以东西向为主,水平最小主应力方向以南北向为主。受断层和火山岩相分布的影响,研究区局部地区地应力方向存在较大程度的偏转,例如在安达和肇州两个地区水平最大主应力方向为北西—南东向,水平最小主应力方向为北东—南西向。结合研究区断层和火山岩相分布特征分析地应力方向数值模拟结果可知,在断层端部附近地应力方向发生严重偏转,断层中部地应力方向偏转程度减小,且随着与断层距离的增加水平最大主应力方向逐渐转为东西向,水平最小主应力方向逐渐转为南北向;在近火山口相组中地应力方向偏转程度较大,而在近源相组和远源相组中地应力方向与区域地应力方向基本保持一致。统计研究区断裂发育处和不同火山岩相中水平最大主应力方向改变量结果显示,断层附近(断层端部除外)水平最大主应力方向偏转角度最大平均值为18°;近火山口相附近水平最大主应力方向偏转角度较小,平均偏转角度为8.2°;而在近源相组和远源相组中水平最大主应力方向与区域应力方向基本保持一致(见图8)。由此可见,断层的分布对火石岭组现今地应力方向影响

最大, 其次是近火山口相的分布, 而近源相和远源相基本不影响地应力方向。

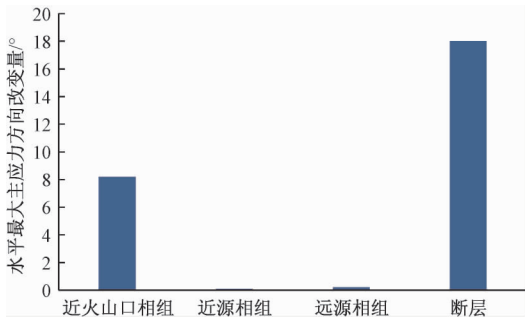


图8 断层带及不同岩相水平最大主应力方向改变量对比图

Fig. 8 The comparison of principal stress orientation changes in different lithofacies and fault zone

由火石岭组水平主应力三维数值模拟结果可知, 研究区水平主应力值变化很大, 分布特征鲜明, 水平最大主应力变化范围主要集中在 86 ~ 110 MPa, 局部可达 120 MPa, 水平最小主应力变化范围在 67 ~ 84 MPa, 局部可达 90 MPa。研究区火石岭组地应力受构造起伏影响较大, 在徐中断裂带东侧的徐东凹陷和北部的安达凹陷火石岭组埋深较深, 水平主应力值大, 而在周边的斜坡带和隆起区火石岭组埋深较浅, 水平主应力值较小, 地应力值随目的层埋深增加而增加。同时, 火山岩相分布对水平主应力值大小也有较大的影响, 在近火山口相组附近的水平主应力较高, 水平最大主应力平均值约为 103 MPa, 最小主应力平均值约为 82 MPa; 在远源相组如火山爆发相区和火山沉积相区的地应力值普遍较低, 水平最大主应力平均值约为 94 MPa, 最小主应力平均值约为 74 MPa; 而近源相组地应力值大小则介于两者之间。此外, 断裂带对地应力值大小影响明显, 在断层端部附近地应力集中, 水平最大主应力值可达 110 MPa 以上, 而断裂带内部由于较为破碎其应力值较低, 水平最大主应力平均值约为 88 MPa, 最小主应力平均值约为 69 MPa (见图 9)。

## 4 讨论

通过上述研究可知, 火山岩相、断层和构造起伏对今地应力的影响较大, 且主要表现在 2 个方面: 一是地应力方向的偏转, 二是地应力大小的相对集中。岩性对地应力影响较大<sup>[29-31]</sup>, 相比于

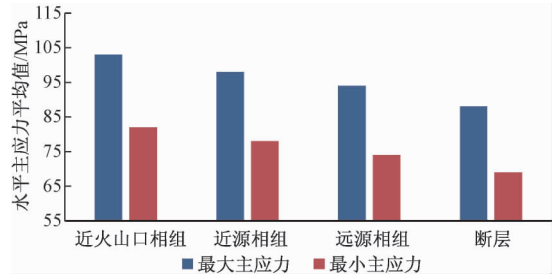


图9 断层带及不同岩相水平主应力大小分布对比图

Fig. 9 The comparison of principal stress changes in different lithofacies and fault zone

