

鄂尔多斯盆地高闭合应力致密砂岩储层现今地应力场分布特征及扰动规律

邓乃尔¹, 周文², 蒋柯¹, 李晓明³, 唐潮^{2*}, 宋威国⁴

1. 成都理工大学 能源学院(页岩气现代产业学院), 成都 610059;

2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

3. 中国石化华北油气分公司石油工程技术研究院, 郑州 450006;

4. 中油奥博(成都)科技有限公司, 成都 610097

[摘要] 高闭合应力致密砂岩储层因其复杂的岩性结构和断层影响, 面临地应力分布规律不明和压后效果差等问题, 严重制约了该类地层油气生产的突破。为明确致密砂岩储层现今地应力场扰动特征, 解决高闭合应力储层压后产量低等问题。以鄂尔多斯盆地富县牛武区块盒一段为例, 综合运用“岩心测试-测井计算-有限元模拟”技术, 构建了三维精细非均质构造模型, 明确其现今地应力场分布特征及扰动因素, 结合单井产能分析, 提出了井位部署优势区。结果表明: 牛武区块水平最大主应力方向为 NEE55°~60°, 地应力值呈现东高西低的分布趋势, 属于 Ia 类地应力状态($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$)。岩性主导了致密砂岩储层整体应力场分布, 是造成非断裂发育区内地应力分布不均匀的主要原因; 局部区域则受断层形态、组合样式及走向影响。建议研究区井位优先部署在距 NE-EW 断层 0.25~0.80 km 范围内, 区域内水平轨迹位移范围为 SE125°~150°。研究成果可为后续高闭合应力致密砂岩储层开发单元优化提供有效支撑, 实现单井平均经济可采储量稳步上升。

[关键词] 富县地区; 高闭合应力; 致密砂岩储层; 现今地应力场; 应力扰动

[分类号] P618.13

[文献标志码] A

In-situ stress field characteristics and disturbance patterns in the high-closure stress tight sandstone reservoirs in Ordos Basin

DENG Naier¹, ZHOU Wen², JIANG Ke¹, LI Xiaoming³, TANG Chao^{2*}, SONG Weiguo⁴

1. College of Energy(College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. Petroleum Engineering Technology Research Institute, North China Oil and Gas Company, Sinopec,

收稿日期: 2024-08-14; 改回日期: 2024-08-29。 责任编辑: 黄维婷。

基金项目: 中央引导地方科技发展专项(2023ZYD0022); 四川省自然科学基金(2024NSFSC0959)。

第一作者: 邓乃尔(2000—), 男, 博士研究生, 研究方向: 油气藏开发地质, E-mail: 2516101958@qq.com。

*通信作者: 唐潮(1988—), 男, 教授, 研究方向: 油气储层评价, E-mail: tangchao@cdut.edu.cn。

引用格式: 邓乃尔, 周文, 蒋柯, 等, 2026. 鄂尔多斯盆地高闭合应力致密砂岩储层现今地应力场分布特征及扰动规律[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 53(2): 367—383.

Deng N E, Zhou W, Jiang K, et al., 2026. In-situ stress field characteristics and disturbance patterns in the high-closure stress tight sandstone reservoirs in Ordos Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53(2): 367—383.

Zhengzhou 450006, China;

4. Optical Science and Technology (Chengdu) Ltd., Chengdu 610097, China

Abstract: Tight sandstone reservoirs with high-closure stress are significantly impacted by complex lithological structures and faults, and the challenges associated with unclear stress distribution patterns and poor post-fracturing performance severely hinder breakthroughs in oil and gas production from these formations. To clarify the in situ stress field disturbance characteristics in tight sandstone reservoirs and address the issue of low oil and gas production after fracturing in high-closure stress reservoirs, this study focuses on the He 1 member of the Niuwu block in the Fuxian area. By applying technologies such as core testing, logging calculation, finite element simulations, and fracturing simulations, a three-dimensional detailed heterogeneous structural model was constructed to determine the distribution characteristics and influencing factors of the current stress field. Based on the results from a single-well productivity analysis, this study also proposes favorable well locations for deployment. The results show that the maximum horizontal principal stress in the Niuwu block is primarily oriented NE–NNE, with stress values displaying a trend of higher stress in the east and lower in the west. The stress state belongs to type Ia ($\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h > 0$). Lithology predominantly controls the overall stress field distribution in the tight sandstone reservoir and is the main cause of the uneven stress distribution in non-faulted areas. In contrast, the fault morphology, combination patterns, and orientations significantly affect the stress distribution and direction in local areas. It is recommended that well locations be prioritized within the range of 0.25~0.80 km from the north–east to east–west faults, with horizontal trajectory deviations ranging between 125°~150° SE. These research results provide effective support for the subsequent optimization of development units in these high-closure stress dense sandstone reservoirs, with the aim of steadily increasing the economic output of single wells therein.

Key words: Fuxian area; high-closure stress; tight sandstone reservoir; present-day in situ stress field; stress disturbance

随着勘探开发技术与理论研究的不断深化,鄂尔多斯盆地的非常规气藏逐渐受到广泛关注(邹才能等, 2018)。苏格里、大牛地、杭锦旗及富县等区块的发现,揭示了该盆地蕴含丰富的致密气资源(付金华等, 2001; 杨华等, 2012a; 戴金星, 2019)。其中,富县地区位于鄂尔多斯盆地南部生烃中心,沉积环境稳定,气源条件优越,上古生界石盒子组为主要产气层(李浩等, 2011; 王杰等, 2022)。然而,早期压裂过程中,富县地区砂堵超压井次占比高达 35%,压后效果整体较差。其主要原因是储层闭合应力均值达到 48 MPa,闭合应力梯度大于 0.018 MPa/m,属于高闭合应力储层(Liu et al., 2024)。在水力压裂过程中,较高的闭合应力导致裂缝在相同压裂压力下的宽度较窄,限制了流体流动通道,进而降低了压裂后的储层导流能力。此外,储层岩性和断裂扰动等因素导致的强非均质性也会对压裂段的产能产生不利影响(杨华等, 2012b)。在水平钻井时井身轨迹通常与水平最小主应力方向保持一致,理论上裂缝面的闭合应力等同于水平最小主应力。因此,建立研究区地质力学参数计算模型,精准评

价现今地应力场分布特征,分析地应力扰动影响因素,对进一步推进富县高闭合应力致密砂岩储层的勘探开发具有重要意义。

针对致密砂岩储层的地应力场研究,主要使用实验测试、测井解释、地震反演和有限元模拟等方法。实验测试主要包括差应变实验(Sinha and Plona, 2001)、古地磁实验(谢基海等, 2020)、波速各向异性实验(李阿伟等, 2014)、声发射实验(李智武等, 2005)以及非(滞)弹性应变恢复实验(Sun et al., 2017)等。其中,差应变实验理论严谨,较其他方法能更准确地反映岩心的地应力状态(程远方等, 2008; 白金朋等, 2013)。然而,室内测试易受实验条件和样品形态的影响,需结合水力压裂法(Ito et al., 1999)进行验证。测井解释通常利用成像测井(Lai et al., 2018)和正交偶极阵列测井(Kayama et al., 2021)来判断单井的地应力方向,但受储层裂缝和非均质性限制,需结合微地震法(陈筱青等, 2019)进行校正。由于实验成本高且数据不连续,储层地应力的计算常依赖测井资料。垂向主应力通过体积密度测井曲线积分求取,而水平主应力则可利用黄氏模型(黄荣

樽, 1984)、弹簧组合模型(Thiercelin and Plumb, 1994)、葛式模型(葛洪魁等, 1998)、多孔弹性水平应变模型(马建海和孙建孟, 2002)、各向异性变形应力模型(简称 ADS 模型; 周文等, 2007)等进行计算。基于测井数据绘制的地应力剖面仅能呈现地应力的纵向变化, 横向分布则需借助地震资料预测和有限元模拟分析。地震预测通常采用弹性阻抗反演(Gray et al., 2012)和裂缝参数反演(杜炳毅等, 2024)等技术。有限元法则是通过地质资料构建三维地质模型, 结合室内岩石力学测试数据设定本构方程和岩石介质的力学参数, 依据已知点的实测应力值设定数值模拟的边界条件和载荷值, 最后通过计算反演获得现今地应力分布结果(Ferronato et al., 2008; 徐正等, 2014)。

前期研究已在富县上古生界砂岩储层的识别方法(刘艳等, 2005)、勘探潜力(李浩等, 2011)、成藏特征(王文川等, 2018)、成岩作用(陈灼华等, 2017)、岩石学特征(康东雅等, 2019)、有利区评价(翁凯等, 2012)、储层射孔工艺(李朋涛, 2022)等方面取得了重要进展。然而, 关于地应力的研究主要集中在三压力剖面的计算(马龙等, 2015)和岩石力学参数的分析(姚昌宇等, 2012; 朱新春, 2018), 尚未建立研究区主产层岩石力学参数模型, 明确现今地应力场分布特征及扰动因素。本文通过室内实验测试, 首先建立鄂尔多斯盆地富县牛武区块盒一段的岩石力学参数与地应力测井解释模型, 明确单井地应力特征, 并基于三维有限元应力场模拟, 完成现今地应力场分布及扰动影响因素分析。最终结合单井产能数据, 明确研究区井位部署优势区, 以期对鄂尔多斯盆地致密砂岩储层优化井位部署和调整井网密度提供有力支撑。

1 地质概况

富县地区位于鄂尔多斯盆地东南部, 按构造划分属于二级单元陕北斜坡(图 1-A)。牛武区块构造平缓, 但多发育高角度、近直立正断层, 断层期次以加里东期—海西早期、海西中—晚期及燕山期—喜马拉雅期为主, 断层延伸范围为 3.0~11.8 km(图 1-B、C)。

牛武区块上古生界主要为三角洲前缘分流河道沉积, 沉积微相包含分流间湾与分流河道,

为重要的油气储集体(图 1-B)。盒一段储层岩性以浅灰色细砂岩和粉砂岩为主, 砂岩成分为石英砂岩、岩屑砂岩, 有效厚度为 10~35 m(李浩等, 2011)。储层主要为低孔(平均孔隙度为 4.78%)、低渗(平均渗透率为 $0.21 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的致密砂岩储层, 但良好的沉积、成岩储集相带以及充足的烃源, 使得牛武区块盒一段成为勘探开发目标层位。

2 单井地应力解释

2.1 单井岩石力学参数计算

通过岩石物理参数自动测试系统(型号: MTS815-286.20-286.31)开展三轴压缩实验, 获取 12 个样品的静态杨氏模量、静态泊松比和抗压强度(图 2)。实验结果显示, 研究区砂岩和泥岩的静态杨氏模量为 35.0~40.5 GPa(平均 38 GPa)和 29.5~34.4 GPa(平均 31.8 GPa), 静态泊松比为 0.18~0.22(平均 0.21)和 0.23~0.25(平均 0.24), 抗压强度为 171.70~266.20 MPa(平均 194.45 MPa)和 86.01~109.40 MPa(平均 95.35 MPa)。整体结果表明, 砂岩具有较高的脆性(附表 1)。

