

doi: 10.12029/gc20230421004

沈杰, 徐浩, 邓虎成, 何建华, 李国峰, 刘岩, 宋威国, 邓乃尔, 武瑾. 2025. 复杂断裂区地应力场分布特征及扰动机制研究——以鄂尔多斯盆地定北地区上古生界为例[J]. 中国地质, 52(1): 315–330.

Shen Jie, Xu Hao, Deng Hucheng, He Jianhua, Li Guofeng, Liu Yan, Song Weiguo, Deng Naier, Wu Jin. 2025. Distribution characteristics and disturbance mechanism of geostress field in complex fault zone: A case study of Upper Paleozoic in Dingbei area of Ordos Basin[J]. Geology in China, 52(1): 315–330(in Chinese with English abstract).

复杂断裂区地应力场分布特征及扰动机制研究 ——以鄂尔多斯盆地定北地区上古生界为例

沈杰¹, 徐浩^{1,2}, 邓虎成^{1,2}, 何建华^{1,2}, 李国峰³, 刘岩^{1,2}, 宋威国¹, 邓乃尔¹, 武瑾⁴

(1. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059; 2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 3. 中国石化华北油气分公司石油工程技术研究院, 河南 郑州 450006; 4. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:【研究目的】鄂尔多斯盆地定北地区上古生界致密气资源丰富, 勘探潜力巨大, 但区内断裂广泛发育, 断裂带附近地应力场特征规律不明, 严重制约该区油气勘探开发。【研究方法】本文基于差应变实验、声发射实验、测井解释地应力大小、波速各向异性实验、古地磁实验、成像测井与偶极声波测井资料解释地应力方向、数值模拟等多方法融合开展研究区上古生界地应力场特征精细解析, 以期查明定北地区地应力场分布特征及其扰动机制。【研究结果】定北地区上古生界三向应力具有垂向主应力>最大主应力>最小主应力的特征, 区域地应力场大小主要受断裂带控制, 应力扰动程度与断裂部位、断裂规模、断裂成因等因素有关, 其中溶塌型断裂带区域三向应力相对最低。区域主应力场方向为 N35°E~N45°E, 储层地应力方向主要受区域主应力场方向和断裂带控制, 不同类型断裂带引起的地应力扰动范围和扰动程度存在差异, 其中地应力扰动范围主要受断裂走向与断层长度所影响。【结论】基于地应力场特征研究, 本文明确了定北地区地应力大小及方向的分布特征和扰动规律, 探讨了不同成因断裂带对地应力大小的扰动机制, 并建立了研究区地应力方向扰动宽度预测模型, 对后续井网部署及压裂改造等具有重要参考价值。

关键词: 地应力; 断裂; 岩溶; 分布特征; 扰动机制; 数值模拟; 油气勘查工程; 定北地区; 鄂尔多斯盆地

创新点: 揭示了复杂断裂带对地应力分布的影响; 探讨了不同成因断裂带对地应力大小的扰动机制; 建立了定北地区地应力方向扰动宽度预测模型。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)01-0315-16

Distribution characteristics and disturbance mechanism of geostress field in complex fault zone: A case study of Upper Paleozoic in Dingbei area of Ordos Basin

SHEN Jie¹, XU Hao^{1,2}, DENG Hucheng^{1,2}, HE Jianhua^{1,2}, LI Guofeng³, LIU Yan^{1,2}, SONG Weiguo¹, DENG Naier¹, WU Jin⁴

收稿日期: 2023-04-21; 改回日期: 2023-10-01

基金项目: 四川省科技计划杰出青年科技人才项目“页岩气储层天然裂缝评价”(2020JDJQ0058)资助。

作者简介: 沈杰, 男, 1999 年生, 硕士, 主要从事非常规油气储层地应力场精细描述研究; E-mail: 1982510085@qq.com。

通信作者: 徐浩, 男, 1990 年生, 博士, 副教授, 主要从事油气田开发地质研究; E-mail: xuhao19@cdut.edu.cn。

武瑾, 女, 1988 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事页岩气开发地质研究; E-mail: wujinouc@petrochina.com.cn。

(1. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. Petroleum Engineering Technology Research Institute, North China Oil and Gas Branch of Sinopec, Zhengzhou 450006, Henan, China; 4. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper is the result of oil–gas exploration engineering.

[Objective] Dingbei area of Ordos Basin is rich in tight gas resources of Upper Paleozoic and has great exploration potential. However, faults are widely developed in this area, and the characteristics of geostress field near the fault zone are unknown, which seriously restricts oil and gas exploration and development in this area. **[Methods]** This paper conducts a detailed analysis of the characteristics of the Upper Paleozoic geostress field in the study area based on differential strain experiment, acoustic emission experiment, logging interpretation of geostress size, wave velocity anisotropy experiment, paleomagnetism experiment, imaging logging and dipole acoustic logging data interpretation of geostress direction, numerical simulation and other methods, in order to find out the distribution characteristics and disturbance mechanism of the geostress field in Dingbei area. **[Results]** The three–dimensional stress of Upper Paleozoic in Dingbei area has the characteristics of vertical principal stress>maximum principal stress>minimum principal stress, and the regional geostress field is mainly controlled by the fault zone, and the stress disturbance degree is related to the fault location, fault scale, fault genesis and other factors, among which the three–dimensional stress in the karst fault zone is relatively lowest. The direction of regional principal stress field is N35°E~N45°E. The direction of reservoir geostress is mainly controlled by the direction of regional principal stress field and fault zone, and the range and degree of geostress disturbance caused by different types of fault zones are different, among which the range of geostress disturbance is mainly affected by fault strike and fault length. **[Conclusions]** Based on the research on the characteristics of geostress field, this paper clarifies the distribution characteristics and disturbance law of geostress size and direction in Dingbei area, discusses the disturbance mechanism of different genetic fault zones on geostress size, and establishes a prediction model for the disturbance width of geostress direction in the research area, which has important reference value for subsequent well pattern deployment and fracturing reconstruction.

Key words: ground stress; fracture; karst; distribution characteristics; disturbance mechanism; numerical simulation; oil–gas exploration engineering; Dingbei area; Ordos basin

Highlights: The influence of complex fault zone on in–situ stress distribution is revealed. The disturbance mechanism of different genetic fault zones on geostress is discussed. The prediction model of disturbance width in the direction of geostress in Dingbei area is established.

About the first author: SHEN Jie, born in 1999, master, mainly engaged in fine description of geostress field in unconventional oil and gas reservoirs; E–mail: 1982510085@qq.com.

About the corresponding author: XU Hao, born in 1990, Ph.D., associate professor, mainly engaged in oil and gas field development geological research; E–mail: xuhao19@cdut.edu.cn. WU Jin, born in 1988, Ph.D., senior engineer, mainly engaged in shale gas development geological research; E–mail: wujinouc@petrochina.com.cn.

Fund support: Supported by the project of sichuan Science and Technology Program Outstanding Young Scientific Talents (No. 2020JDJQ0058).

1 引 言

随着非常规油气资源的不断消耗,以页岩气和致密砂岩油气为主的非常规油气资源勘探开发成为国家重大战略需求(何建华等, 2022; 黄滔等, 2023)。近年来,随着榆林、苏里格、大牛地等大气田的发现,鄂尔多斯盆地上古生界表现出了极好的致密气资源(贾爱林等, 2022)。定北地区作为中国

石化在鄂尔多斯盆地的重要探区之一,以上古生界盒 1 段、山西组及太 2 段为主要开发层,并在近年来的勘探开发中取得了多次重要突破(吴小奇等, 2019)。然而,已有钻探及测试结果表明,定北地区经历多期构造运动,区内断裂广泛发育且差异性大,储层地应力大小、方向变化复杂,规律性不明确,难以满足后续工程甜点评价及储层改造要求。因此,准确查明区域地应力场分布特征及扰动规律

对定北地区致密气安全高效开发至关重要。

针对断裂对地应力状态的扰动机制研究,国内外已有不少学者开展了相关工作(苏生瑞, 2001; 单钰铭等, 2010)。前人研究多借助于实验和有限元数值模拟的手段,研究了断层的活动性、规模、弹性模量、几何形态及断层组合、边界应力比等因素影响下断层及其周围应力场的分布规律(苏生瑞等, 2002; 孙礼健等, 2009; 贾晓亮等, 2010; 赵钰挺等, 2015; 陈世杰等, 2020)。但这些研究往往集中于断层对地应力场影响的变化规律上,尚缺乏从岩石力学和力的叠加合成角度揭示其深层的力学机理,且这些描述大多以定性描述为主,而对于断层及其附近地应力场扰动程度和扰动范围的定量评价研究明显不足(刘中春等, 2016; 翁剑桥等, 2020)。目前亟需构建一套针对不同类型断裂带引起的地应力扰动范围与程度的定量评价技术,这对于此类复杂断裂区的水平井井位部署、钻井方位及水力压裂设计等至关重要。

为此,本文以定北地区上古生界主要开发层盒 1 段、山西组及太 2 段为例,通过多方法融合的实验测试和测井解释开展研究区目的层单井地应力特征的精细解析。在此基础上,进一步开展地应力场数值模拟工作,并以主要产气层太 2 段为例,重点分析研究区地应力场分布特征及其扰动机制。

2 地质背景

定北地区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡中段的西缘,与天环拗陷东缘相接(图 1a),横跨两个构造单元,现今构造形态整体显示为北东高、西南低的倾斜缓坡,构造幅度相对较为平缓(吴小奇等, 2019)。受加里东运动影响,定北地区在奥陶系末期遭受长期风化剥蚀,缺失了志留系、泥盆系及下石炭统。上古生界主要沉积了石炭系与二叠系,地层自上而下依次为石千峰组、上石盒子组、下石盒子组、山西组及太原组,并与下伏马家沟组呈不整合接触(李悦等, 2023)。

鄂尔多斯盆地自古生代以来经历了多个构造演化阶段,在加里东期—喜山期依次形成了近南北向、北东—南西向和北西—南东向的区域性挤压构造应力场(图 1b),区域构造运动复杂(徐黎明等, 2006; 张岳桥和廖昌珍, 2006; 罗建强和何忠明, 2008; 齐宏伟和沈杰, 2023)。受多期构造运动叠加