沉积岩和变质岩, 火山岩对地应力的敏感度更高, 其水平应力值和差应力值最大<sup>[32]</sup>。近火山口相组岩性以火山角砾岩为主, 近源相组岩性以安山岩和火山角砾岩为主, 远源相组岩性以凝灰岩和沉积凝灰岩为主<sup>[33]</sup>, 通过对不同岩性样品进行岩石三轴力学实验获得对应火山岩相组的力学参数范围, 并通过反复模拟最终确定不同岩相组的相关参数。已有研究表明, 断层走向与最大主应力方向间的夹角、断层规模和形态、相对断层距离等都会造成地应力方向和大小的变化<sup>[34-35]</sup>, 断层作为一个“软弱区”, 其弹性模量通常为正常沉积地层的 50% ~ 70%, 泊松比比正常地区大<sup>[36]</sup>, 且断裂越发育其杨氏模量越小, 泊松比越大。研究区构造复杂、断裂发育, 依据杨氏模量 40% ~ 70%、泊松比增加 0.02 确定断裂带岩石力学参数的数值模拟结果与测井计算地应力结果存在较大误差, 故通过减小断裂带的杨氏模量, 增加泊松比反复模拟并以测井计算地应力结果进行验证, 最终确定断裂带的杨氏模量 14.0 GPa 约为正常地区的 23%, 泊松比为 0.35, 比正常地区大 0.14。数值模拟结果显示, 徐家围子火石岭组水平最大主应力方向为近东西, 与相关学者对沙河子组和营城组地应力方向研究结果一致<sup>[8-9]</sup>; 水平最大主应力值范围为 86 ~ 110 MPa, 比沙河子组水平最大主应力值 (85 ~ 93 MPa)<sup>[9]</sup>要大, 是岩相和构造起伏的综合作用结果。此外, 岩相和断层分布对地应力方向有较大影响<sup>[37-38]</sup>, 数模结果显示在近火山口相和断裂带附近 (非断层端部) 水平最大主应力平均偏转角度分别为 8.2° 和 18.2°, 与对三肇地区断层附近地应力方向偏转量的研究结果 (10° ~ 20°) 相近<sup>[39]</sup>, 印证了数模结果的正确性。在断层端部地应力方向变化量大 (40° 以上), 已有学者

从孔口问题的角度进行了力学解析,认为在断层端部区域环向应力很大,使得水平最大主应力沿断层走向方向偏转,而在远离断层端部时其区域环向应力不足以改变最大主应力方向<sup>[40]</sup>。构造起伏和埋藏深度对地应力大小及其状态有较大影响<sup>[41]</sup>,其主要原因是上覆岩层重力和局部变形的构造挤压,随深度增加水平主应力增加,且最大水平主应力增加梯度为 $\sigma_{H_{\max}} = 0.021 \text{ MPa/m}$ ,最小水平主应力增加梯度为 $\sigma_{H_{\min}} = 0.017 \text{ MPa/m}$ 。

火石岭组火山岩储集层具有低渗裂隙性储层特征<sup>[42]</sup>,且其深部的开启裂缝主要是构造成因,现今地应力控制了裂缝的有效性。此外深层天然气致密储层若想要实现工业开采,必须经过人工压裂<sup>[43-45]</sup>,且水力压裂后裂缝的延伸方向则受现今构造应力场控制<sup>[46-49]</sup>。徐家围子火石岭组水平最大主应力方向为近东西向,在断层端部和近火山口相组附近发生较大的改变。因此在该区域水平井部署轨迹应以为南北方向主,在断层端部和近火山口相组端部适当调整为南东-北西向,井网设置过程中尽量增加东西向的井距以扩大井网控制范围,降低生产开发成本。由于后遭起伏的影响,中部 Xs33 井区埋深较大地区储层压裂改造过程中施工压裂应力建议在 110 MPa 以上,而在南部 Zs14 井东北区等埋深较浅区域施工压裂压力建议在 88 MPa 以上,以达到破裂造缝的目的。工业油气井多为应力低值地区<sup>[47]</sup>,工区南北两端均属于地应力低值区,在裂缝发育的情况下,与埋藏较深的应力高值区存在一定的应力差,油气会在差应力和自身浮力的作用下发生运移,在地应力低值区的有利圈闭中形成油气藏。