基于测井计算公式, 完成动态岩石力学参数的计算, 并结合实测的静态杨氏模量与静态泊松比数据, 建立了研究区砂岩与泥岩的动态与静态岩石力学参数转换关系式, 转换关系的拟合度(R^2)为 0.649 4~0.765 3(图 3), 说明拟合效果较为可靠。

岩石力学参数测井计算公式如下:

$$E_d = \frac{\rho_b}{DTC^2} \frac{3DTS^2 - 4DTC^2}{DTS^2 - DTC^2} \quad (1)$$

$$\nu_d = \frac{DTS^2 - 2DTC^2}{2(DTS^2 - DTC^2)} \quad (2)$$

$$CS = 0.7295E_d [8\varphi_{sh} + 4.5(1 - \varphi_{sh})] + 46.088 \quad (3)$$

$$S_t = [4.5E_d(1 - \varphi_{sh}) + 8E_d\varphi_{sh}] K \times 1.47/1000 \quad (4)$$

$$K = \rho_b \frac{3DTS^2 - 4DTC^2}{3DTS^2 DTC^2} \quad (5)$$

$$Biot = 1 - \frac{\rho_b(3\nu_p^2 - 4\nu_s^2)}{\rho_m(3\nu_{mp}^2 - 4\nu_{ms}^2)} \quad (6)$$

式中: E_d 为动态杨氏模量, GPa; ν_d 为动态泊松比, 无量纲; ρ_b 为岩石密度, g/cm^3 ; ρ_m 为致密砂岩岩石骨架密度, 本文取值为 2.58, g/cm^3 ; DTS 为横波时差, $\mu\text{s/ft}$; DTC 为纵波时差, $\mu\text{s/ft}$; φ_{sh} 为泥质体积分数, 其值为小数; CS 为抗压强度, MPa; S_t 为抗

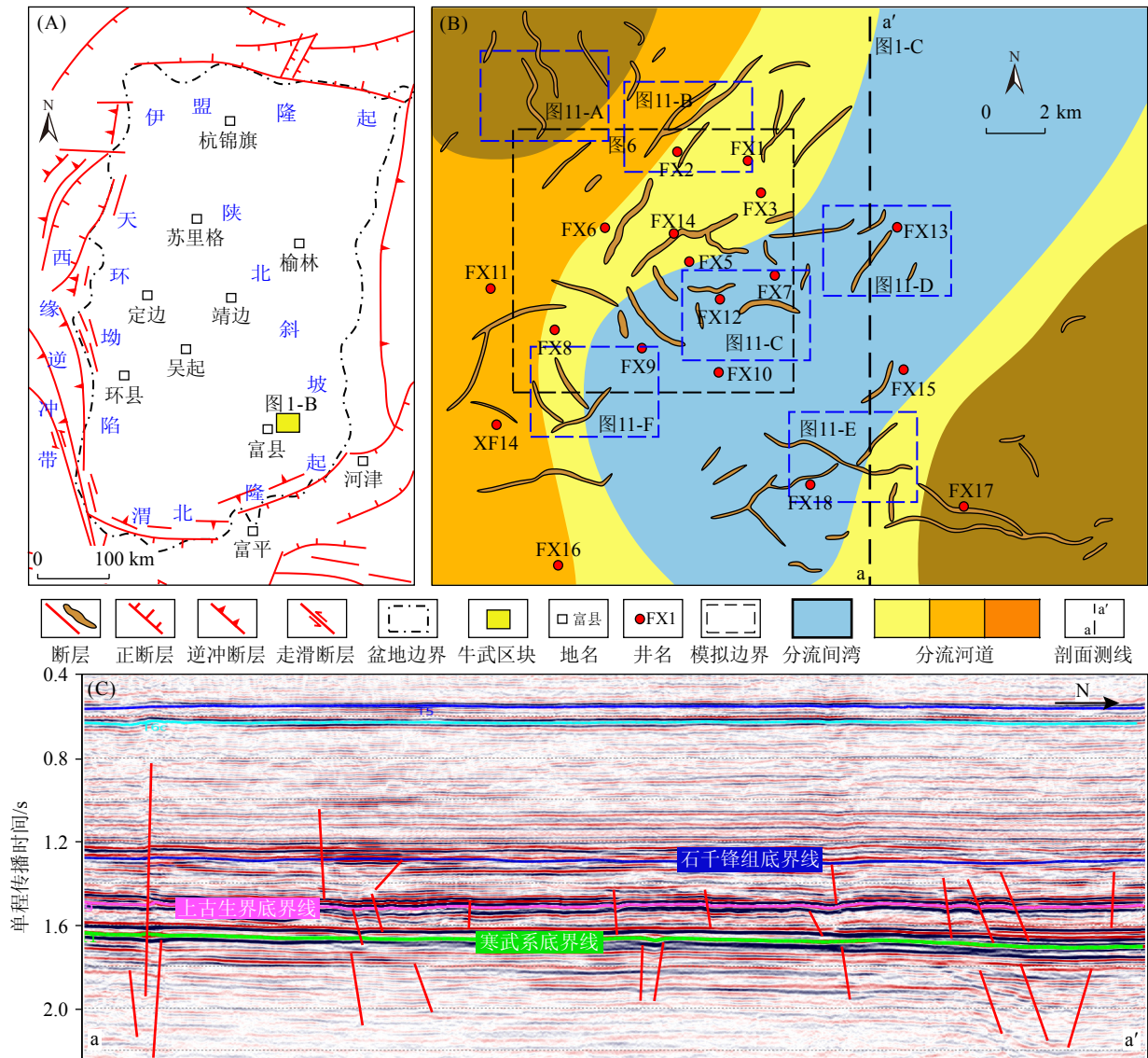


图 1 鄂尔多斯盆地与富县牛武区块现今构造断裂分布图

Fig. 1 Distribution of present-day tectonic ruptures in Ordos Basin and the Fuxian block

(A) 鄂尔多斯盆地构造分布图(据鞠玮等, 2020 修改); (B) 牛武区块断裂分布图; (C) a-a'地震剖面断层纵向分布图

张强度, MPa; K 为体积模量, GPa; $Biot$ 为有效应力系数, 常称 Biot 系数, 无量纲; v_p 为测井纵波速度, m/s; v_s 为测井横波速度, m/s; v_{mp} 为致密砂岩骨架纵波速度, 本文取值为 5 523, m/s; v_{ms} 为致密砂岩骨架横波速度, 本文取值为 2 835, m/s。

盒一段动态、静态杨氏模量和泊松比转换公式如下:

$$\text{砂岩: } E_j = 0.2961E_d + 25.5840 \quad (R^2 = 0.6704) \quad (7)$$

$$\text{砂岩: } \nu_j = 0.1841\nu_d + 0.1643 \quad (R^2 = 0.6494) \quad (8)$$

$$\text{泥岩: } E_j = 0.314E_d + 20.135 \quad (R^2 = 0.7645) \quad (9)$$

$$\text{泥岩: } \nu_j = 0.2689\nu_d + 0.1777 \quad (R^2 = 0.7653) \quad (10)$$

式中: E_j 为静态杨氏模量, GPa; ν_j 为静态泊松比, 无量纲。

2.2 明确单井地应力特征

在差应变实验中, 测试了 13 组边长为 50~60 mm 的立方体样品地应力。当样品加载到原始应力状态时, 由于地表应力卸载, 次生裂隙完全闭合, 应变恢复至原始地下状态。通过测量应变变化, 可以反推出地下岩体的地应力大小(谢润成等, 2010)。实验采用 12 个直线位移传感器测量并计算样品在 3 个相交面的 9 个方向的应变值, 得到正应变和剪应变的三维分布。然后, 通过矩阵计算确定岩体在 X、Y、Z 3 个方向的主应

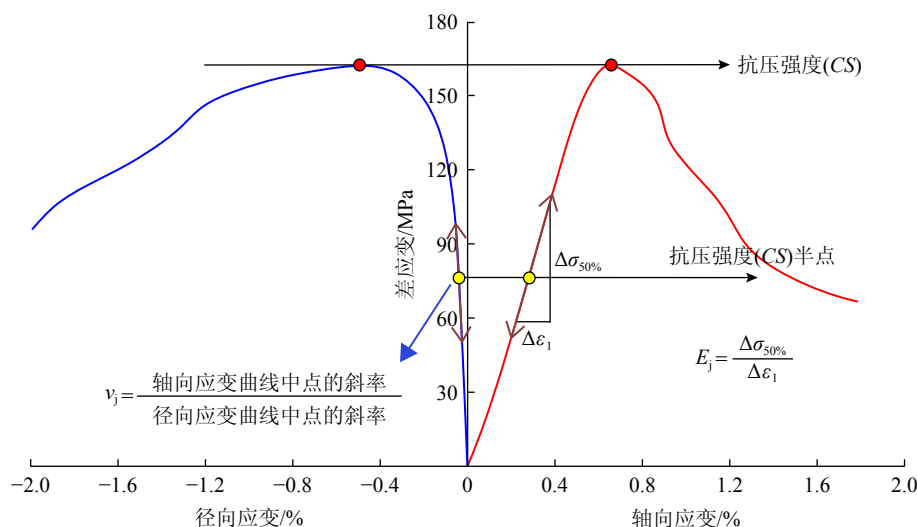


图 2 三轴压缩实验应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves showing the triaxial compression test results

($\Delta\sigma_{50\%}$ 、 $\Delta\varepsilon_1$ 分别为轴向应变-差应变曲线中差应变为抗压强度 50% 时所对应的值和轴向应变值)

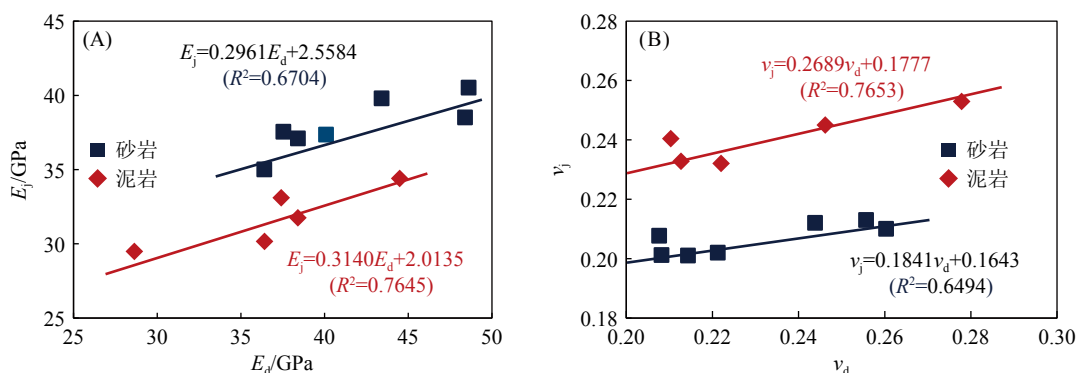


图 3 动态与静态岩石力学参数拟合分布图

Fig. 3 Fitted distributions of dynamic and static rock mechanical parameters

(A) 动静态杨氏模量拟合分布图; (B) 动静态泊松比拟合分布图

力分量比值(何小东等, 2020; 图 4-A)。结合密度测井数据获得垂向主应力值, 再依据主应力比值计算出水平方向的最大和最小主应力, 最终完成三向主应力测试。