控制,定北地区断裂系统发育复杂。通过三维地震资料切取地震剖面和相干切片,在研究区内共识别出 200 余条断裂(主要断裂 38 条)(图 1c)。笔者在对断裂特征(包括产状、级别、形成期次等)进行精细刻画的基础上,进一步根据断裂成因及规模将其划分为 7 个主要的断裂带(图 1d)。其中哈巴湖(主断裂)、北大池和柳杨堡断裂带主要受马家沟组溶蚀作用影响,地震剖面上可观察到明显的地层垮塌现象,整体呈现“下宽上窄”的结构,断距向上逐渐减小,且断裂走向与地下溶沟流向一致,属于典型的“断—溶—塌”型(即先断后溶再塌)断裂(图 2)。

明确定北地区构造演化背景及断裂体系特征对富集规律认识和储层改造具有重要意义(张威和卢涛, 2019; 赵荣华, 2021),同时也是开展后续地应力场研究工作的重要基础。

3 单井地应力测试及解释结果

3.1 单井地应力大小测试及解释结果

本文主要采用岩心测试(差应变和声发射实验)与压裂标定测井的地应力大小解释方法。其中差应变实验采用 TAW-1000 三轴伺服试验系统进行测试,声发射实验采用 RTR-1000 三轴伺服测试系统结合 SAEU2S 声发射检测系统进行测试。为提高声发射实验精度,本文通过压裂资料求取水平最小主应力,并结合声发射能量与振铃计数联合标定 Kaiser 效应点(图 3)。

4 组声发射实验和 7 组差应变实验所得的三向应力结果(表 1, 表 2)表明,最大水平主应力为 61.59~76.54 MPa,平均为 69.27 MPa;最小水平主应力为 53.59~65.26 MPa,平均为 59.03 MPa;垂直主应力为 82.76~97.00 MPa,平均为 89.63 MPa。两种实验测试结果较为接近,三向应力之间具有垂向主应力>最大主应力>最小主应力的特征,属于 I_a 类地应力类型。

由于实验结果有限,为进一步建立研究区全井段地应力剖面,本文主要采用黄式模型进行计算,其模型如下(黄荣樽和庄锦江, 1986):

$$\begin{cases} \sigma_H = \frac{\mu}{1-\mu} (\sigma_v - aP_p) + A (\sigma_v - aP_p) + aP_p \\ \sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu} (\sigma_v - aP_p) + B (\sigma_v - aP_p) + aP_p \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_v = \rho gh$$

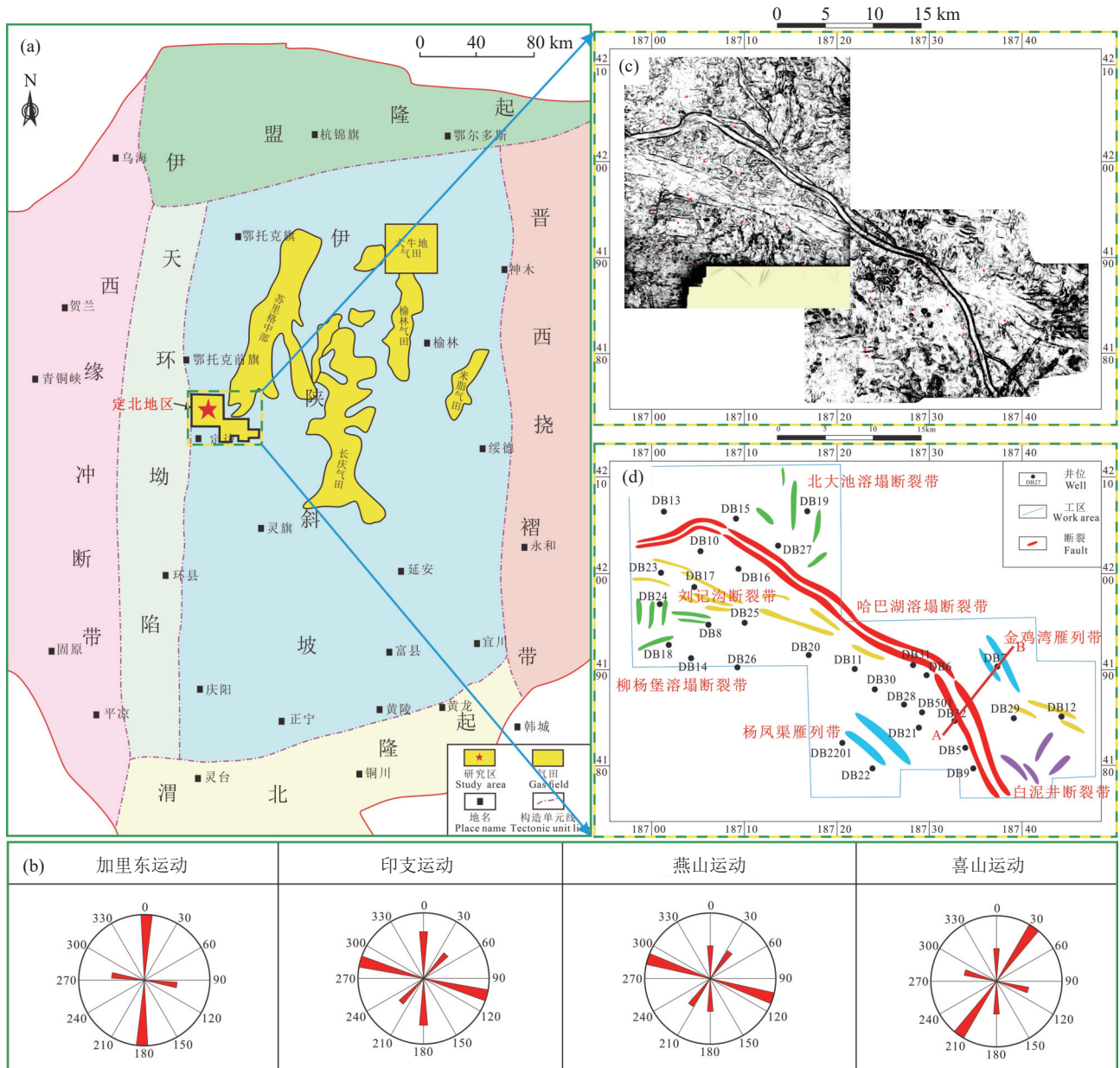


图1 研究区地质背景图

a—研究区构造位置图(据刘洪平, 2017 修改); b—不同时期构造应力场; c—太原组底面相干切片图; d—工区主要断裂分布图

Fig.1 Geological background map of the study area

a—Tectonic location map of the study area (modified from Liu Hongping, 2017); b—Tectonic stress field at different times; c—Taiyuan Formation bottom surface coherent slice map; d—Distribution map of main faults in work area

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = 1 - \frac{K}{\rho_m \left(\frac{1}{t_{pm}^2} - \frac{4}{3t_{sm}^2} \right) \times \beta} \\ K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中, σ_H 为水平最大主应力, MPa; σ_h 为水平最小主应力, MPa; σ_v 为垂向主应力, MPa; A、B 为构造应力系数, 无量纲; α 为 Biot 系数, 无量纲;

P_p 为孔隙压力, MPa; K 为体积模量, MPa; ρ 为岩石密度, g/cm^3 ; h 为深度, m; ρ_m 为岩石骨架密度, g/cm^3 ; t_{pm} 为岩石骨架纵波时差, $\mu s \cdot ft^{-1}$; t_{sm} 为岩石骨架横波时差, $\mu s \cdot ft^{-1}$; β 为相关系数, 无量纲, 取为 9.299×10^7 ; E 为杨氏模量, GPa; μ 为泊松比, 无量纲。其中 P_{so} 通过压裂资料获取, P_p 通过地层压力系数计算得到, E 和 μ 通过三轴压缩实验结合测井资料获取。

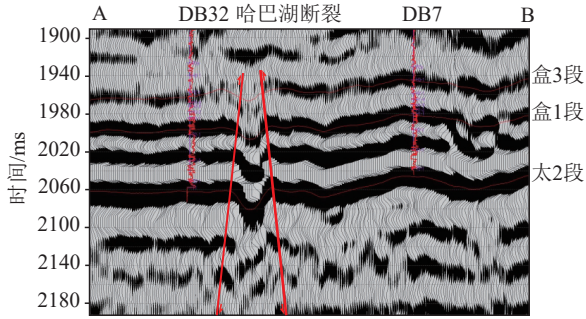


图 2 研究区哈巴湖断裂典型剖面(剖面位置见图 1d)
Fig.2 Typical section of Habahu fault in the study area (see Fig.1d for the location of the section)

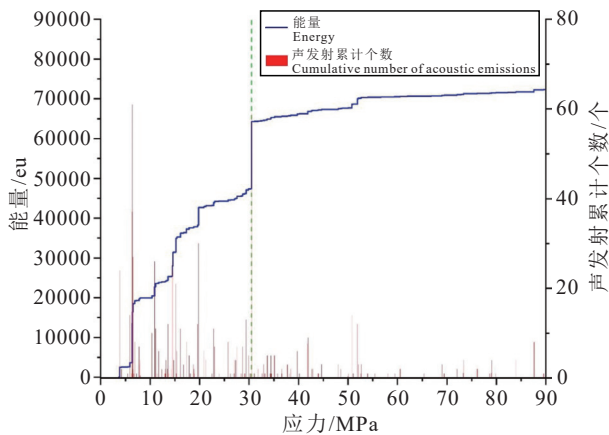


图 3 DB13 井太 2 段 2 号样品 45°声发射曲线图
Fig.3 45 Acoustic emission curve of sample No.2 of Well DB13 Tai 2

公式(1)中 A 和 B 系数难以直接确定, 需要利用岩心测试的三向应力结果代入公式(1)中, 结合测井及压裂资料获取的 Biot 系数、泊松比和地层孔隙压力等进行反算得到。根据上述方法, 建立了研究区内 28 口直井的单井地应力剖面, 明确了上古生界目的层岩石力学性质及地应力参数在纵向上的

连续变化规律(图 4)。将测井解释结果与岩心测试及压裂解释结果进行对比, 整体吻合效果较好, 误差率在 7% 以内, 表明本次建立的测井计算模型在研究区内有较好的适用性。