## 5 结论

(1) 火山岩地层的应力场三维有限元数值模拟需考虑火山岩相组对地应力的影响,在建立力学模型时需依据岩石三轴力学实验结果和反复模拟确定不同火山岩相岩石力学参数。其中,近火山口相组杨氏模量为 69 GPa、泊松比 0.22,近源相组杨氏模量为 62 GPa、泊松比 0.21,远源相组杨氏模量为 54.5 GPa、泊松比 0.18。

(2) 火石岭组水平最大主应力方向近东西向,水平最小主应力近南北向。其中最大主应力在 86 ~ 110 MPa 之间,水平最小主应力在 67 ~ 84 MPa 之间,

且随深度增加主水平应力呈现增加的趋势,最大主水平应力随深度的增加的平均梯度为 0.021 MPa/m,最小主水平应力增加梯度平均为 0.017 MPa/m。

(3) 火山岩相、断层、构造起伏对徐家围子火石岭组现今地应力的影响较大。其中断层和火山岩相对地应力方向影响较大,在断层和近火山口相发育区域地应力方向改变明显。水平主应力值受构造起伏、火山岩相和断层影响较大,构造低部位比构造高部位水平主应力值大,近火山口相组水平主应力值大,断层整体为应力低值区,但在其端部会出现明显的应力集中。

(4) 在徐家围子火石岭组开发井网部署过程中,应充分考虑地应力分布的非均质性,特别是在构造起伏大、断层和近火山口相发育的地区,合理预测地层破裂压力、储层改造过程中裂缝的方位及几何尺寸,科学设计定向井及水平井井眼轨迹以及压裂过程中支撑剂强度及压裂方式等。为降低油田勘探开发成本,提升实际开采经济效益提供科学依据。

## 参考文献/References

- [1] 王仁. 固体力学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1979.  
WANG Ren. Foundations of solid mechanics [M]. Beijing: Geology Press, 1979. (in Chinese)
- [2] 胡明, 秦启荣, 陈继明, 等. 断层应力效应分析及其在裂隙性储层研究中的作用 [J]. 新疆石油地质, 1992, 13 (3): 280 ~ 284.  
HU Ming, QIN Qirong, CHEN Jiming, et al. Faulting stress analysis and its effect on the study of fractured reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1992, 13 (3): 280 ~ 284. (in Chinese with English abstract)
- [3] 谢润成, 周文, 邓虎成, 等. 现今地应力场特征评价一体化研究 [J]. 石油钻采工艺, 2008, 30 (4): 32 ~ 35.  
XIE Runcheng, ZHOU Wen, DENG Hucheng, et al. Integrated research methods of in-situ stress field characteristics [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30 (4): 32 ~ 35. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张学娟. 松辽盆地北部徐家围子断陷营城组火山岩天然气成藏规律研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.  
ZHANG Xuejuan. Study on the accumulation regularity of volcanic gas in Yingcheng formation of Xujiaweizi fault depression in northern Songliao basin [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [5] Gong L, Gao S, Fu X F, et al. Fracture characteristics and their effects on hydrocarbon migration and accumulation in tight volcanic reservoirs: a case study of the Xujiaweizi Fault depression, Songliao Basin, China [J]. Interpretation, 2017,