实验结果显示, 研究区水平最大主应力(σ_H)为 50.26~62.12 MPa, 水平最小主应力(σ_h)为 48.65~57.39 MPa, 垂向主应力(σ_v)则为 68.03~75.60 MPa, 三向主应力值次序为 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$, 属于 Ia 类地应力状态(附表 2)。这些结果表明牛武区块处于挤压应力状态, 水平应力差为 4.73~10.89 MPa, 显示挤压作用强度较强。

水力压裂施工数据是目前确定地应力的最直接和精确的方法之一(图 4-B), 其计算方法见公式 11。验证分析显示, 差应变实验的结果误

差率范围为 0.92%~7.24%, 结合深度对地应力的影响, 证明本研究的实验测试结果具有适用性(表 1)。

$$\begin{aligned} \sigma_h &= P_{so} + \rho gh - P_b - P_m \\ \sigma_H &= 3\sigma_h - P_r - P_b \\ P_r &= P_f - S_t \end{aligned} \quad (11)$$

式中: P_{so} 为停泵压力, MPa; ρ 为压裂液密度, g/cm^3 ; h 为压裂段垂深, m; g 为重力加速度, 取值为 $9.81 m/s^2$; P_b 为地层压力, MPa; P_m 为沿程摩阻, MPa; P_r 为裂缝重张压力, MPa; P_f 为破裂压力, MPa。

选用 ADS 模型用于水平两向应力的测井计算, 该模型能精准计算出水平两向应力值, 特别适用于力学参数有限的单井地应力计算(周文等, 2007), 其计算方法见公式 12。

$$\sigma_H = \mu_g \frac{\nu_j}{1-\nu_j} \sigma_v + \mu_g \frac{1-(1+\mu_g)\nu_j}{1-\nu_j} Biot P_b \quad (12)$$

$$\sigma_h = \frac{\nu_j}{1-\nu_j} \sigma_v + \frac{1-2\nu_j}{1-\nu_j} \alpha P_b$$

式中： μ_g 为地层水平骨架应力的非平衡因子，无量纲； α 为孔隙弹性系数，无量纲，为0~1。

其中， σ_v 通过密度测井计算获得， $Biot$ 可通过岩石骨架纵横波时差计算得出。 μ_g 根据实测应力值反算，研究区取值为2.75。本文采用Eaton法(Eaton, 1972)进行地层压力预测，剔除非泥岩段的测井数据后，根据浅层泥岩声波时差数据，建立深度与泥岩声波时差间正常压实关系式，并

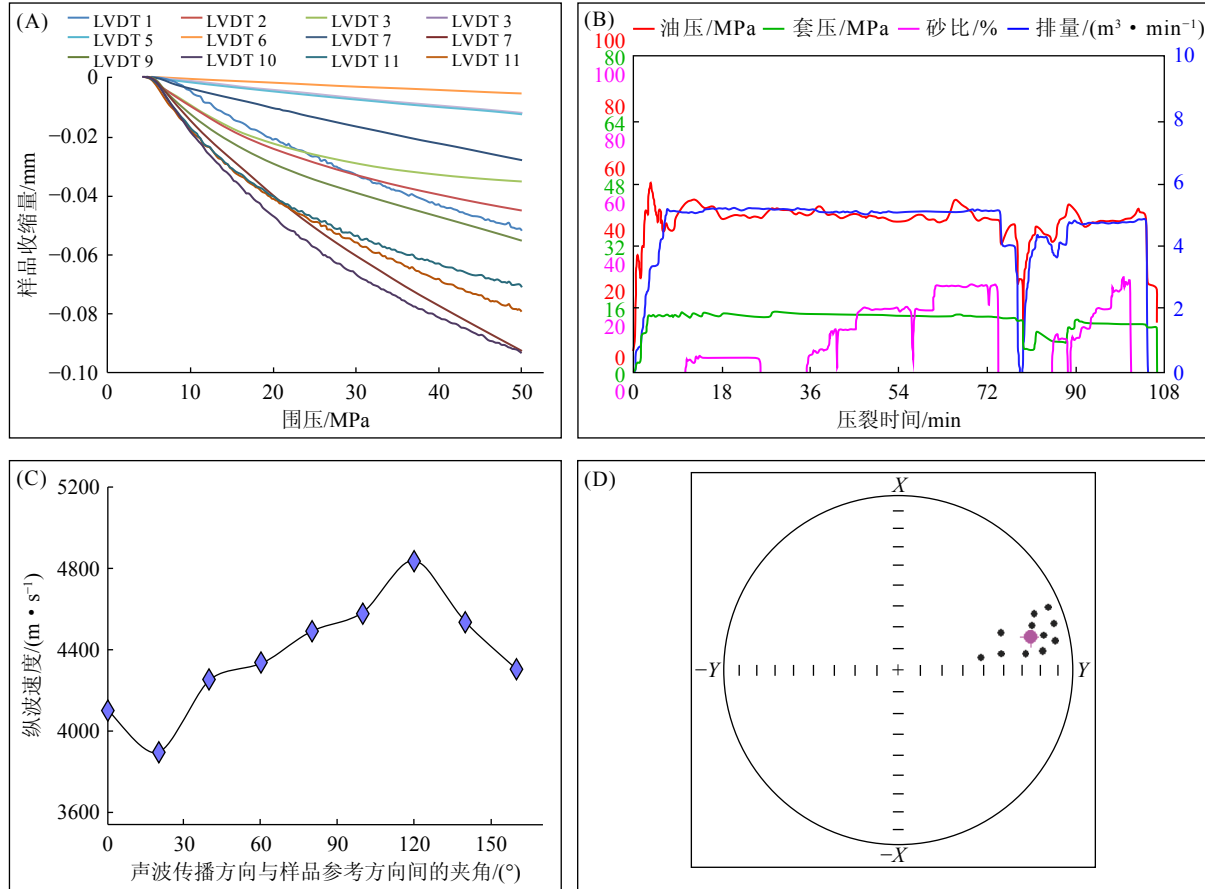


图 4 地应力实验与水力压裂测试结果分布图

Fig. 4 Distribution of geostress and hydraulic fracturing test results

(A)差应变实验测试曲线；(B)水力压裂施工曲线；(C)波速各向异性实验测试曲线；(D)古地磁实验赤平投影散点分布
注：图A为12条围压-样品压缩变形收缩量曲线；图D中黑色散点代表样品(或样品分布退磁过程中)的测量数据点在赤平投影图上的投影，紫色点代表一组样品(或一个样品经过退磁处理后稳定的剩磁方向)的平均方向的投影。

表 1 差应变实验与水力压裂计算应力值对比

Table 1 Comparison of stress values from differential strain tests and hydraulic fracturing calculations

井位	样品编号	岩性	邻近压裂段施工参数			σ_h (差应变测试结果)/MPa	σ_h (水力压裂参数计算)/MPa	误差率/%
			P_f MPa	P_{so} MPa	S_f MPa			
FX4	FX-cyb-03	泥岩	61.15	31	5.00	45.08	45.50	0.92
FX5	FX-cyb-04	砂岩	62.45	36	6.59	48.92	46.76	4.57
FX10	FX-cyb-08	泥质砂岩	62.90	28	7.91	50.38	46.98	7.24
FX14	FX-cyb-11	砂岩	59.00	36	7.05	43.34	41.45	4.56
FX15	FX-cyb-12	砂岩	58.76	37	4.53	44.31	42.13	5.18

代入 Eaton 法计算公式中。通过压降测试获取的实测地层压力值, 反算出调节系数 C 值, 最终确定研究区的地层压力计算公式(公式 13)。基于上述方法, 对牛武区块多口单井开展岩石力学参数与地应力测井解释(图 5), 明确了全井段的岩石力学参数和地应力纵向变化趋势。

$$P_b = \sigma_v - (\sigma_v - 0.8562 \times h \times 0.00981) \times [e^{(7540-h)/880} / AC]^{0.3625} \quad (13)$$

式中: h 为地层垂深, m; AC 为声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。

通过“波速各向异性+古地磁”实验, 获取了样品的水平最大主应力方向(图 4-C、D)。实验结果(附表 3)显示, 牛武区块盒一段的水平最大主应力方向为 NEE60°~65°。研究区北部的地应力方向呈现出逆时针偏转的趋势, 而南部则通常顺时针偏转至 NEE70°。

3 现今地应力场特征

3.1 应力场建模

本文根据储层地质条件和地震数据覆盖范围, 选取牛武区块中部作为应力场建模区域(图 1-B)。首先, 利用 Petrel 软件构建了牛武区块盒一段的地质模型, 选取 12 条主要断裂以建立构造模型(图 6-A)。基于单井岩性解释结果, 将

盒一段岩相划分为砂岩和泥岩 2 类。随后, 通过连井剖面岩相解释, 采用克里金插值法对离散的岩相数据进行空间插值, 生成三维岩相分布模型, 并结合沉积相分布图对模型进行修正(图 6-B)。最后, 利用岩相模型对岩石力学参数属性体进行约束, 并借助 Visage 模块预测现今地应力场的分布。

在应力场模拟过程中, 基于断裂内部结构、含裂缝岩石力学属性与 Visage 模块的断裂属性, 赋予研究区不同期次断裂的力学参数(表 2)。为减小边界效应, 设置了人工井及外边界条件, 人工井的岩石力学参数参考研究区与邻区的力学测试结果。外延层材料的岩石力学参数赋值为: 杨氏模量 38.78 GPa, 泊松比 0.27, 密度 2.37 g/cm^3 , Biot 系数 0.74; 外边界应力加载方向依据富县区域水平最大主应力方向, 赋值为 NEE60°。

基于实验测试结果, 对现今地应力场预测的准确性进行了验证。通过差应变实验测试数据验证水平最大主应力模拟结果, 显示相对误差为 1.03%~5.88%; 通过波速各向异性和古地磁实验测试数据验证水平最大主应力方向, 显示相对误差范围为 0.74%~7.18%(表 3)。验证结果表明本研究的现今地应力场预测结果能准确反映研