3.2 单井地应力方向测试及解释结果

地应力方向判定方法众多, 基于研究区实际情况, 本文主要采用“岩心测试-井筒结构恢复-近井筒波速各向异性提取”的地应力方向判定技术。利用波速各向异性及古地磁实验完成了研究区 9 口井的地应力方向测试, 首先通过 GCTS-RTR-2000 多功能岩石力学仪进行波速各向异性实验确定最大主应力方向相对于标志线的夹角, 再结合黏滞剩磁测量仪进行古地磁定向实验确定标志线相对于地理北极的夹角, 进而计算得到水平最大主应力方向。井筒结构恢复主要利用成像测井资料识别井壁崩落和诱导压裂缝从而判断水平主应力方向。如图 5a 所示, 成像测井中呈近 180°对称的不均匀暗色条带影像特征可判定为井壁崩落, 其崩落宽度通常较大且会出现较多椭圆形的黑洞。而成像测井中呈倒“八”字形态的羽状暗色条带可判定为诱导压裂缝(图 5b), 其缝宽较细且较井壁崩落更易出现。近井筒波速各向异性提取主要通过偶极声波测井资料观察快慢横波方位从而确定水平主应力方向, 偶极声波各向异性图像识别结果易受岩性变化影响, 在砂岩与泥岩互层段局部发生变化(图 5c), 且整体可信度随地层各向异性增强而增强。

通过多方法综合对比分析, 完成了研究区内 11 口井的地应力方向判定。从结果(图 6)分布来看, 研究区目的层地应力方向存在区域差异, 在远离主断裂区域, 最大主应力方向为 N33.95°E~N48.05°E。

表 1 定北地区上古生界差应变实验结果

Table 1 Experimental results of Upper Paleozoic differential strain in Dingbei area

井号	层位	深度/m	三向主应力/MPa			三向主应力梯度/(MPa/100 m)		
			水平最大	水平最小	垂向	水平最大	水平最小	垂向
DB15	山1段	3765.80	61.62	57.65	91.51	1.6363	1.5308	2.4300
DB17	太2段	3937.50	74.33	65.26	95.68	1.8877	1.6573	2.4299
DB20	盒1段	3764.40	66.45	56.17	91.47	1.7652	1.4921	2.4298
DB23	太2段	3991.70	63.92	55.22	97.00	1.6013	1.3833	2.4300
DB27	太2段	3799.40	70.91	64.46	92.33	1.8663	1.6965	2.4301
DB31	盒1段	3774.80	61.59	58.11	91.73	1.6316	1.5394	2.4300
DB32	山1段	3756.20	63.05	56.95	91.28	1.6785	1.5161	2.4301

表 2 定北地区上古生界声发射实验结果

Table 2 Acoustic emission experiment results of Upper Paleozoic in Dingbei area

井号	层位	深度/m	岩性	kaiser点应力值/MPa				最大主应力/ MPa	最小主应力/ MPa	垂向地应力/ MPa
				0°	45°	90°	垂直			
DB12	盒1段	3704.16~3704.30	灰白色粗砂岩	40.41	44.19	31.94	51.28	72.56	63.89	83.33
DB13	太2段	3917.95~3918.11	灰白色粗砂岩	39.41	30.51	22.84	48.86	73.32	56.74	82.76
DB501	盒1段	3809.09~3809.23	浅灰色中砂岩	39.28	28.50	20.64	50.13	72.25	53.59	83.09
DB501	盒1段	3864.10~3864.22	浅灰色细砂岩	41.25	28.65	22.64	50.64	74.73	56.03	84.08
DB2201	盒1段	3675.43~3675.56	浅灰色含砾粗砂岩	44.74	38.34	32.47	59.49	76.54	64.27	91.29

在靠近主断裂时,地应力方向发生不同程度的偏转,表现为与断裂走向接近平行。

4 三维地应力场预测

针对定北地区复杂断裂带附近地应力场分布特征及扰动规律不明的问题,笔者采用目前主流的有限元数值模拟手段对三维地应力场的空间分布进行预测,主要包含 5 个步骤(鲜成钢, 2018; 徐珂等, 2020; 张小菊等, 2022; 刘英君等, 2022): ①基于构造形貌、断裂发育、沉积相展布建立三维地质模型; ②基于岩心测试、测井解释等完成实际井和人工井的岩石力学参数赋值; ③基于断裂期次及裂缝发育情况完成断裂的岩石力学参数赋值; ④以井点为约束, 择优设置边界加载条件; ⑤检验模拟结果的可靠性。

4.1 模型建立及边界条件

定北地区上古生界目的层属正常沉积, 构造形貌差异不大, 但各层的沉积环境存在一定变化(李悦, 2023)。考虑到砂泥岩层的岩石力学属性差异, 笔者基于各层的沉积相展布设置了不同的砂地比边界条件。在此基础上, 结合构造及断裂数据通过 Rhino 软件完成了研究区三维地质模型的构建(图 7)。在分区赋值的过程中, 由于区块地质模型与边界存在一定距离, 为进一步提高模拟精度, 消除边界效应, 在工区周边加入了 33 口人工井设置。人工井的岩石力学参数赋值是其中的一个难点, 笔者首先基于实际井资料将砂地比与杨氏模量和泊松比建立关系, 再根据人工井的砂地比值确定其对应的岩石力学参数。此外, 由于在储层断裂形成过程中, 其内部部分能量得以释放(徐珂等, 2022), 所以断裂的力学性质研究也是一大难点。为明确断裂内部岩石力学属性, 笔者借鉴了含裂缝介质岩石的等效力学性质计算方法。依据前人研究(吕昌,

2017), 若岩石基质存在多条裂缝, 其等效杨氏模量和泊松比可根据式(3)计算得到。在公式(3)中, 其计算关键在于断裂裂缝率的确定, 笔者首先基于断裂期次将所有断裂划分为 3 类, 进而根据断裂带附近井岩心裂缝发育情况来分别赋予其对应的裂缝率值, 从而得到其等效岩石力学参数。在上述力学模型构建完成的基础上, 基于井点结果作为约束, 通过反复尝试从而择优确定如下边界条件: 在模型顺时针旋转 65°方向上加载水平最大主应力, 纵向范围在 61.59~74.33 MPa; 水平最小主应力与水平最大主应力方向垂直, 纵向范围在 55.22~65.26 MPa; 在模型上方施加垂直主应力, 纵向范围在 91.47~97.00 MPa。

$$\left\{ \begin{array}{l} E^* = \frac{S^*}{\sum_{i=1}^N \frac{S_i}{E_i} + \sum_{j=1}^M \frac{S_j}{E_j}} \\ \mu^* = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\mu_i S_i}{E_i} + \sum_{j=1}^M \frac{\mu_j S_j}{E_j} \cos 2\alpha_j}{\sum_{i=1}^N \frac{S_i}{E_i} + \sum_{j=1}^M \frac{S_j}{E_j}} \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: E^* 为含裂缝介质的等效杨氏模量, GPa; μ^* 为含裂缝介质的等效泊松比, 无量纲; α 为裂缝与最大主应力方向的夹角, °; S^* 为含裂缝介质单元的总面积, m^2 ; S_i 为岩石基质的面积, m^2 ; S_j 为含裂缝介质单元的面积, m^2 ; E_i 为岩石基质的杨氏模量, GPa; E_j 为裂缝内充填介质的杨氏模量, GPa; μ_i 为岩石基质的泊松比, 无量纲; μ_j 为裂缝内充填介质的泊松比, 无量纲。

4.2 模拟结果与误差分析

通过有限元数值模拟及计算, 得到了定北地区上古生界盒 1 段、山 2 段、山 1 段及太 2 段四个层段的现今地应力场分布特征。由于篇幅有限, 本文着重选取了定北地区未来主力开发层太 2 段进行

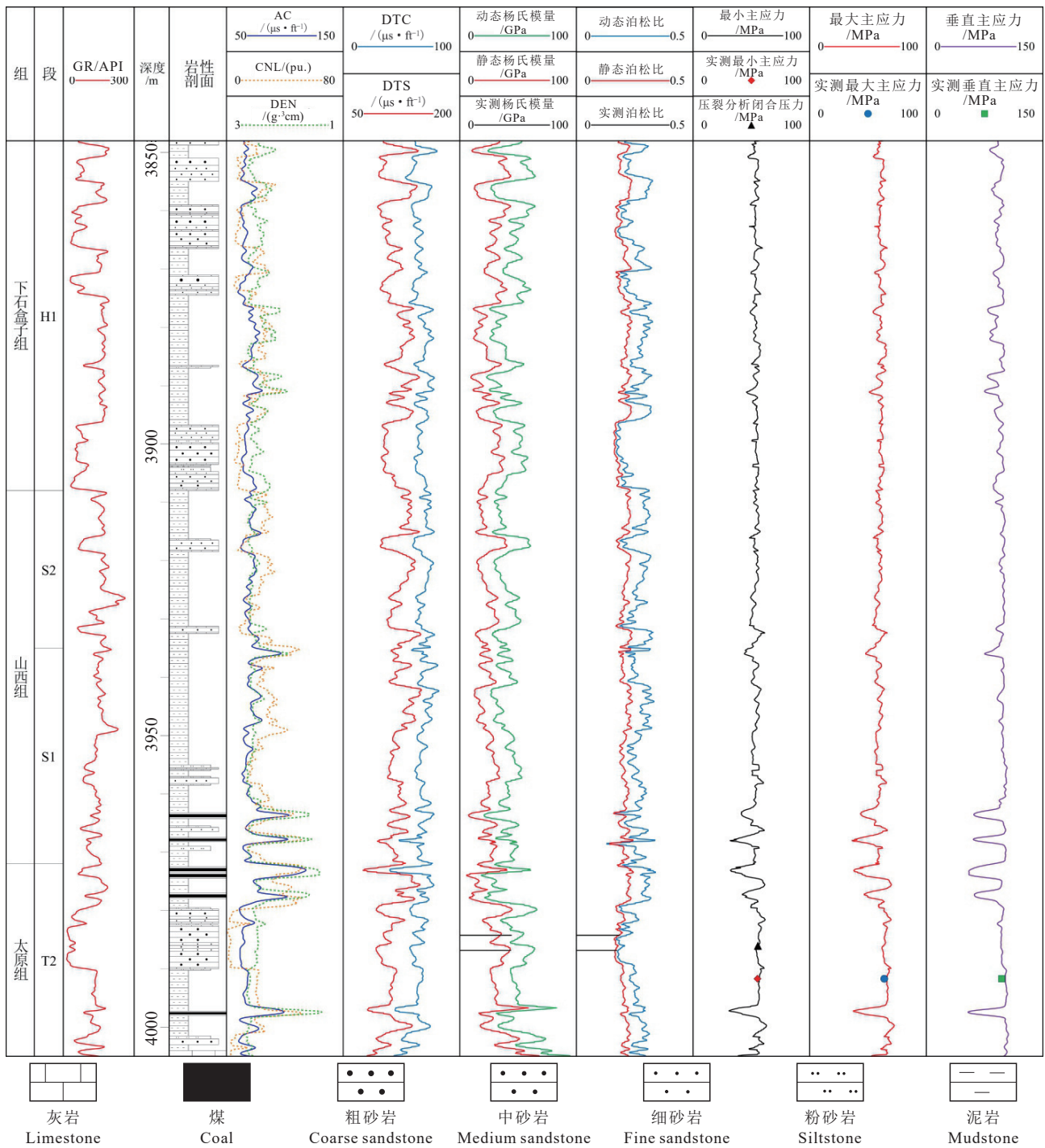


图 4 DB23 井上古生界单井地应力剖面
Fig.4 Geostress profile of single Well DB23 in Upper Paleozoic