- 5 (4): 57~70.
- [6] 徐正顺, 王渝明, 庞彦明, 等. 大庆徐深气田火山岩气藏储集层识别与评价 [J]. 石油勘探与开发, 2006, 33 (5): 521~531.  
XU Zhengshun, WANG Yuming, PANG Yanming, et al. Identification and evaluation of Xushen volcanic gas reservoirs in Daqing [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33 (5): 521~531. (in Chinese with English abstract)
- [7] Kanagawa T, Hayashi M, Nakasa H. Estimation of spatial geostress components in rock samples using the kaiser effect of acoustic emission [J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1977, (58): 63~75.
- [8] 雷茂盛, 王玉华, 赵杰. 根据 FMI 资料分析大庆油田徐家围子断陷构造应力场 [J]. 现代地质, 2007, 21 (1): 14~21.  
LEI Maosheng, WANG Yuhua, ZHAO Jie. Analysis on Tectonic Stress Field of Xujiaweizi Rift in Daqing Oilfield with FMI [J]. Geoscience, 2007, 21 (1): 14~21. (in Chinese with English abstract)
- [9] 杨亮. 徐家围子断陷沙河子组现今地应力方向及展布 [J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35 (5): 48~52.  
YANG Liang. Directions and spread of the current terrestrial stress for Shahezi formation in Xujiaweizi Fault Depression [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35 (5): 48~52. (in Chinese with English abstract)
- [10] 谭成轩, 王连捷, 孙宝珊, 等. 含油气盆地三维构造应力场数值模拟方法 [J]. 地质力学学报, 1997, 3 (1): 71~80.  
TAN Chengxuan, WANG Liangjie, SUN Baoshan, et al. An approach to numerical simulation of 3-D tectonic stress field of the Oil-Gas-Bearing Basin [J]. Journal of Geomechanics, 1997, 3 (1): 71~80. (in Chinese with English abstract)
- [11] 石胜群. 三维构造应力场数值模拟技术预测泥岩裂缝研究应用 [J]. 中国西部科技, 2008, 7 (27): 1~2, 39.  
SHI Shengqun. Numerical simulation of 3-D tectonic stress field to predict the application of mudstone fractures [J]. Science and Technology of West China, 2008, 7 (27): 1~2, 39. (in Chinese)
- [12] 张尔华, 姜传金, 张元高, 等. 徐家围子断陷深层结构形成与演化的探讨 [J]. 岩石学报, 2010, 26 (1): 149~157.  
ZHANG Erhua, JIANG Chuanjin, ZHANG Yuangao, et al. Study on the formation and evolution of deep structure of Xujiaweizi Fault Depression [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26 (1): 149~157. (in Chinese with English abstract)
- [13] 姜传金, 苍思春, 吴杰. 徐家围子断陷深层气藏类型及成藏模式 [J]. 天然气工业, 2009, 29 (8): 5~7.  
JIANG Chuanjin, CANG Sichun, WU Jie. Types and pooling patterns of deep gas reservoirs in Xujiaweizi Fault Depression [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29 (8): 5~7. (in Chinese with English abstract)
- [14] 冯子辉, 王成, 邵红梅, 等. 松辽盆地北部火山岩储层特征及成岩演化规律 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