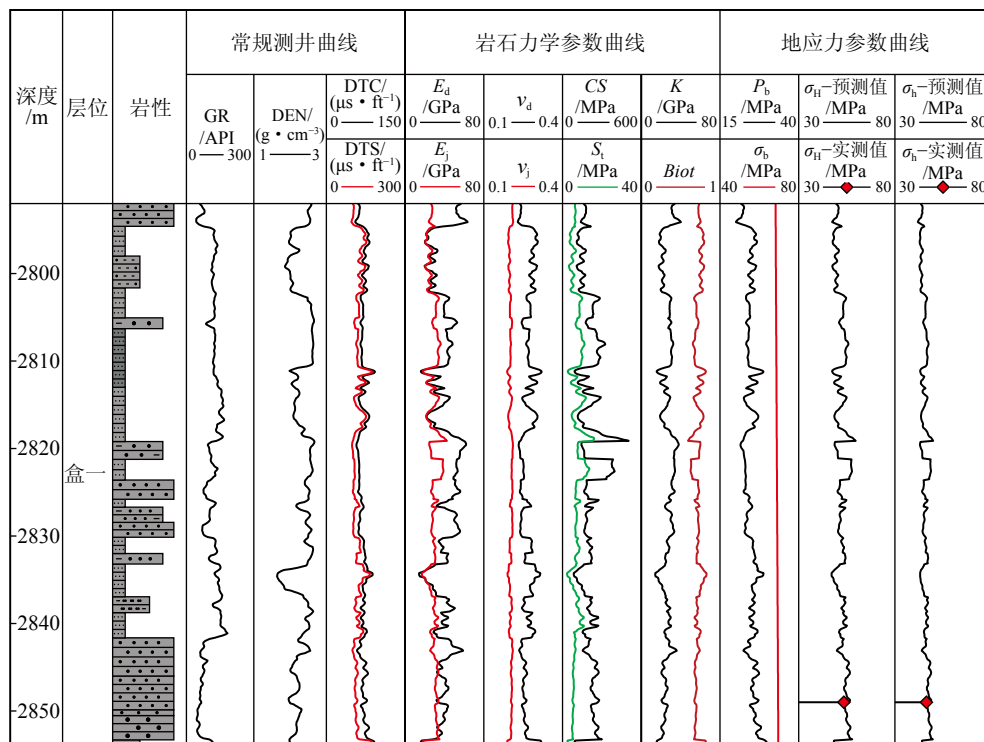


图 5 FX5 井盒一段岩石力学及地应力测井解释剖面

Fig. 5 Rock mechanics and geostress logging interpretation profile of the Well FX5 in the He 1 member

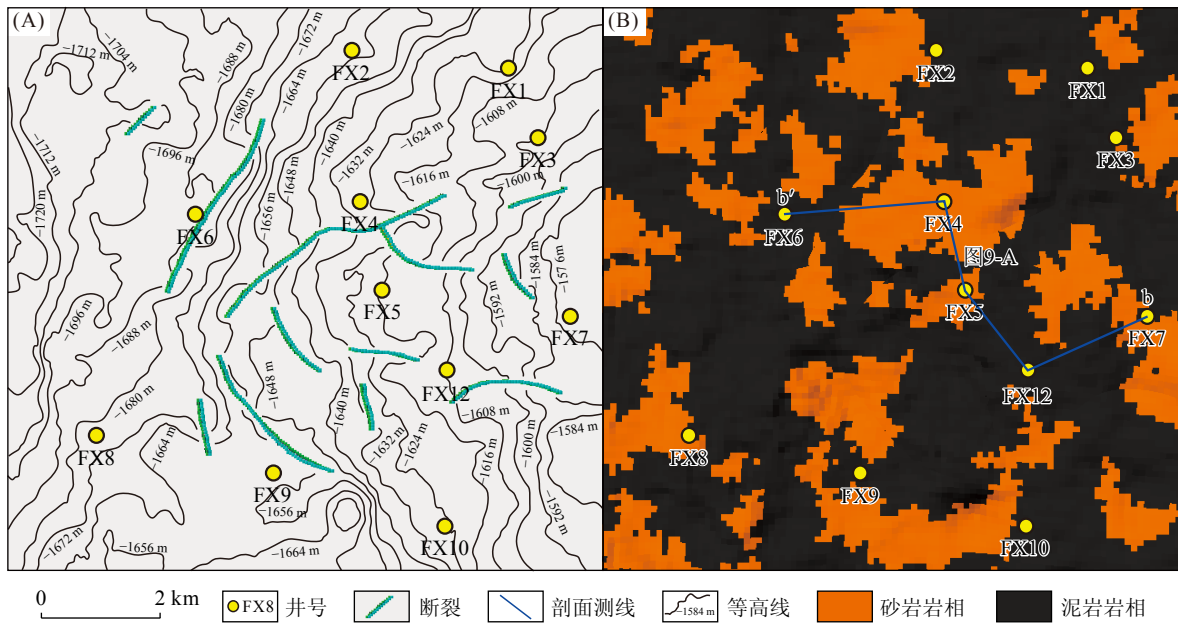


图 6 富县牛武区块断裂构造模型与盒一段岩相模型

Fig. 6 Tectonic rupture model of the Niuwu block and petrographic model of the He 1 member

(A)断裂构造模型;(B)岩相模型

(图 6-A 中等高线为建模区盒一段底深度;断裂构造模型范围见图 1-B)

表 2 研究区断裂属性赋值数据

Table 2 Fracture properties in the study area

断裂分期	断裂走向	法向刚度/ (bar · m ⁻¹)	剪切刚度/ (bar · m ⁻¹)	内聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ MPa
燕山期—喜马拉雅期	NEE、EW	3 500	1 500	0.01	65.89	3.41
加里东期—海西早期、 海西中—晚期	NE、EW、SE、SSE	4 600	1 800	0.01	70.25	2.95

表 3 三维地应力场预测结果与实验测试数据对比表

Table 3 Comparison between 3D ground stress field prediction results and experiment data

井号	水平最大主应力			水平最大主应力方向		
	差应变实验/MPa	应力场预测/MPa	误差率1/%	波速各向异性+古地磁实验/(°)	应力场预测/(°)	误差率2/%
FX5	55.46	58.55	5.15	68.00	63.12	7.18
FX6	62.12	58.50	5.83	60.00	56.25	6.25
FX9	57.40	56.81	1.03	59.56	60.00	0.74
FX10	56.78	60.12	5.88	65.00	60.74	6.55
FX12	57.97	55.36	4.50	75.00	72.36	3.51

注: 误差率1=[水平最大主应力(应力场预测)-水平最大主应力(差应变实验测试)]/水平最大主应力(差应变实验测试)×100%; 误差率2=[应力方向(应力场预测)-应力方向(实验测试)]/应力方向(实验测试)×100%。

究区的地应力特征。

3.2 应力场模拟结果

应力场模拟结果表明,研究区的水平两向主应力值及水平应力差(σ_H 、 σ_h 、 $\sigma_H-\sigma_h$)分别为40~64 MPa、44~56 MPa、1~10 MPa(图 7-A~C)。牛武区块盒一段砂岩较为发育,现今地应力沿砂岩、泥

岩呈片状分布特征。其中无断层砂岩区应力最高(54~64 MPa),无断层泥岩区次之(46~54 MPa),断层周围最小(低于46 MPa)。区域水平最大主应力方向为NEE60°~65°,非断层区的地应力方向与区域应力方向一致;而在断层影响区内,地应力方向则发生了复杂的偏转(图 7-D)。

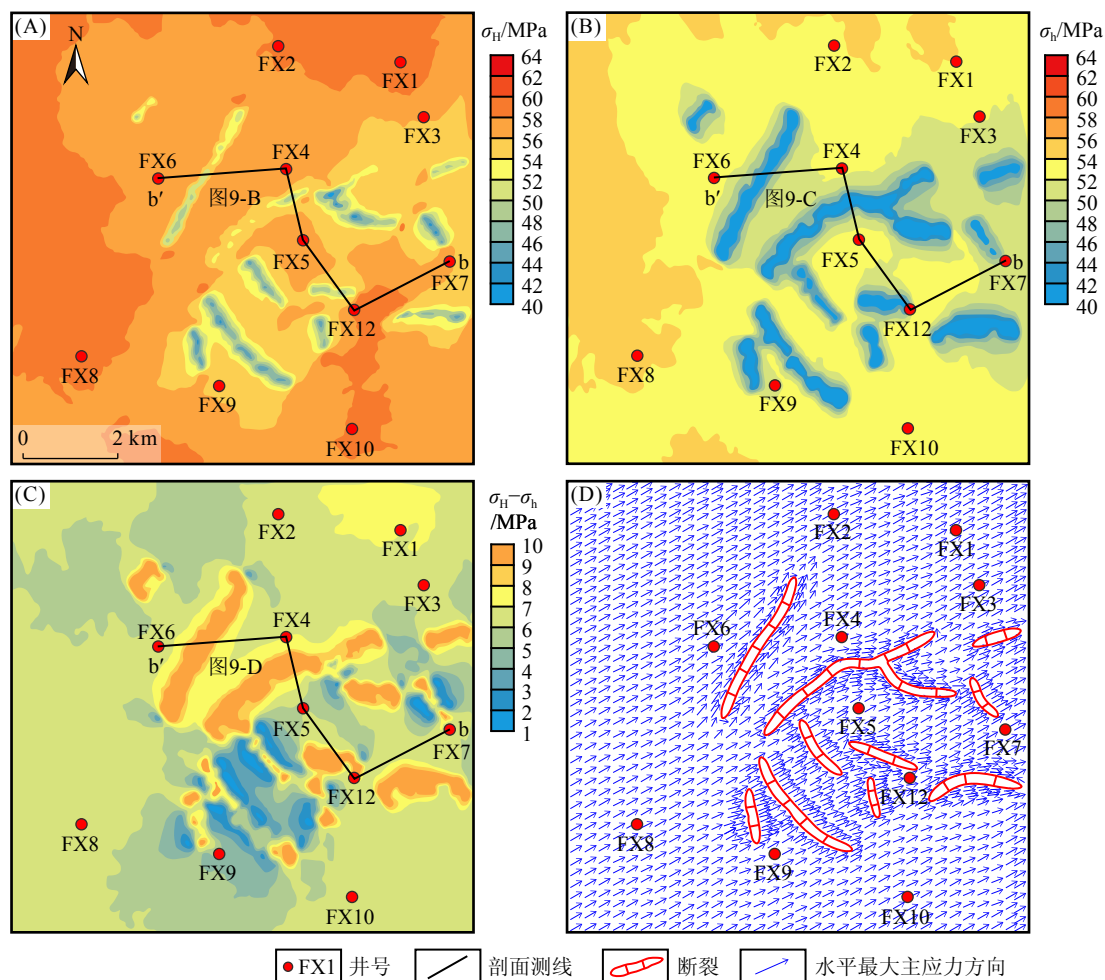


图 7 应力场模拟平面分布图

Fig. 7 Simulated stress field distribution

(A) 水平最大主应力平面分布图; (B) 水平最小主应力平面分布图; (C) 水平应力差平面分布图;
(D) 应力方向平面分布图

4 现今地应力扰动影响因素探讨

4.1 岩性

结合邻近研究区盒一段的地应力实验数据, 显示水平应力值与岩性呈现出强相关性。砂岩的应力值 (56.11 MPa) 显著高于泥岩 (52.22 MPa)。通过对比分析牛武区块下石盒子组的静态岩石力学参数对地应力的影响, 发现杨氏模量和泊松比均与水平最大主应力呈正相关性 (图 8-A)。根据盒一段与山西组静态岩石力学参数统计, 泥岩的泊松比均值为 0.24, 略大于砂岩的 0.21, 但差异较小; 然而, 砂岩的杨氏模量 (38 MPa) 显著高于泥岩 (31.8 MPa), 导致砂岩地应力较高 (图 8-B)。由此可见, 杨氏模量对地应力的影响比泊松比更为显著。研究区内岩性对地应力的影响主要来