详细研究。将太 2 段模拟结果与实测结果进行对比(表 3, 表 4), 三向应力误差值平均在 4.42 MPa, 差应力误差值平均在 2.09 MPa, 地应力方向误差值平均在 15.53°。其中 DB27 井由于位置特殊, 恰好位于帚状形的北大池溶塌断裂带交汇部位, 并且极

为靠近哈巴湖主断裂, 应力方向较为复杂, 导致该井的地应力方向模拟结果与实测结果偏差较大。在排除该异常点的情况下, 地应力方向平均误差值降到 7.26°。上述结果均在行业允许的误差范围内, 表明此次模拟结果具有较高的精度。

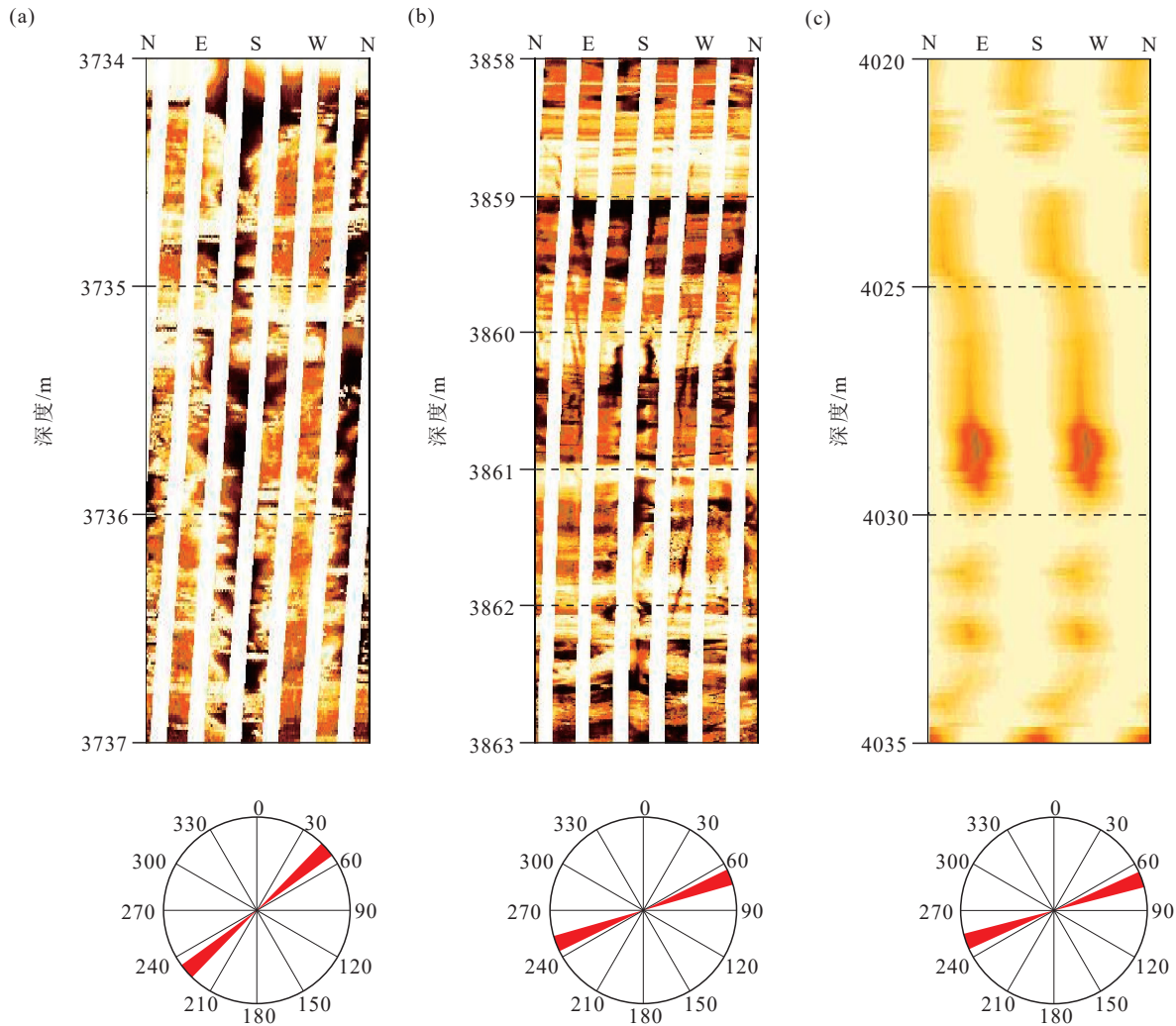


图5 地应力方向测井解释结果图

a—DB27井 3734~3737 m 井壁崩落指示地应力方向 $51^{\circ}\pm 5^{\circ}$; b—DB23井 3858~3863 m 诱导缝指示地应力方向 $68^{\circ}\pm 5^{\circ}$; c—DB23井 4020~4035 m 偶极声波各向异性图像指示地应力方向 $69^{\circ}\pm 5^{\circ}$

Fig.5 Interpretation result diagram of geostress direction logging

a—Well DB27 3734~3737m wall collapse indicates the direction of ground stress $51^{\circ}\pm 5^{\circ}$; b—Well DB23 3858~3863 m induced joints indicative of ground stress direction $68^{\circ}\pm 5^{\circ}$; c—Well DB23 4020~4035 m dipole acoustic anisotropy images indicate $69^{\circ}\pm 5^{\circ}$ geostress direction

5 讨论

5.1 地应力场大小分布特征研究

地应力状态影响因素众多,不同构造区的应力扰动主控因素不尽相同。针对定北地区而言,复杂断裂带对地应力的扰动作用十分显著。从地应力大小模拟结果(图8)来看,定北地区太2段水平最大主应力普遍在 64 MPa 以上,水平最小主应力普遍在 56 MPa 以上,水平差应力普遍在 3~12 MPa 以内。由应力分布来看,区内地应力场大小变化频繁。在断裂带内部,应力释放现象明显,三向应力

均急剧减小,并且最小主应力的应力释放程度相对最高。断裂内部水平最小主应力平均为 42 MPa,降幅达 25% 左右。而在断裂带附近,三向应力值相对较低,水平差应力值相对较高,其应力扰动程度与断裂部位、断裂规模、断裂成因等因素有关。

在仅考虑单一断裂影响下,断裂中部扰动相对较弱,靠近断裂端部或转折端时,应力扰动变强。该部位的差应力值达到最高,平均在 12 MPa 左右,属于强应力扰动区。此外,与分支断裂相比,哈巴湖主断裂附近的应力扰动范围相对较大。单一断裂的应力扰动规律较为普遍,在不同地区皆有类似的

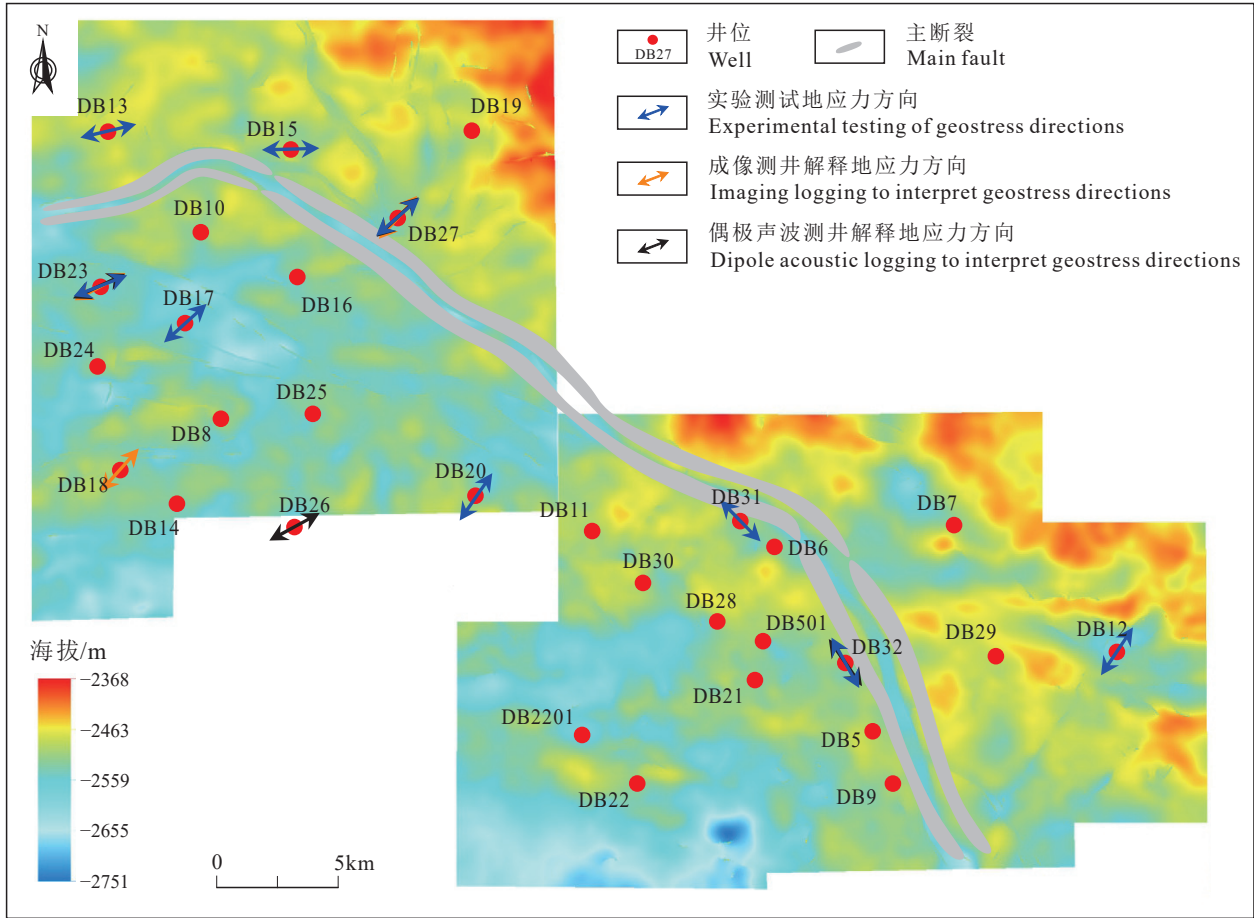


图 6 定北地区上古生界单井地应力方向分布图(底图为太 2 段底部构造图)