FENG Zihui, WANG Cheng, SHAO Hongmei, et al. Characteristics and diagenetic evolution of volcanic reservoirs in northern Songliao Basin [M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [15] Zeng L B, Su H, Tang X M, et al. Fractured tight sandstone oil and gas reservoirs: a new play type in the Dongpu Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97 (3): 363~377.
- [16] 闫伟林, 李红娟, 杨学峰, 等. 松辽盆地北部火山岩气藏测井评价技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
YAN Weilin, LI Hongjuan, YANG Xuefeng, et al. Logging evaluation technique and application of volcanic gas reservoir in northern Songliao Basin [M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [17] 刘之的, 夏宏泉, 汤小燕, 等. 成像测井资料在地应力计算中的应用 [J]. 西南石油学院学报, 2005, 27 (4): 9~12.  
LIU Zhidi, XIA Hongquan, TANG Xiaoyan, et al. The application of the formation stress calculation using image well logging data [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2005, 27 (4): 9~12. (in Chinese with English abstract)
- [18] 赵永强. 成像测井综合分析地应力方向的方法 [J]. 石油钻探技术, 2009, 37 (6): 39~43.  
ZHAO Yongqiang. A method of analyzing crustal stress orientation using imaging logging [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37 (6): 39~43. (in Chinese with English abstract)
- [19] 黄波. 成像测井地应力分析方法研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2008.  
HUANG Bo. Study of the formation stress analysis method for imaging logging [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008. (in Chinese with English abstract)
- [20] Montmayeur H, Graves R M. Prediction of static elastic/mechanical properties of consolidated and unconsolidated sands from acoustic measurements: correlations [A]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition [C]. New Orleans, Louisiana: SPE, 1986.
- [21] Yale D P. Static and dynamic rock mechanical properties in the Hugoton and Panoma Fields, Kansas [A]. SPE Mid-Continent Gas Symposium [C]. Amarillo, Texas: SPE, 1994.
- [22] 林英松, 葛洪魁, 王顺昌. 岩石动静力学参数的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17 (2): 216~222.  
LIN Yingsong, GE Hongkui, WANG Shunchang. Testing study on dynamic and static elastic parameters of rocks [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17 (2): 216~222. (in Chinese with English abstract)
- [23] 赵昊, 夏宏泉, 胡永东, 等. 公山庙构造地应力实验与测井计算分析 [J]. 国外测井技术, 2007, 22 (3): 22~25.  
ZHAO Hao, XIA Hongquan, HU Yongdong, et al. The formation stress experiment of Gongshangmiao structure and well logging calculation analysis [J]. World Well Logging Technology, 2007, 22 (3): 22~25. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘向君, 罗平亚. 石油测井与井壁稳定 [M]. 北京: 石油