源于不同岩相的力学性质差异。由于砂岩杨氏模量较大, 材料刚度较高, 不易变形, 故在载荷作用下应力集中; 相对而言, 虽然泥岩的泊松比稍高, 但杨氏模量对应力的影响更为关键。在构造活动相对稳定的背景下, 最终形成了砂岩地应力高、泥岩地应力低的分布现象。

岩性差异是导致地应力分布不均匀的主要原因, 常表现为平面的离散和纵向上的分层 (图 7-A~C; 徐珂, 2019)。应力场模拟结果显示, 高应力值的横向展布与砂体分布高度吻合, 且水平应力差尤为明显 (图 9)。牛武区块盒一段的沉积环境总体为三角洲前缘分流河道, 岩性结构可划分为 3 类: 砂夹泥型 (砂地比 > 60%, 单个砂体厚度 > 8 m; 图 10-A)、砂泥交互型 (砂地比为 40%~60%; 图 10-B) 以及泥夹砂型 (砂地比 < 40%;

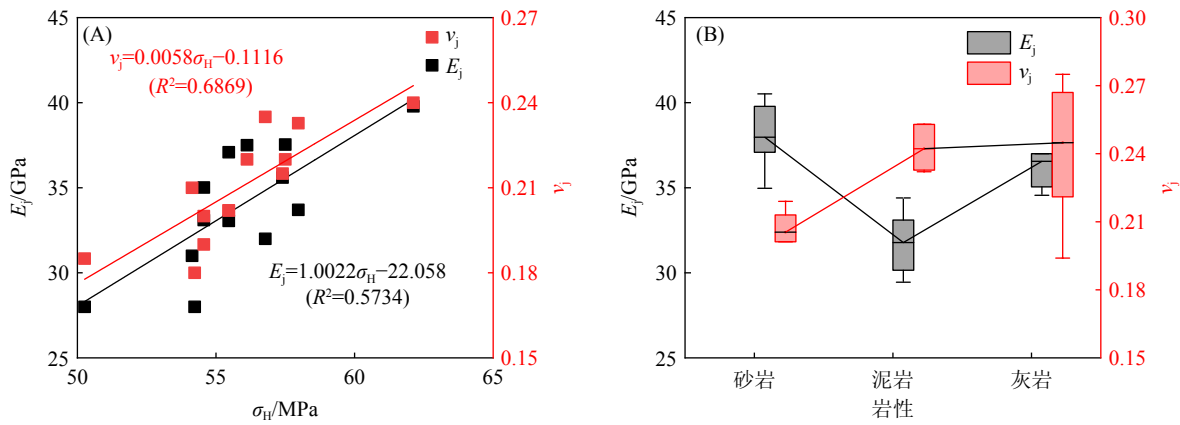


图 8 静态岩石力学参数与水平地应力关系及不同岩性静态岩石力学参数箱线图

Fig. 8 Relationship between different static rock mechanical parameters and the horizontal geostress and box plots of the static rock mechanical parameters for different lithologies

(A)静态岩石力学参数与水平地应力关系图;(B)不同岩性静态岩石力学参数箱线图

图 10-C)。在多层岩性结构体中,由于岩石力学性质的差异性,往往需要对典型结构岩体进行应力分析。

由于砂岩与泥岩的岩石力学参数存在差异,二者在受力时产生不同的变形,不均匀的变形常导致砂泥岩界面出现附加应力(徐素国等, 2009)。这种应力表现为应力突变且方向相反:砂岩一侧的突变应力为向外的拉应力,而泥岩一侧则表现为向内的压应力。附加应力计算方法见公式 14 (徐素国等, 2009),可计算出牛武区块细砂岩-泥岩界面附加应力为 3.58 MPa,中砂岩-泥岩界面附加应力为 4.85 MPa,粗砂岩-泥岩界面附加应力为 7.02 MPa。应力场模拟结果也表明,随着砂岩颗粒粒度的增大,砂岩-泥岩界面的附件应力也逐渐增大,即粗砂岩-泥岩界面的附加应力大于细砂岩-泥岩界面(图 10-D~F)。

$$\beta = \frac{E_a \nu_b - E_b \nu_a}{E_a(1 - \nu_b) + E_b(1 - \nu_a)} \sigma_v \quad (14)$$

式中: β 为附加应力,MPa; E_a 为岩体 a 杨氏模量,MPa; E_b 为岩体 b 杨氏模量,GPa; ν_a 为岩体 a 泊松比,无量纲; ν_b 为岩体 b 泊松比,无量纲; σ_v 为岩体 a、b 分界面处的垂向主应力,MPa。

地应力方向预测结果显示(图 7-D),在非断裂区内,水平最大主应力方向的偏转角度为 0~5°,仅在部分砂泥岩交界处发生应力方向的偏转。这一现象的原因在于,尽管应力场模拟过程中对主砂体进行了详细刻画,并针对不同地质体建立了力学参数模型,但未针对不同地质体选用

合适的本构方程,导致非断裂区模拟的水平最大主应力方向与区域应力方向基本一致,应力方向在砂泥岩不同区域内变化较小(李志鹏等, 2019)。

4.2 断层

牛武区块地应力场模拟结果表明,断层对区域地应力值与应力方向具有显著影响,具体表现为应力值的降低与应力方向的偏转。结合研究区地质特征,主要考虑断部位、形态及走向对地应力分布的影响。

断层活动常引发岩石破碎及应力释放,断层附近形成低应力区(Faulkner et al., 2006),导致牛武区块断层附近的应力值比非断层区降低 2~14 MPa。随着离断层距离的增大,应力逐渐恢复至区域应力水平(翁剑桥等, 2020)。当应力由断层中部向端部传导时,端部扩展受阻,导致应力集中,表现为应力值增加及应力方向的偏转(Alam et al., 2021)。牛武区块断层端部的应力值最高可达 64 MPa,应力方向偏转角可达 30°。

研究区断层形态主要包括直线型、“S 型”(图 11-A)、分叉型(图 11-B)和弧型(图 11-C),断层组合样式则可归纳为平行式(图 11-D)、斜交式(图 11-E)和羽列式(图 11-F)。通过有限元建模分析这些典型断层形态和组合形式的应力场分布特征,发现直线型断层内部应力分布较均衡,端部出现应力集中,高应力值显著(沈海超等, 2008)。“S 型”与弧型断层的弯曲处应力集中,且随着弯曲曲率和弧度的增加,应力集中程度也随之增大(邓宇等, 2018; 图 12-A、C)。分叉型

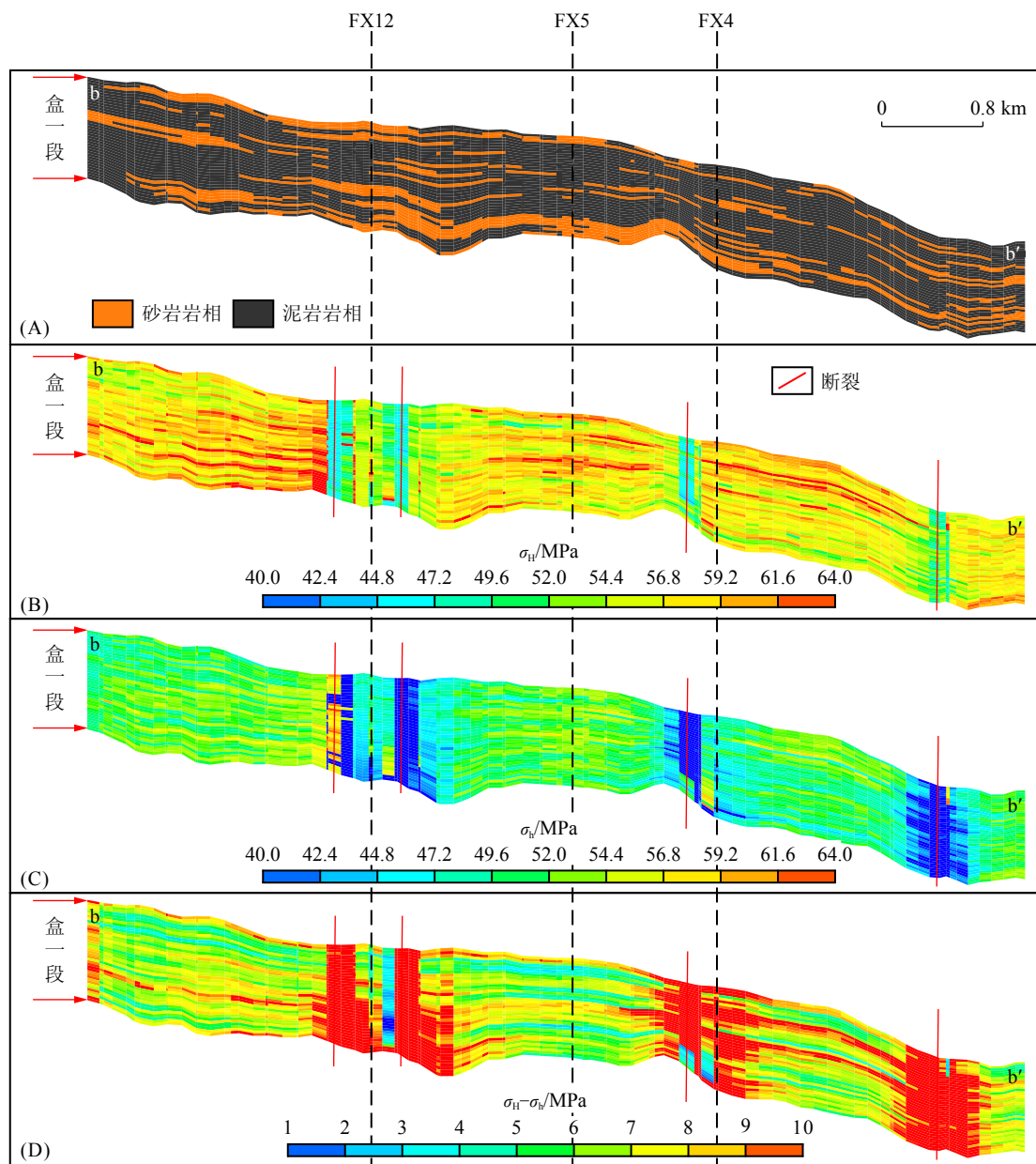


图 9 b-b'剖面岩相及现今应力场模拟纵向分布图

Fig. 9 Longitudinal distribution of lithofacies and current stress field simulations of the B-B' profile