Fig.6 Distribution map of geostress direction of Upper Paleozoic single well in Dingbei area (the base map is the bottom structural map of Tai 2 member)

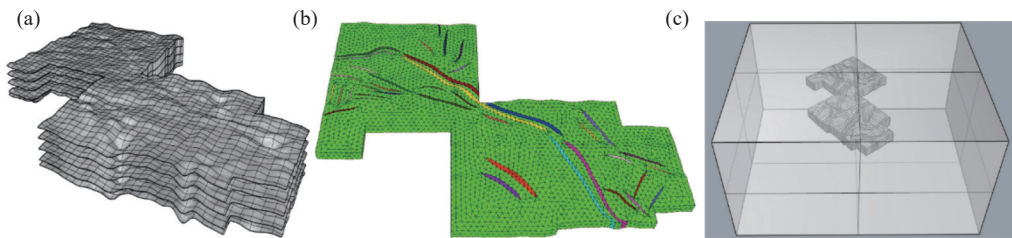


图 7 研究区地质模型图

a—小层层面; b—断层模型网格剖分图; c—加边界的地质模型

Fig.7 Geological model map of the study area

a—Plane of stratum minor; b—Fault model grid sections; c—Geological model with boundary

表 3 定北地区太 2 段现今地应力大小模拟结果及误差分析

Table 3 Simulation results and error analysis of current geostress in Tai 2 member of Dingbei area

井号	σ_H /MPa			σ_V /MPa			σ_3 /MPa			$(\sigma_H - \sigma_n)$ /MPa		
	测量值	模拟值	误差值	测量值	模拟值	误差值	测量值	模拟值	误差值	测量值	模拟值	误差值
DB13	73.32	72.00	-1.32	56.74	58.00	1.26	82.76	92.00	9.24	16.58	14.00	-2.58
DB17	74.33	70.00	-4.33	65.26	60.00	-5.26	95.68	95.00	-0.68	9.07	10.00	0.93
DB23	63.92	66.00	2.08	55.22	54.00	-1.22	97.00	96.00	-1.00	8.70	12.00	3.30
DB27	70.91	62.00	-8.91	64.46	54.00	-10.46	92.33	85.00	-7.33	6.45	8.00	1.55

表 4 定北地区太 2 段现今地应力方向模拟结果及误差分析
Table 4 Simulation results and error analysis of current geostress direction of Tai 2 member in Dingbei area

井号	实测手段	实测方向	模拟方向	差值/(°)
DB13	波速各向异性+古地磁	N76.73°E	N64.00°E	-12.73
DB17	波速各向异性+古地磁	N48.05°E	N55.00°E	6.95
DB23	波速各向异性+古地磁	N68.90°E	N75.00°E	6.10
DB27	波速各向异性+古地磁	N49.13°E	N106.00°E	56.87
DB18	成像测井	N42.00°E	N50.00°E	8.00
DB26	偶极声波	N61.50°E	N64.00°E	2.50

特征(Li et al., 2014)。但在实际研究过程中,断裂往往呈断裂带形式发育,应力扰动受到多条断裂的共同影响(李静等, 2021)。在断裂组合内部及断裂交汇部位,应力扰动作用较为复杂,扰动范围异常增大。

此外,在系统梳理定北地区断裂体系特征的基础上,笔者认为研究区内主要发育两种成因的断裂。其中以哈巴湖主断裂为典型,包括其两侧的北大池及柳杨堡断裂带,断裂形成受到了岩溶塌陷与

构造挤压作用的双重影响,属于溶塌型断裂带。而其余断裂带没有受到岩溶作用影响,属于正常构造挤压型断裂带。根据多源数据综合显示,溶塌型断裂带区域三向应力相对较低,其水平最小主应力平均在 59.29 MPa,较非断裂带区域和挤压型断裂带区域其水平最小主应力平均值分别降低了 5.94 MPa 和 2.26 MPa。

为进一步揭示溶塌型断裂带对地应力大小的扰动机制,本文从影响机理角度对其进行了初步的探讨及分析。断裂带主要由中部的滑动破碎带及两侧的诱导裂缝带组成,向外逐渐过渡为正常的围岩(陈伟等, 2010)。由于断裂带内部不同结构单元的物质组成和裂缝发育程度等存在一定差异,造成其物性及岩石力学性质的差异,从而导致断裂带及其附近地应力场的变化(徐珂等, 2019)。断裂破碎程度会直接影响断裂内部地应力状态的波动,对应

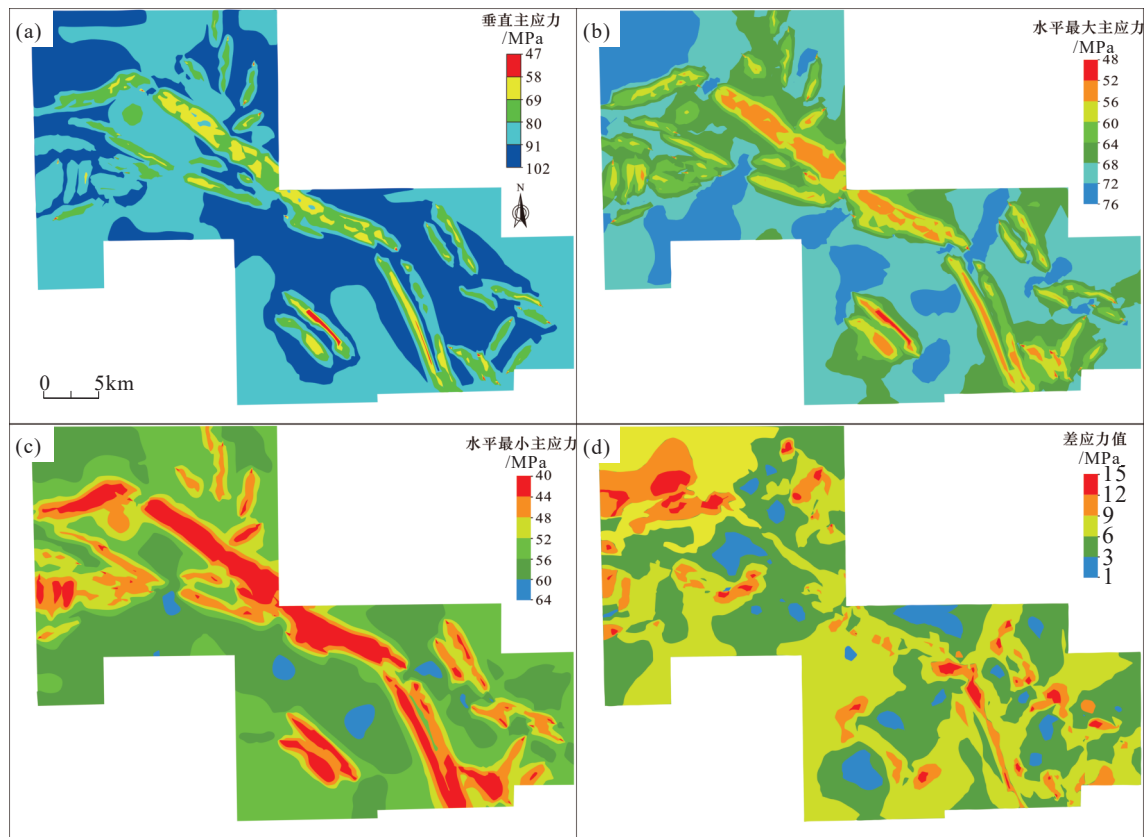


图 8 定北地区太二段主应力和差应力分布模拟图

a—垂直主应力分布图; b—水平最大主应力分布图; c—水平最小主应力分布图; d—差应力分布图

Fig. 8 Simulation diagram of principal stress and differential stress distribution of Tai-2 member in Dingbei area

a—Vertical principal stress distribution; b—Horizontal maximum principal stress distribution; c—Horizontal minimum principal stress distribution; d—Differential stress distribution

力扰动程度具有重要影响(Fu et al., 2023)。

根据岩心观察及测井资料显示,定北地区马家沟组以白云岩和灰岩为主,发育大量溶孔、溶洞,属于岩溶储层(图 9a、b)。岩溶作用对后期地层及断裂影响较大,在岩溶垮塌边缘容易形成天然裂缝(张冲, 2015; Liu et al., 2022),岩溶垮塌较为严重时还可能进一步形成溶塌型断裂。裂缝统计结果也进一步验证了这一现象,定北地区太二段裂缝集中发育于哈巴湖、北大池和柳杨堡等溶塌区,裂缝密度超过 0.62 条/m,岩心上可见其典型裂缝照片(图 9c、d)。岩溶作用产生的天然裂缝在一定程度上增大了岩石破碎程度,导致了溶塌型断裂带及其附近岩石破碎程度高,应力释放较强,进而导致该区的三向应力较低。而构造挤压型断裂带区域较非断裂带区域岩石破碎程度中等,三向应力值介于溶塌区与非断裂带区中间。基于上述分析,本文初步建立了定北地区不同成因断裂带应力扰动模式图(图 10)。

5.2 地应力场方向扰动机制研究

定北地区断裂带广泛发育,地应力场方向变化频繁,明确其地应力方向分布特征对后续井网部署至关重要。从地应力方向模拟结果来看,定北地区太二段区域主应力场方向为 N35°E~N45°E。断裂对地应力方向的扰动作用十分显著,在断裂附近地应力方向发生不同程度地偏转,在断裂端部、断