- 工业出版社, 1999.
- LIU Xiangjun, LUO Pingya. Oil logging and wellbore stability [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [25] 曾联波, 肖淑蓉, 罗安湘. 陕甘宁盆地中部靖安地区现今应力场三维有限元数值模拟及其在油田开发中的意义 [J]. 地质力学学报, 1998, 4 (3): 58 ~ 63.
- ZENG Lianbo, XIAO Shurong, LUO Anxiang. The Three-dimensional finite element numerical simulation of modern stress field and its significance in the oil development of the Jing'an area in the central Shaanxi-Gansu-Ningxia basin [J]. Journal of Geomechanics, 1998, 4 (3): 58 ~ 63. (in Chinese with English abstract)
- [26] 朱焕春, 陶振宇. 不同岩石中地应力分布 [J]. 地震学报, 1994, 16 (1): 49 ~ 63.
- ZHU Huanchun, TAO Zhenyu. Stress distribution in different rocks [J]. Acta Seismologica Sinica, 1994, 16 (1): 49 ~ 63. (in Chinese)
- [27] 王双喜, 宋惠珍, 刘洁. 塔里木盆地构造应力场的数值模拟及其对油气聚集的意义 [J]. 地震地质, 1990, 21 (3): 268 ~ 273.
- WANG Shuangxi, SONG Huizhen, LIU Jie. Numerical modeling of tectonic stress field in Tarim Basin and its implication to hydrocarbon accumulation [J]. Seismology and Geology, 1990, 21 (3): 268 ~ 273. (in Chinese)
- [28] 刘洪涛, 谢兵, 杨向同, 等. 三维现今地应力场有限元数值计算 [J]. 长春工程学院学报 (自然科学版), 2016, 17 (4): 71 ~ 75.
- LIU Hongtao, XIE Bing, YANG Xiangtong, et al. The FEA numerical algorithm for 3D modern crustal stress field [J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 2016, 17 (4): 71 ~ 75. (in Chinese with English abstract)
- [29] 谭成轩, 孙炜锋, 孙叶, 等. 地应力测量及其地下工程应用的思考 [J]. 地质学报, 2006, 80 (10): 1627 ~ 1632.
- TAN Chengxuan, SUN Weifeng, SUN Ye, et al. A consideration on in-situ crustal stress measuring and its underground engineering application [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80 (10): 1627 ~ 1632. (in Chinese with English abstract)
- [30] 巩磊, 高帅, 吴佳朋, 等. 徐家围子断陷营城组火山岩裂隙与天然气成藏 [J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41 (2): 283 ~ 290.
- GONG Lei, GAO Shuai, WU Jiapeng, et al. Natural gas accumulation and fractures in volcanic rocks of Yingcheng Formation in Xujiaweizi Fault Depression [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41 (2): 283 ~ 290. (in Chinese with English abstract)
- [31] 祖克威, 曾联波, 刘喜中, 等. 厚层河道砂体地应力分布影响因素分析 [J]. 地质力学学报, 2014, 20 (2): 149 ~ 158.
- ZU Kewei, ZENG Lianbo, LIU Xizhong, et al. Analysis of influencing factors for ground stress in channel sandstone [J]. Journal of Geomechanics, 2014, 20 (2): 149 ~ 158. (in Chinese with English abstract)
- [32] 景锋, 盛谦, 张勇慧, 等. 不同地质成因岩石地应力分布规律的统计分析 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (7): 1877 ~ 1883.
- JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yonghui, et al. Statistical analysis of geostress distribution laws for different rocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (7): 1877 ~ 1883. (in Chinese with English abstract)
- [33] 于宝利, 刘新利, 范素芳, 等. 火山岩相地震研究方法及应用 (为庆祝塔里木油田石油会战 20 周年而作) [J]. 新疆石油地质, 2009, 30 (2): 264 ~ 266.
- YU Baoli, LIU Xinli, FAN Sufang, et al. Seismic technique and application of volcanic rock facies [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30 (2): 264 ~ 266. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张晓, 姜鹏飞. 影响断层附近应力场变化的敏感因素数值模拟研究 [J]. 建井技术, 2012, 33 (4): 26 ~ 29.
- ZHANG Xiao, JIANG Pengfei. Numerical simulation of the sensitive factors affecting the stress field near the fault [J]. Mine Construction Technology, 2012, 33 (4): 26 ~ 29. (in Chinese)
- [35] 沈海超, 程远方, 王京印, 等. 断层扰动下地应力场三维有限元约束优化反演 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (S1): 359 ~ 365.
- SHEN Haichao, CHEN Yuanfang, WANG Jingyin, et al. 3-D FEM inversion for the in-situ stress field around complex faults based on the theory of constrained optimization [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (S1): 359 ~ 365. (in Chinese with English abstract)
- [36] 丁文龙, 曾维特, 王濡岳, 等. 页岩储层构造应力场模拟与裂缝分布预测方法及应用 [J]. 地学前缘, 2016, 23 (2): 63 ~ 74.
- DING Wenlong, ZENG Weite, WANG Ruyue, et al. Method and application of tectonic stress field simulation and fracture distribution prediction in shale reservoir [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23 (2): 63 ~ 74. (in Chinese with English abstract)
- [37] 沈海超, 程远方, 王京印, 等. 断层对地应力场影响的有限元研究 [J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26 (2): 34 ~ 37.
- SHEN Haichao, CHEN Yuanfang, WANG Jingyin, et al. Study of finite element on effects of faults on ground stress field [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26 (2): 34 ~ 37. (in Chinese with English abstract)
- [38] 沈海超, 程远方, 赵益忠, 等. 基于实测数据及数值模拟断层对地应力的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (S2): 3985 ~ 3990.
- SHEN Haichao, CHEN Yuanfang, ZHAO Yizhong, et al. Study on influence of faults on geostress by measurement data and numerical simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (S2): 3985 ~ 3990.