(A) 岩相纵向分布图; (B) σ_H 纵向分布图; (C) σ_h 纵向分布图; (D) $\sigma_H - \sigma_h$ 纵向分布图

断层的分叉点通常也是应力集中区域(图 12-B)。平行式组合断层的应力分布较为规则,沿断层面向方向扩展,但当断层间距较小时,交互部位出现高应力集中(图 12-D);而斜交式和羽列式组合断层的应力分布不均匀,断层交汇处和末端是应力集中区域(图 12-E、F)。

应力场模拟结果显示,牛武区块 NE-EW 走向的断层附近应力值降低 2~12 MPa,扰动范围为 0.8 km;而 SE-SSE 走向断层内应力值降低 6~14 MPa,扰动范围为 0.51 km(图 7-A、B)。此外,

NE-EW 走向断层对地应力方向的扰动程度大于 SE-SSE 走向断层,前者附近应力方向顺着断层走向偏转,偏转角度为 $10^\circ \sim 30^\circ$;而后的应力方向垂直于断层走向,偏转角度为 $0 \sim 5^\circ$ (图 7-D)。其原因在于,加里东期—海西早期、海西中—晚期与燕山期—喜马拉雅期 3 个期次形成的 NE-EW 走向断层大多处于开启状态,而 SE-SSE 走向断层多为闭合状态(徐兴雨, 2020)。当断层处于开启状态,充填了非连续体后,断层对地应力扰动增强,与围岩的应力差值增大,地应力方向沿

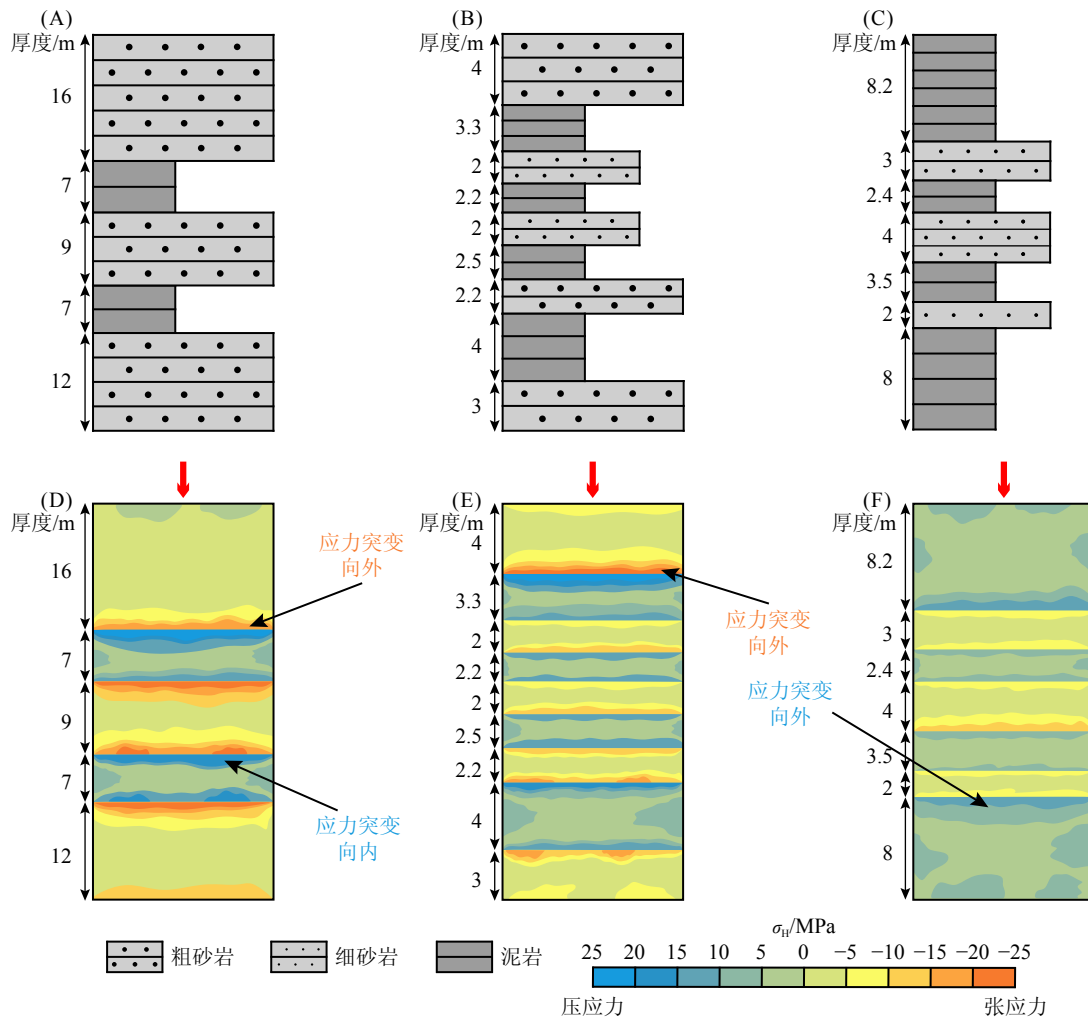


图 10 不同储层岩性结构的应力场分布对比图

Fig. 10 Comparison of the stress field distribution for different reservoir lithological structures

(A)FX5 井砂夹泥型储层结构,砂地比为 72%;(B)FX2 井砂泥互层型储层结构,砂地比为 52%;(C)FX15 井泥夹砂型储层结构,砂地比为 29%;(D)砂夹泥型储层结构应力场分布图;(E)砂泥互层型储层结构应力场分布图;

(F)泥夹砂型储层结构应力场分布图

(图中红色箭头代表模拟时应力加载方向;模拟时仅在模型上端施加应力,下端与左、右两侧均为不可动边界)

断层走向偏转;若断层处于闭合状态,或其填充物的杨氏模量大于或等于围岩的杨氏模量,则断层对地应力扰动减弱,应力差值减小,地应力方向不发生偏转,或垂直于断层走向偏转(陈世杰等, 2020)。另一方面,理论研究与应力场模拟表明,当断层走向与水平最大主应力方向的夹角 θ 为 $30^\circ\sim 60^\circ$ 时,断层对附近地应力的扰动最强(图 13;孙礼健等, 2009)。牛武区块的水平最大主应力方向为 $55^\circ\sim 60^\circ$,与 NE-EW 走向断层的夹角为 $10^\circ\sim 35^\circ$,而与 SE-SSE 走向断层的夹角大于 75° ,因此 NE-EW 走向断层对地应力的扰动程度大于 SE-SSE 走向断层。

结合研究区单井产能与离断层距离对比分

析显示,已钻井离断层越近,产量越高;离断层越远,产量逐渐下降,离断层最佳距离为 $0.25\sim 0.65\text{ km}$ (图 14)。结合上述现今地应力场扰动规律的分析,研究区井位部署应优先考虑距 NE-EW 走向断层 $0.25\sim 0.80\text{ km}$ 范围内,水平轨迹位移范围建议为 $SE125^\circ\sim 150^\circ$,并采用体积缝网压裂技术。

5 结论

(1)三轴压缩实验表明,鄂尔多斯盆地牛武区块盒一段砂岩的杨氏模量大于泥岩,而泊松比明显低于泥岩,表明砂岩具有较高的脆性。差应变实验证实,研究区三向主应力(σ_H 、 σ_h 以及 σ_v)

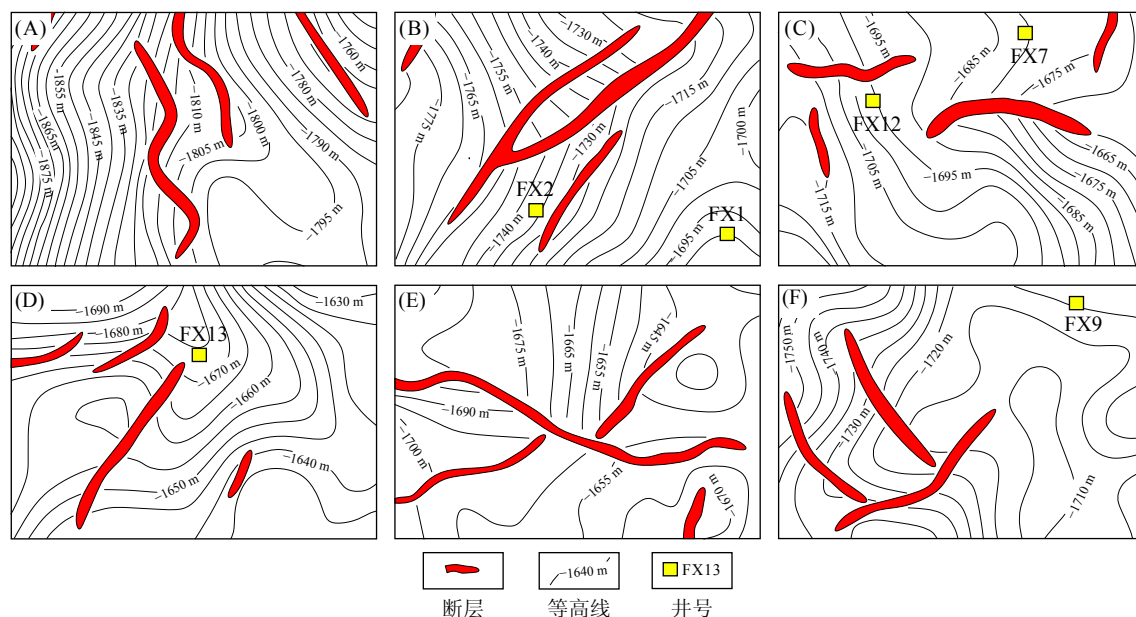


图 11 富县牛武区块典型断层形态和组合样式

Fig. 11 Typical fault patterns and assemblage styles of the Niuwu block in the Fu area

(A) “S”型断层形态; (B) 分叉型断层形态; (C) 弧型断层形态; (D) 平行式断层组合样式; (E) 斜交式断层组合样式; (F) 羽列式断层组合样式

(断层图件范围见 图 1-B 中; 等高线为牛武区块盒一段底深度)