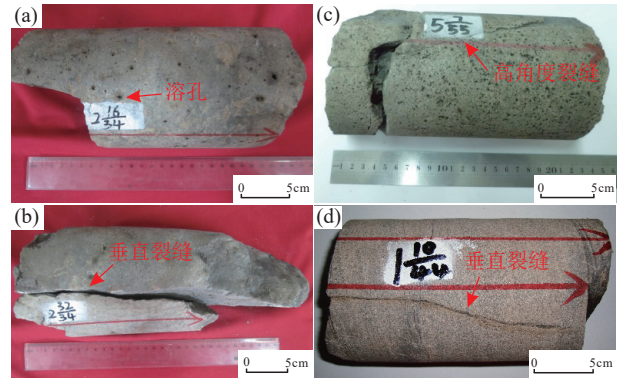


图 9 定北地区岩心照片

a—DB18 井马家沟组 4008.56~4008.88 m, 灰色灰质白云岩, 见溶孔; b—DB18 井马家沟组 4012.08~4012.36 m, 灰色白云岩, 见垂直裂缝; c—DB16 井太 2 段 3842.75~3842.87 m, 浅灰色中砂岩, 见高角度裂缝; d—DB14 井太 2 段 3905.66~3905.83 m, 浅灰色细砂岩, 见垂直裂缝

Fig.9 Core photos in Dingbei area

a—Well DB18 Majiagou Formation 4008.56~4008.88 m, gray gray dolomite, see solution hole; b—Well DB18 Majiagou Formation 4012.08~4012.36 m, gray dolomite, see vertical cracks; c—Well DB16 Tai 2 section 3842.75~3842.87 m, light gray medium sandstone, see high angle cracks; d—Well DB14 Tai 2 section 3905.66~3905.83 m, light gray fine sandstone, see vertical cracks

转折部位、平行断裂中部等处应力方向扰动程度相对较大。不同形态断裂对地应力方向的扰动特征存在差异,直线型断裂对断裂周围产生均匀扰动,断裂两端会产生应力方向集中;弧线型断裂在弧内部会产生应力集中式偏转,弧外部会产生较为平缓

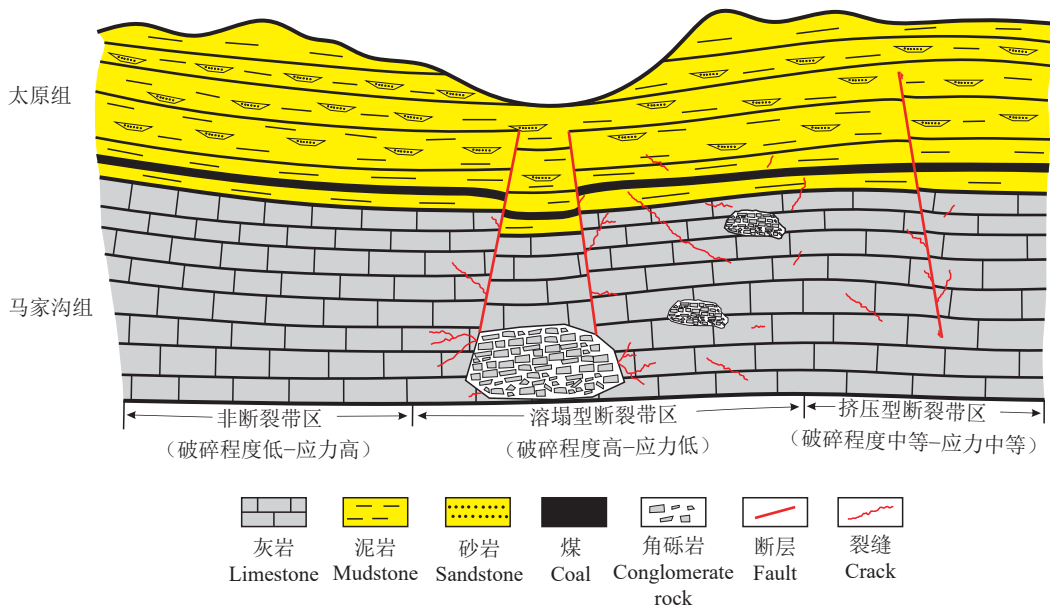


图 10 不同成因断裂带应力扰动模式图

Fig.10 Stress disturbance pattern diagram of fault zones with different genesis

式偏转。从上述结果来看,断裂对地应力大小及方向的扰动特征具有相似规律,但值得注意的是,断裂对地应力方向的扰动范围相比于地应力大小更为广泛。以哈巴湖主断裂为例,其水平最小主应力扰动范围为 1400 m,但地应力方向扰动范围却达到

了 2724 m(图 11)。

为便于进一步研究不同类型断裂带引起的地应力方向扰动范围,将模拟结果中地应力方向偏离区域主应力场方向 5°以上的区域定为地应力扰动带,据此绘制了地应力扰动带平面分布图(图 12)。

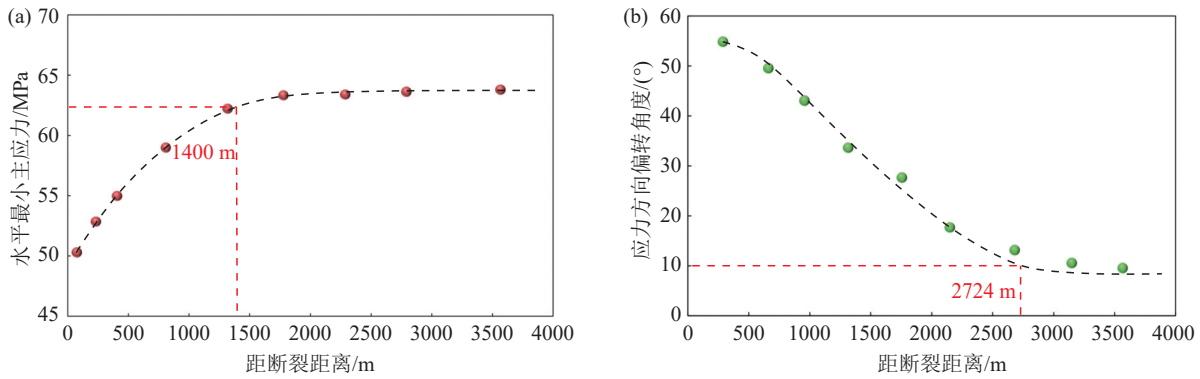


图 11 哈巴湖主断裂附近地应力扰动范围(测线 L 位置见图 12)

a—水平最小主应力扰动范围;b—地应力方向扰动范围(其中应力偏转角度是指地应力方向与 N40°E 方向的夹角)

Fig.11 Disturbance range of geostress near Habahu main fault (see Fig.12 for the position of survey line L)

a—Disturbance range of horizontal minimum principal stress; b—Disturbance Range of geostress direction (where the angle of stress deflection is the angle between the direction of geostress and the direction of N40°E)

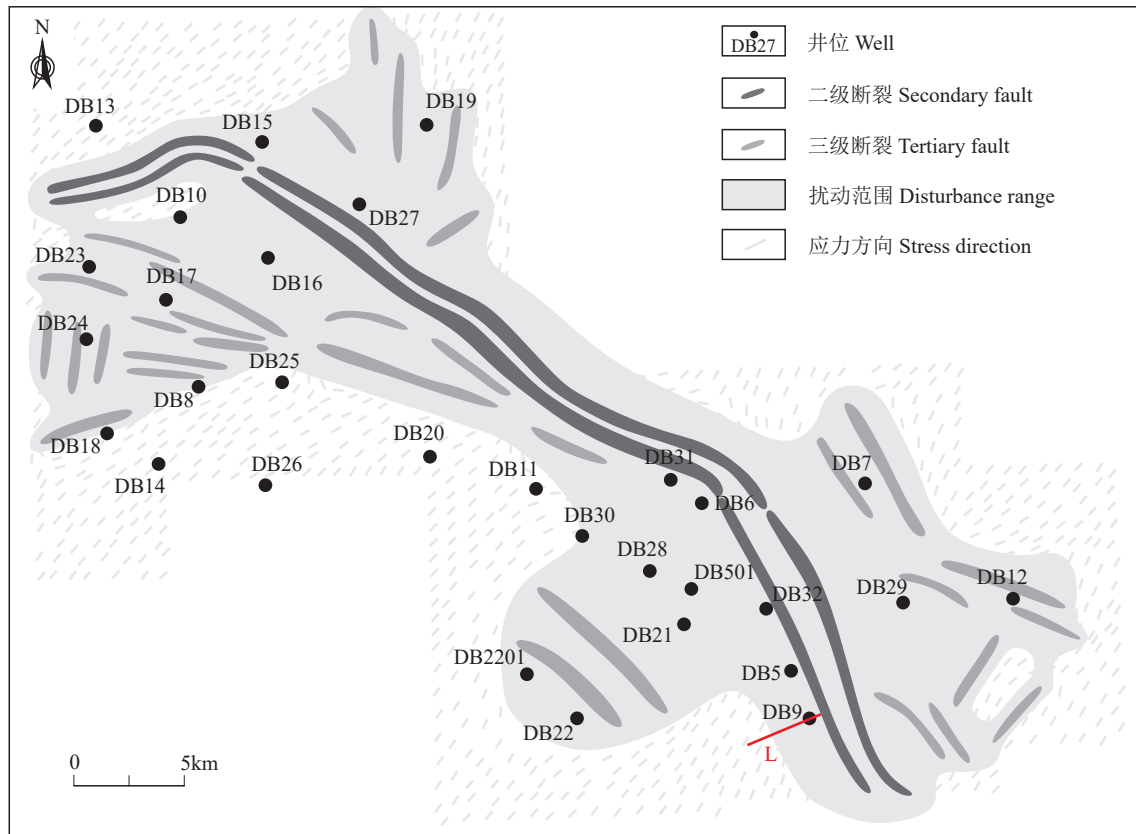


图 12 定北地区地应力扰动带平面分布图(其他图例见图 1)

Fig.12 Plane distribution map of ground stress disturbance zone in Dingbei area (other legends are shown in Fig.1)