- (in Chinese with English abstract)
- [39] 王群崑, 张学婧, 王运涛, 等. 树25区块有限元三维地应力场分布规律 [J]. 大庆石油地质与开发, 2010, 29 (6): 134 ~ 139.  
WANG Qunyi, ZHANG Xuejing, WANG Yuntao, et al. The distribution laws of 3-D earth stress field of block shu-25 by Finite Element Method [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2010, 29 (6): 134 ~ 139. (in Chinese with English abstract)
- [40] 刘中春, 吕心瑞, 李玉坤, 等. 断层对地应力场方向的影响机理 [J]. 石油与天然气地质, 2016, 37 (3): 387 ~ 393.  
LIU Zhongchun, LV Xinrui, LI Yukun, et al. Mechanism of faults acting on in-situ stress field direction [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37 (3): 387 ~ 393. (in Chinese with English abstract)
- [41] Liu J S, Ding W L, Yang H M, et al. 3D geomechanical modeling and numerical simulation of in-situ stress fields in shale reservoirs: a case study of the lower Cambrian Niutitang formation in the Cen'gong block, South China [J]. Tectonophysics, 2017, 712 ~ 713: 663 ~ 683.
- [42] 汪佳. 徐家围子低渗储层气井试采动态特征分析 [J]. 中国西部科技, 2011, 10 (3): 28 ~ 30.  
WANG Jia. Analysis on the dynamic features of gas well with low permeability reservoirs in Xujiaweizi [J]. Science and Technology of West China, 2011, 10 (3): 28 ~ 30. (in Chinese with English abstract)
- [43] 舒萍, 丁日新, 曲延明, 等. 徐深气田火山岩储层岩性岩相模式 [J]. 天然气工业, 2007, 27 (8): 23 ~ 27.  
SHU Ping, DING Rixin, QU Yanming, et al. Lithologic and lithofacies patterns of volcanic reservoirs in Xushen gas field [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27 (8): 23 ~ 27. (in Chinese with English abstract)
- [44] 曹宝军, 李相方, 姚约东. 火山岩气藏开发难点与对策 [J]. 天然气工业, 2007, 8 (8): 82 ~ 84.  
CAO Baojun, LI Xiangfang, YAO Yuedong. Challenges and strategies in volcanic gas reservoir development [J]. Natural Gas Industry, 2007, 8 (8): 82 ~ 84. (in Chinese with English abstract)
- [45] 刘曰武, 张奇斌, 孙波. 试井分析理论和应用的发展 [J]. 测井技术, 2004, 28 (5): 69 ~ 74, 89.  
LIU Yuewu, ZHANG Qibin, SUN Bo. Developments of well test theory and its applications [J]. Well Logging Technology, 2004, 7 (9): 69 ~ 74, 89. (in Chinese with English abstract)
- [46] 戴亚权, 罗静兰, 林潼, 等. 松辽盆地北部升平气田营城组火山岩储层特征与成岩演化 [J]. 中国地质, 2007, 34 (3): 528 ~ 535.  
DAI Yaquan, LUO Jinlan, LIN Tong, et al. Reservoir characteristics and petrogenesis of volcanic rocks in the Yingcheng Formation of the Shengping Gas Field, northern Songliao Basin [J]. Geology in China, 2007, 34 (3): 528 ~ 535. (in Chinese with English abstract)
- [47] 邓攀, 陈孟晋, 高哲荣, 等. 火山岩储层构造裂缝的测井识别及解释 [J]. 石油学报, 2002, 23 (6): 32 ~ 36.  
DENG Pan, CHEN Mengjin, GAO Zherong, et al. Log response and explanation of structural fractures in volcanic rock reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23 (6): 32 ~ 36. (in Chinese with English abstract)
- [48] 冯志强. 松辽盆地庆深大型气田的勘探前景 [J]. 天然气工业, 2006, 26 (6): 1 ~ 5.  
FENG Zhiqiang. Exploration potential of large Qingshen gas field in the Songliao Basin [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26 (6): 1 ~ 5. (in Chinese with English abstract)
- [49] 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.  
WANG Hongcai, WANG Wei, WANG Lianjie, et al. Three dimensional tectonic stress field and migration of oil and gas in Tanhai [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23 (2): 175 ~ 178. (in Chinese with English abstract)