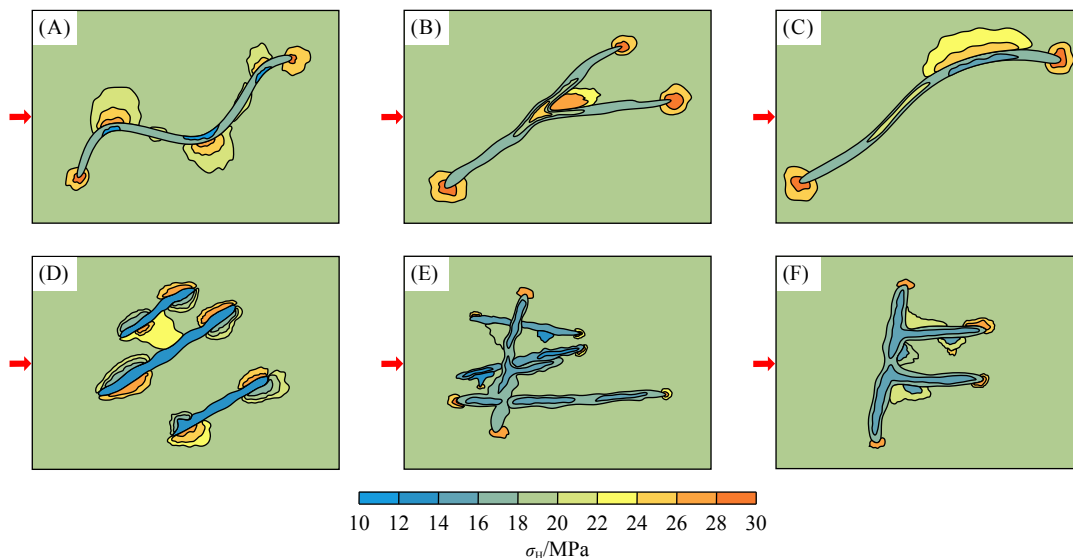


图 12 不同形态和组合样式断层的应力分布图

Fig. 12 Stress maps of faults with different morphologies and combinations of fault styles

(A) “S”型断层; (B) 分叉型断层; (C) 弧型断层; (D) 平行式断层; (E) 斜交式断层; (F) 羽列式断层
(图中红色箭头同图 10; 模拟时仅在模型左侧施加应力, 右侧、上端及下部为不可动边界)

分别为 50.26~62.12 MPa、48.65~57.39 MPa 以及 68.03~75.60 MPa, 呈现出 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h > 0$ 的关系, 属于 Ia 类地应力状态。此外, “古地磁与波速各向异性” 实验显示, 区域水平最大主应力方向为 NEE55°~60°。

(2) 现今地应力场主要受岩性和断裂的控

制, 岩性决定整体应力场的分布, 砂岩区应力值最高 (54~64 MPa), 泥岩区次之 (46~54 MPa)。断层在端部、弯曲处及交叉点常发生应力集中及应力方向偏转, 其中 NE-EW 走向断层的应力扰动大于 SE-SSE 走向断层。

(3) 研究区井位部署应优先考虑距 NE-EW

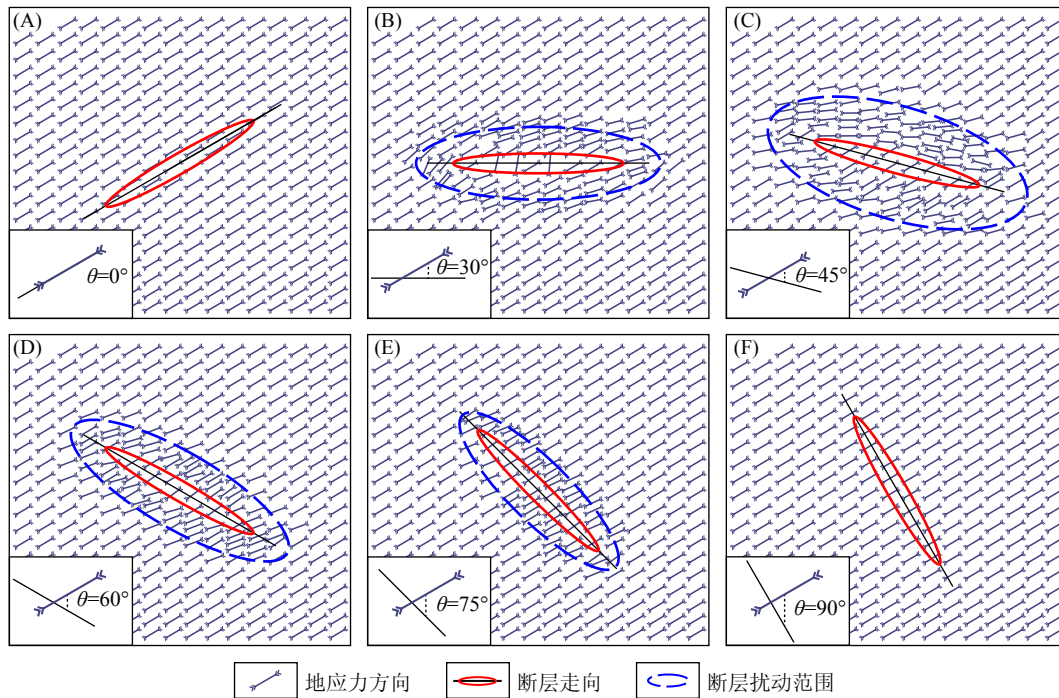


图 13 不同走向断层附近地应力方向的平面分布图

Fig. 13 Plane distribution of the stress direction near faults with different orientations

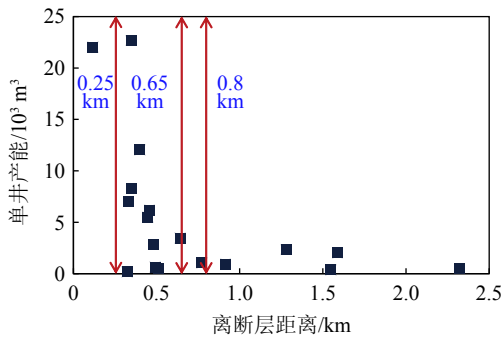


图 14 单井产能与离断层距离分布图

Fig. 14 Distribution of single-well productivity and distance from faults

走向断层 0.25~0.80 km 范围内,水平轨迹位移范围建议为 SE125°~150°,并采用体积缝网压裂技术。此规律可进一步扩展至定北等致密砂岩储层。

(4)未来的研究应重点刻画不同地质体的空间展布形态,特别是在砂泥岩油气藏中,需特别关注砂体的展布。同时,应建立三维非均质模型,并为不同地质体选择合适的本构方程,以获取油气藏储集层的非均质地应力场,为油藏工程设计、钻井工程设计及压裂设计提供更加准确的参考依据。

附加材料:附表由作者提供,数据真实性由

作者负责,在线查看网址:<https://xbzrkx.cdut.edu.cn/article/doi/10.12474/cdlgzrkx.2024081402>。

利益冲突声明:本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

[参 考 文 献]

白金朋,彭华,郑哲夏,等,2013.屯1井差应变分析法地应力测量[J].地质力学学报,19(2):117-124.

Bai J P, Peng H, Zheng Z X, et al., 2013. In-situ stress measurement by differential strain analysis method in the Well Tun-1[J]. Journal of Geomechanics, 19(2): 117-124. (in Chinese)

陈世杰,肖明,陈俊涛,等,2020.断层对地应力场方向的扰动规律及反演分析方法[J].岩石力学与工程学报,39(7):1434-1444.

Chen S J, Xiao M, Chen J T, et al., 2020. Disturbance law of faults to in-situ stress field directions and its inversion analysis method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(7): 1434-1444. (in Chinese)

陈筱青,王润秋,江勇勇,等,2019.水力压裂微地震监测中应力场的复杂性对应力反演的影响[J].石油科学通报,4(1):27-40.

Chen X Q, Wang R Q, Jiang Y Y, et al., 2019. Sensitivity of stress inversion to complexity of the stress field in micro-seismic

- monitoring of hydrofracturing[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 4(1): 27—40. (in Chinese)
- 陈灼华, 向芳, 王誉婉, 等, 2017. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界储集砂岩的成岩作用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 44(6): 717—726.
- Chen Z H, Xiang F, Wang Y W, et al., 2017. The diagenesis of Upper Paleozoic reservoir sandstones in the southeastern Ordos Basin[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 44(6): 717—726. (in Chinese)
- 程远方, 沈海超, 赵益忠, 2008. 一种简化的差应变地应力测量技术[J]. *石油钻采工艺*, 30(2): 61—64.
- Cheng Y F, Shen H C, Zhao Y Z, 2008. A simplified differential strain analysis stress method for in-situ stress measurement[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 30(2): 61—64. (in Chinese)
- 戴金星, 2019. 中国陆上四大天然气产区[J]. *天然气与石油*, 37(2): 1—6.
- Dai J X, 2019. The four major onshore gas provinces in China[J]. *Natural Gas and Oil*, 37(2): 1—6. (in Chinese)
- 邓宇, 张庆国, 陈亚军, 2018. 断层转折及其断层组合应力特征控油规律研究[J]. *中国锰业*, 36(1): 88—92.
- Deng Y, Zhang Q G, Chen Y J, 2018. Oil-controlling rule research of fault deflection and fault assemblage stress characteristic[J]. *China's Manganese Industry*, 36(1): 88—92. (in Chinese)
- 杜炳毅, 高建虎, 张广智, 等, 2024. 裂缝密度反演的页岩储层地应力地震预测方法及应用[J]. *石油地球物理勘探*, 59(2): 279—289.
- Du B Y, Gao J H, Zhang G Z, et al., 2024. Research and application of in-situ stress seismic data-based prediction approach of shale reservoirs based on fracture density inversion[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 59(2): 279—289. (in Chinese)
- 付金华, 段晓文, 姜英昆, 2001. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏地质特征及勘探方法[J]. *中国石油勘探*, 6(4): 68—75.
- 葛洪魁, 林英松, 王顺昌, 1998. 水力压裂地应力测量有关技术问题的讨论[J]. *石油钻采工艺*, 20(6): 53—56.
- Ge H K, Lin Y S, Wang S C, 1998. Discussion on technical problems related to measurement of earth stress through hydraulic fracturing[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 20(6): 53—56. (in Chinese)
- 何小东, 马俊修, 石善志, 等, 2020. 玛湖油田致密砂砾岩储层岩心差应变实验[J]. *中国海上油气*, 32(3): 86—93.
- He X D, Ma J X, Shi S Z, et al., 2020. Core differential strain test of tight glutinite reservoir in Mahu oilfield[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 32(3): 86—93. (in Chinese)
- 黄荣樽, 1984. 地层破裂压力预测模式的探讨[J]. *华东石油学院学报*, 8(4): 335—347.
- Huang R Z, 1984. A model for predicting formation fracture pressure[J]. *Journal of East China Petroleum Institute*, 8(4): 335—347. (in Chinese)
- 鞠玮, 牛小兵, 冯胜斌, 等, 2020. 页岩油储层现今地应力场与裂缝有效性评价——以鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组为例[J]. *中国矿业大学学报*, 49(5): 931—940.
- Ju W, Niu X B, Feng S B, et al., 2020. The present-day in-situ stress state and fracture effectiveness evaluation in shale oil reservoir: a case study of the Yanchang Formation Chang 7 oil-bearing layer in the Ordos Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 49(5): 931—940. (in Chinese)
- 康东雅, 向芳, 邹佐元, 等, 2019. 鄂尔多斯盆地上古生界砂岩岩石学特征及岩性差异[J]. *断块油气田*, 26(3): 299—303.
- Kang D Y, Xiang F, Zou Z Y, et al., 2019. Petrological characteristics and lithological differences of Upper Paleozoic sandstone of Ordos Basin[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 26(3): 299—303. (in Chinese)
- 李阿伟, 孙东生, 王红才, 2014. 致密砂岩波速各向异性及弹性参数随围压变化规律的实验研究[J]. *地球物理学进展*, 29(2): 754—760.
- Li A W, Sun D S, Wang H C, 2014. Seismic anisotropy and elastic parameter of tight sandstone with confining pressure[J]. *Progress in Geophysics*, 29(2): 754—760. (in Chinese)
- 李浩, 黄薇, 何剑, 等, 2011. 鄂尔多斯盆地宜川富县地区古生界天然气勘探潜力分析[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 26(2): 39—42.
- Li H, Huang W, He J, et al., 2011. Analysis of the natural gas exploration potential of the Paleozoic Erathem in Yichuan-Fuxian area, Ordos Basin[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 26(2): 39—42. (in Chinese)
- 李朋涛, 2022. 富县区块高闭合应力储层射孔工艺[J]. *化学工程与装备*, (11): 154—155.
- 李志鹏, 刘显太, 杨勇, 等, 2019. 渤南油田低渗透储集层岩性对地应力场的影响[J]. *石油勘探与开发*, 46(4): 693—702.
- Li Z P, Liu X T, Yang Y, et al., 2019. Influences of lithology on in-situ stress field in low permeability reservoirs in Bonan oilfield, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 46(4): 693—702. (in Chinese)
- 李智武, 罗玉宏, 刘树根, 等, 2005. 川东北地区岩石声发射实验及历史构造应力研究[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 32(6): 614—620.
- Li Z W, Luo Y H, Liu S G, et al., 2005. Acoustic emission experiment and estimation of tectonic paleostress in the reservoir rocks of Upper Triassic and Jurassic, the northeast of Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Tech-*