结果显示, 断裂级别与断裂走向对地应力方向扰动范围的影响较大。在断裂级别相同的情况下, 当断裂走向与区域水平最大主应力方向(N40°E)平行时, 其扰动范围几乎不存在, 而随着两者夹角的增大, 其扰动范围也在不断扩大, 在夹角达到 90°时, 断裂对应力方向的扰动范围达到最大。而在相同走向的情况下, 断裂级别越大, 其扰动范围也有所增大。此外, 在断裂带内部区域, 应力方向受到多条断裂的共同影响, 扰动范围异常增大。

基于上述认识, 为进一步量化评价不同类型断裂引起的地应力方向扰动范围, 针对单一断裂影响下的扰动宽度(W)、断裂长度(L)、断距(D)、断裂走向与区域主应力场方向的夹角(θ)进行了统计, 其中扰动宽度是指断裂中部单侧方向上的扰动带宽度。在此基础上, 将断裂各参数与扰动宽度分别

进行拟合。前人研究认为 D/L 与 W/L 具有对数式的正相关关系(翁剑桥等, 2020), 可用来预测扰动宽度, 但根据图 13a 可知, 该预测模型并不适用于定北地区。因此, 根据工区实际情况(图 13b、c、d), 本次研究引入了变量 θ 的影响并剔除了非重要变量 D , 通过非线性回归分析, 构建了一套针对定北地区断裂引起的地应力扰动宽度预测模型(公式 4)以及三维计算图版(图 14), 其拟合相关系数达到了 0.88。利用该模型对研究区各断裂的扰动宽度进行计算, 其计算结果与模拟结果平均吻合率达到了 85% 以上, 可有效用来指导地应力方向扰动范围的预测工作。

$$W = -4390.88 + 585.7808 \times \ln L + 18.2207 \times \theta \quad (4)$$

$(2 \leq L, 0 \leq \theta \leq 90^\circ)$

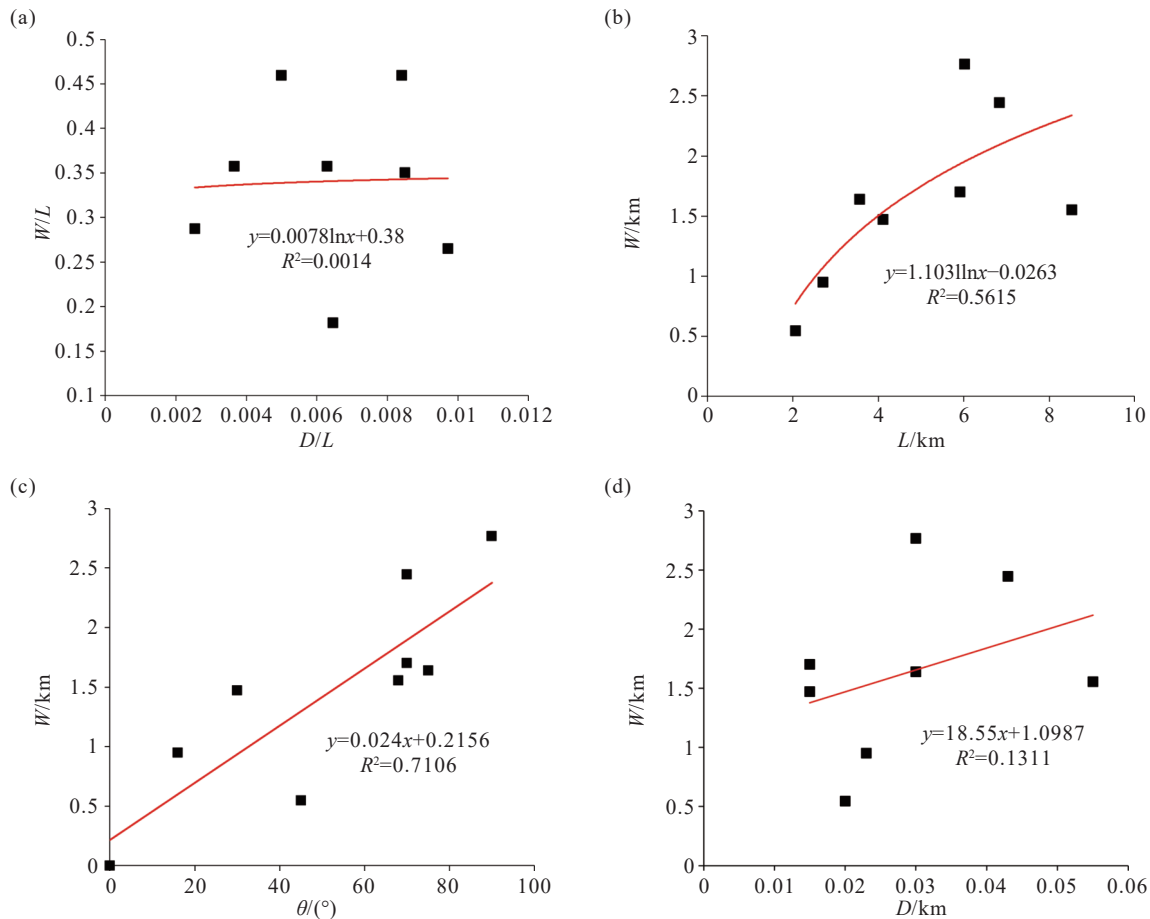


图 13 扰动宽度影响因素分析

a—断裂面形态; b—断裂长度; c—断裂走向与区域主应力场方向的夹角; d—断距

Fig.13 Analysis of influencing factors of disturbance width

a—Fault surface morphology; b—Fault length; c—Angle between the fault strike and the direction of the regional main stress field; d—Separation

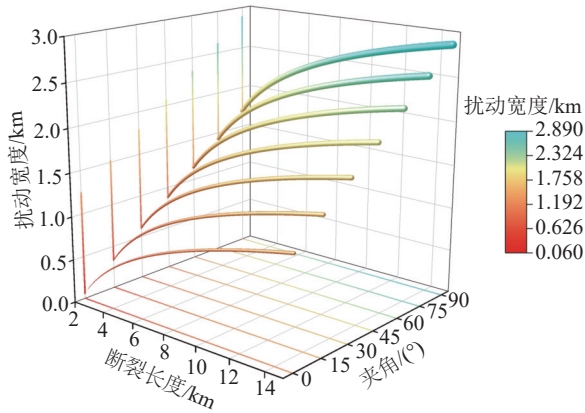


图 14 扰动宽度三维计算图版

Fig.14 Three-dimensional calculation chart of disturbance width

6 结 论

(1)鄂尔多斯盆地定北地区致密砂岩储层三向应力具备垂向主应力>最大主应力>最小主应力的特征,区内水平最大主应力普遍在 64 MPa 以上,水平最小主应力普遍在 56 MPa 以上,水平应力差普遍在 3~12 MPa 以内,区域地应力场方向主要为 N35°E~N45°E。

(2)定北地区太 2 段地应力场大小主要受断裂带控制。在断裂带内部及其附近,三向应力值较低,水平差应力值相对较高,且在断裂端点和断裂转折部位差应力值达到最高。当多条断裂共同影响时,应力扰动程度及范围明显增大。不同成因断裂带区域地应力大小有所差异,具体表现为溶塌型断裂带区域<挤压型断裂带区域<非断裂带区域。

(3)储层地应力方向主要受区域主应力场方向和断裂带控制,不同类型断裂带引起的地应力方向扰动范围及扰动程度存在差异。在断裂端部、断裂转折部位、平行断裂中部等处应力方向扰动程度相对较大;而扰动宽度 W 主要受断裂走向与区域最大主应力方向的夹角 θ 以及断裂长度 L 所影响,三者具有较好的非线性相关关系,可用夹角 θ 和断裂长度 L 来预测扰动宽度 W 。

References

Chen Shijie, Xiao Ming, Chen Juntao, Ren Junqing. 2020. Disturbance law of faults to in-situ stress field directions and its inversion analysis method[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(7): 1434-1444 (in Chinese with English abstract).

Chen Wei, Wu Zhiping, Hou feng, Kong Fei. 2010. Internal structures of fault zones and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 31(5): 774-780 (in Chinese with English abstract).

Fu H L, Xu W, Wu Y M. 2023. Study on the distribution law of crustal stress in fault fracture area[J]. *Applied Sciences*, 13(13): 7678.

He Jianhua, Cao Feng, Deng Hucheng, Wang Yuanyuan, Li Yong, Xu Qinglong. 2022. Evaluation of in-situ stress in dense sandstone reservoirs in the second member of Xujiahe Formation of the HC area of the Sichuan Basin and its application to dense sandstone gas development[J]. *Geology in China*, 50(4): 1107-1121 (in Chinese with English abstract).

Huang Tao, Liu Yan, He Jianhua, Ye Tairan, Deng Hucheng, Li Ruixue, Li Kesai, Zhang Jiawei. 2023. Evaluation method and engineering application of in-situ stress of deep tight sandstone reservoir in the second member of Xujiahe Formation in Xiaoquan-Fenggu area, western Sichuan[J]. *Geology in China*, 51(1): 89-104 (in Chinese with English abstract).

Huang Rongzun, Zhuang Jinjiang. 1986. A new method for predicting formation fracture pressure[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, (3): 1-14 (in Chinese).

Jia Ailin, Wei Yunsheng, Guo Zhi, Wang Guoting, Meng Dewei, Huang Suqi. 2022. Development status and prospect of tight sandstone gas in China[J]. *Natural Gas Industry*, 42(1): 83-92 (in Chinese with English abstract).

Jia Xiaoliang, Cui Hongqing, Zhang Zimin. 2010. Numerical simulation of geostatic stress influencing factor at the end of fault[J]. *Coal Geology & Exploration*, 38(4): 47-51 (in Chinese with English abstract).

Li Jing, Liu Chen, Liu Huimin, Xu Yanchao, Xie Li, Huang Guipeng. 2021. Distribution and influencing factors of in-situ in complex fault tectonic region[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 50(1): 123-137 (in Chinese with English abstract).

Li Tang, Fu Meiyuan, Deng Hucheng, Li Xiaohui, Wang Kunyu, Ran Hui. 2023. Diagenetic facies and distribution of tight sandstone reservoirs containing volcanic ash: A case study of the Upper Paleozoic in Dingbei area[J]. *Natural Gas Geoscience*, 34(10): 1768-1779 (in Chinese with English abstract).