- nology (Science & Technology Edition), 32(6): 614—620. (in Chinese)
- 刘艳, 王立新, 郑新管, 等, 2005. 富县探区上古生界致密砂岩气层识别方法研究[J]. 石油天然气学报, 27(3): 355—357.
- Liu Y, Wang L X, Zheng X G, et al., 2005. Methods for recognizing Upper Paleozoic compacted sandstone gas reservoirs in Fuxian exploration region[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 27(3): 355—357. (in Chinese)
- 马建海, 孙建孟, 2002. 用测井资料计算地层应力[J]. 测井技术, 26(4): 347—351.
- Ma J H, Sun J M, 2002. Calculation of formation stress using logging data[J]. Well Logging Technology, 26(4): 347—351. (in Chinese)
- 马龙, 徐丽, 孔令军, 等, 2015. 富县地区井壁稳定控制研究[J]. 辽宁化工, 44(1): 48—49.
- Ma L, Xu L, Kong L J, et al., 2015. Study on the stability of the wellbore in Fuxian area[J]. Liaoning Chemical Industry, 44(1): 48—49. (in Chinese)
- 沈海超, 程远方, 赵益忠, 等, 2008. 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, 27(增刊 2): 3985—3990.
- Shen H C, Cheng Y F, Zhao Y Z, et al., 2008. Study on influence of faults on geostress by measurement data and numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(S2): 3985—3990. (in Chinese)
- 孙礼健, 朱元清, 杨光亮, 等, 2009. 断层端部及附近地应力场的数值模拟[J]. 大地测量与地球动力学, 29(2): 7—12.
- Sun L J, Zhu Y Q, Yang G L, et al., 2009. Numerical simulation of ground stress field at ends and vicinity of a fault[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 29(2): 7—12. (in Chinese)
- 王杰, 贾会冲, 孙晓, 等, 2022. 鄂尔多斯盆地富县古生界天然气成因及气源综合识别[J]. 天然气地球科学, 33(9): 1476—1484.
- Wang J, Jia H C, Sun X, et al., 2022. Comprehensive evaluation on origin and source of natural gas in the Paleozoic in Fuxian area, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 33(9): 1476—1484. (in Chinese)
- 王文川, 赵俊兴, 向芳, 等, 2018. 鄂尔多斯盆地东南部山西组、下石盒子组储层特征及差异性对比[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 45(2): 199—210.
- Wang W C, Zhao J X, Xiang F, et al., 2018. Reservoir characteristics and comparative analysis of otherness of Shanxi Formation and Lower Shihezi Formation in southeastern Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 45(2): 199—210. (in Chinese)
- 翁剑桥, 曾联波, 吕文雅, 等, 2020. 断层附近地应力扰动带宽度及其影响因素[J]. 地质力学学报, 26(1): 39—47.
- Weng J Q, Zeng L B, Lyu W Y, et al., 2020. Width of stress disturbed zone near fault and its influencing factors[J]. Journal of Geomechanics, 26(1): 39—47. (in Chinese)
- 翁凯, 李鑫, 李荣西, 等, 2012. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界烃源岩评价及有利区预测[J]. 特种油气藏, 19(5): 21—25.
- Weng K, Li X, Li R X, et al., 2012. Evaluation of Upper Paleozoic source rocks and favorable region prediction in the southeast of Ordos Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 19(5): 21—25. (in Chinese)
- 谢基海, 葛坤朋, 徐慧茹, 等, 2020. 古地磁学岩心定向方法回顾[J]. 地球物理学进展, 35(3): 906—917.
- Xie J H, Ge K P, Xu H R, et al., 2020. Review of paleomagnetic core orientation method[J]. Progress in Geophysics, 35(3): 906—917. (in Chinese)
- 谢润成, 周文, 杨志彬, 等, 2010. 非定向全直径岩心现今地应力特征试验测试一体化研究[J]. 石油钻探技术, 38(4): 108—111.
- Xie R C, Zhou W, Yang Z B, et al., 2010. Research on integrated test of in-situ stresses from unoriented core[J]. Petroleum Drilling Techniques, 38(4): 108—111. (in Chinese)
- 徐珂, 2019. 南堡凹陷高尚堡油藏现今地应力研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东).
- Xu K, 2019. Current in-situ stress of Gaoshangpu reservoir, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, China[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China). (in Chinese)
- 徐素国, 梁卫国, 莫江, 等, 2009. 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, 5(5): 878—883.
- Xu S G, Liang W G, Mo J, et al., 2009. Influence of weak mudstone intercalated layer on mechanical properties of laminated salt rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 5(5): 878—883. (in Chinese)
- 徐兴雨, 2020. 鄂尔多斯盆地断裂构造及其控藏作用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东).
- Xu X Y, 2020. Study on faults structure and reservoir control in Ordos Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China). (in Chinese)
- 徐正, 李天斌, 孟陆波, 等, 2014. 鹫峰山隧道地应力反演模型与三维地应力[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 41(2): 243—250.
- Xu Z, Li T B, Meng L B, et al., 2014. Zhegu Mountain tunnel ground stress inversion model and three dimensional ground stress[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 41(2): 243—250. (in Chinese)
- 杨华, 付金华, 刘新社, 等, 2012a. 鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发[J]. 石油勘探与开发, 39(3): 295—303.
- Yang H, Fu J H, Liu X S, et al., 2012a. Accumulation conditions

- and exploration and development of tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 39(3): 295—303. (in Chinese)
- 杨华, 刘新社, 杨勇, 2012b. 鄂尔多斯盆地致密气勘探开发形势与未来发展展望[J]. *中国工程科学*, 14(6): 40—48.
- Yang H, Liu X S, Yang Y, 2012b. Status and prospects of tight gas exploration and development in the Ordos Basin[J]. *Strategic Study of CAE*, 14(6): 40—48. (in Chinese)
- 姚昌宇, 周瑞立, 胡艾国, 等, 2012. 利用常规测井确定岩石杨氏模量——以富县区块上古生界储层为例[J]. *石油地质与工程*, 26(5): 110—112.
- Yao C Y, Zhou R L, Hu A G, et al., 2012. Determination of Yong's modulus by using conventional logging—take Upper Paleozoic reservoirs of Fuxian block as an example[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 26(5): 110—112. (in Chinese)
- 周文, 闫长辉, 王世泽, 等, 2007. 油气藏现今地应力场评价方法及应用[M]. 北京: 地质出版社: 10—13.
- 朱新春, 2018. 富县区块盒 1 段岩石力学参数分布规律研究[J]. *天然气勘探与开发*, 41(3): 85—89.
- Zhu X C, 2018. Distribution laws of geomechanical parameters in Shihezi 1 member, Fuxian block[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 41(3): 85—89. (in Chinese)
- 邹才能, 杨智, 何东博, 等, 2018. 常规-非常规天然气理论、技术及前景[J]. *石油勘探与开发*, 45(4): 575—587.
- Zou C N, Yang Z, He D B, et al., 2018. Theory, technology and prospects of conventional and unconventional natural gas[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45(4): 575—587. (in Chinese)
- Alam J, Gogoi T, Chatterjee R, 2021. Geomechanical characterization of subsurface formations with stress rotation in Assam Gap, Northeast India[J]. *Journal of Earth System Science*, 130(3): 132.
- Eaton B A, 1972. The effect of overburden stress on geopressure prediction from well logs[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 24(8): 929—934.
- Faulkner D R, Mitchell T M, Healy D, et al., 2006. Slip on 'weak' faults by the rotation of regional stress in the fracture damage zone[J]. *Nature*, 444(7121): 922—925.
- Ferronato M, Gambolati G, Janna C, et al., 2008. Numerical modelling of regional faults in land subsidence prediction above gas/oil reservoirs[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(6): 633—657.
- Gray D, Anderson P, Logel J, et al., 2012. Estimation of stress and geomechanical properties using 3D seismic data[J]. *First Break*, 30(3): 59—68.
- Ito T, Evans K, Kawai K, et al., 1999. Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(6): 811—826.
- Kayama K, Mikada H, Takekawa J, 2021. Dispersion of flexural waves in a borehole with a tensile fracture in an anisotropic stress environment[J]. *Geophysical Prospecting*, 69(3): 598—607.
- Lai J, Wang G W, Wang S, et al., 2018. A review on the applications of image logs in structural analysis and sedimentary characterization[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 95: 139—166.
- Liu P L, Hu H T, Chen X, et al., 2024. The influencing parameters and improve methods of acid-etched fracture conductivity: a review[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 238: 212844.
- Sinha B K, Plona T J, 2001. Wave propagation in rocks with elastic-plastic deformations[J]. *Geophysics*, 66(3): 772—785.
- Sun D S, Sone H, Lin W R, et al., 2017. Stress state measured at ~7 km depth in the Tarim Basin, NW China[J]. *Scientific Reports*, 7(1): 4503.
- Thiercelin M J, Plumb R A, 1994. Core-based prediction of lithologic stress contrasts in East Texas Formations[J]. *SPE Formation Evaluation*, 9(4): 251—258.