Li Y J, Chen L W, Tan P, Li H. 2014. Lower crustal flow and its relation to the surface deformation and stress distribution in western Sichuan region, China[J]. *Journal of Earth Science*, 25(4): 630-637.

Liu Hongping. 2017. Field Development Geologic Evaluation of Tight Gas Sandstones in Taiyuan Formation, Dingbei Area, Ordos Basin, China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1-204 (in Chinese with English abstract).

Liu Yingjun, Zhu Haiyan, Tang Xuanhe, Sun Hansen, Zhang Binhai Chen Zhengrong. 2022. Four-dimensional in-situ stress model of CBM reservoirs based on geology-engineering integration[J]. *Natural Gas Industry*, 42(2): 82-92 (in Chinese with English abstract).

Liu Z Y, Zhao H F, Shi H W. 2022. Experimental study on stress

- monitoring in fractured-vuggy carbonate reservoirs before and after fracturing[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 218: 110958.
- Liu Zhongchun, Lü Xinrui, Li Yukun, Zhang Hui. 2016. Mechanism of faults acting on in-situ stress field direction[J]. *Petroleum and Natural Gas Geology*, 37(3): 387–393 (in Chinese with English abstract).
- Luo Jianqiang, He Zhongming. 2008. Tectonic evolution and oil-gas distributoon in the mesozoic Ordos Basin[J]. *Geology and Resources*, 17(2): 135–138 (in Chinese with English abstract).
- Lü Jing. 2017. Continental Facies Shale Formation Rock Mechanical Characteristics and Stress Field Evaluation Technique[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–164 (in Chinese with English abstract).
- Qi Hongwei, Shen Jie. 2023. Fracture development characteristics and influencing factors of Upper Paleozoic in Dingbei area[J]. *World Petroleum Industry*, 30(4): 48–54 (in Chinese with English abstract).
- Shan Yuming, Zhou Wen, Tong Kaijun, Xie Runcheng. 2010. Application of synthetic evaluation for present ground stress field in deep formation of XC gas field in western Sichuan[J]. *Mineralogy and Petrology*, 30(3): 69–76 (in Chinese with English abstract).
- Sun Lijian, Zhu Yuanqing, Yang Guangliang, Yin Jiyao. 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 with English abstract).
- Su Shengrui. 2001. The Effect of Fractures on Rock Stresses and Its Significance in Geological Engineering[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–153 (in Chinese with English abstract).
- Su Shengrui, Wang Shitian, Zhu Hehua. 2022. The effect of faults on geostress fields[C]// China Science and Technology Press, 662–667 (in Chinese with English abstract).
- Weng Jianqiao, Zeng Lianbo, Lü Wenya, Liu Qi, Zu Kewei. 2020. Width of stress disturbed zone near fault and its influencing factors[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(1): 39–47 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xiaoqi, Ni Chunhua, Chen Yingbin, Zhu Jianhui, Li Kuang, Zeng Huasheng. 2019. Source of the Upper Paleozoic natural gas in Dingbei area in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 30(6): 819–827 (in Chinese with English abstract).
- Xian Chenggang. 2018. Shale gas geological engineering integrated modeling and numerical simulation: Present conditions, challenges and opportunities[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 37(5): 24–34 (in Chinese with English abstract).
- Xu Ke, Dai Junsheng, Shang Lin, Fang Lu, Feng Jianwei, Du He. 2019. Characteristics and influencing factors of in-situ stress of Nanpu sag, Bohai Bay basin, China[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 48(3): 570–583 (in Chinese with English abstract).
- Xu Ke, Tian Jun, Yang Haijun, Zhang Hui, Wang Zhimin, Yuan Fang, Wang Haiying. 2020. Prediction of current in-situ stress filed and its application of deeply buried tight sandstone reservoir: A case study of Keshen 10 gas reservoir in Kelasu structural belt, Tarim Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 49(4): 708–720 (in Chinese with English abstract).
- Xu Ke, Zhang Hui, Liu Xinyu, Wang Zhimin, Lai Shujun. 2022. Current in-situ stress characteristics of deep fractured reservoirs in Kuqa Depression and its guiding significance to natural gas exploration and development[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 29(2): 34–45 (in Chinese with English abstract).
- Xu Liming, Zhou Lifa, Zhang Yikai, Dang Ben. 2006. Characteristics and tectonic setting of tectono-stress field of Ordos Basin[J]. *Tectonics and Mineralogy*, 30(4): 455–462 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chong. 2015. The Fracture Characteristics, Causes and Distribution Evaluation of the Ordovician Karst Reservoir in Daniudi Gas Field[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–103 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Lu Tao. 2019. Control effect of fault system on gas-water distribution in Dingbei area[J]. *Science and Technology & Innovation*, (16): 81–82 (in Chinese).
- Zhang Xiaojun, He Jianhua, Xu Qinglong, Ye Tairan, Deng Hucheng, Xu Zhengqi, Cao Feng, Yuan Yunqi. 2022. Distribution characteristics and disturbance mechanism of presnt in-situ stress field in the second member of Xujiane formation in Hechuan area[J]. *Mineral Rock*, 42(4): 71–82 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Liao Changzhen. 2006. Transition of the Late Mesozoic-Cenozoic tectonic regimes and modification of the Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 33(1): 28–40 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ronghua. 2021. Types and models of gas accumulation in Upper Paleozoic in Dingbei area[J]. *Journal of Hebei GEO University*, 44(3): 37–40 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuting, Duan Dong, Yang Yao, Fang Chaohe, Qu Xiaoming, Kang Zhiqin. 2015. Numerical simulation on influence factors of ground stress at the end of fault[J]. *Safety in Coal Mines*, 46(10): 210–213 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈世杰, 肖明, 陈俊涛, 任俊卿. 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.
- 陈伟, 吴智平, 侯峰, 孔菲. 2010. 断裂带内部结构特征及其与油气运聚关系[J]. *石油学报*, 31(5): 774–780.
- 何建华, 曹峰, 邓虎成, 王园园, 李勇, 徐庆龙. 2022. 四川盆地 HC 地区须二段致密砂岩储层地应力评价及其在致密气开发中的应用[J]. *中国地质*, 50(4): 1107–1121.
- 黄滔, 刘岩, 何建华, 叶泰然, 邓虎成, 李瑞雪, 李可赛, 张家维. 2023. 川西孝泉-丰谷地区须二段深层致密砂岩储层地应力大小评价方法及其工程应用[J]. *中国地质*, 51(1): 89–104.

- 黄荣樽, 庄锦江. 1986. 一种新的地层破裂压力预测方法[J]. 石油钻采工艺, (3): 1-14.
- 贾爱林, 位云生, 郭智, 王国亭, 孟德伟, 黄苏琦. 2022. 中国致密砂岩气开发现状与前景展望[J]. 天然气工业, 42(1): 83-92.
- 贾晓亮, 崔洪庆, 张子敏. 2010. 断层端部地应力影响因素数值分析[J]. 煤田地质与勘探, 38(4): 47-51.
- 李静, 刘晨, 刘惠民, 许艳超, 解丽, 黄贵朋. 2021. 复杂断层构造区地应力分布规律及其影响因素[J]. 中国矿业大学学报, 50(1): 123-137.
- 李锐, 伏美燕, 邓虎成, 李晓慧, 王琨瑜, 冉辉. 2023. 含火山灰的致密砂岩储层成岩相及其分布——以定北地区上古生界为例[J]. 天然气地球科学, 34(10): 1768-1779.
- 刘洪平. 2017. 鄂尔多斯盆地定北地区太原组致密砂岩气层开发地质评价[D]. 武汉: 中国地质大学, 1-204.
- 刘英君, 朱海燕, 唐焯赫, 孙晗森, 张滨海, 陈崢嵘. 2022. 基于地质工程一体化的煤层气储层四维地应力演化模型及规律[J]. 天然气工业, 42(2): 82-92.
- 刘中春, 吕心瑞, 李玉坤, 张辉. 2016. 断层对地应力场方向的影响机理[J]. 石油与天然气地质, 37(3): 387-393.
- 罗建强, 何忠明. 2008. 鄂尔多斯盆地中生代构造演化特征及油气分布[J]. 地质与资源, 17(2): 135-138.
- 吕晶. 2017. 陆相泥页岩地层岩石力学特征及地应力场评价技术[D]. 成都: 成都理工大学, 1-164.
- 齐宏伟, 沈杰. 2023. 定北地区上古生界裂缝发育特征及影响因素[J]. 世界石油工业, 30(4): 48-54.
- 单钰铭, 周文, 童凯军, 谢润成. 2010. 现今地应力场特征综合评价技术在川西 XC 气田深层中的应用[J]. 矿物岩石, 30(3): 69-76.
- 孙礼健, 朱元清, 杨光亮, 尹继尧. 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.
- 苏生瑞. 2001. 断裂构造对地应力场的影响及其工程意义[D]. 成都: 成都理工学院, 1-153.
- 苏生瑞, 王士天, 朱合华. 2002. 断裂对地应力场影响的研究[C]//岩石力学新进展与西部开发中的岩土工程问题——中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集: 中国科学技术出版社, 662-667.
- 翁剑桥, 曾联波, 吕文雅, 刘奇, 祖克威. 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.
- 吴小奇, 倪春华, 陈迎宾, 朱建辉, 李颀, 曾华盛. 2019. 鄂尔多斯盆地定北地区上古生界天然气来源[J]. 天然气地球科学, 30(6): 819-827.
- 鲜成钢. 2018. 页岩气地质工程一体化建模及数值模拟: 现状、挑战和机遇[J]. 石油科技论坛, 37(5): 24-34.
- 徐珂, 戴俊生, 商琳, 房璐, 冯建伟, 杜赫. 2019. 南堡凹陷现今地应力特征及影响因素[J]. 中国矿业大学学报, 48(3): 570-583.
- 徐珂, 田军, 杨海军, 张辉, 王志民, 袁芳, 王海应. 2020. 深层致密砂岩储层现今地应力场预测及应用——以塔里木盆地克拉苏构造带克深 10 气藏为例[J]. 中国矿业大学学报, 49(4): 708-720.
- 徐珂, 张辉, 刘新宇, 王志民, 来姝君. 2022. 库车坳陷深层裂缝性储层现今地应力特征及其对天然气勘探开发的指导意义[J]. 油气地质与采收率, 29(2): 34-45.
- 徐黎明, 周立发, 张义楷, 党彝. 2006. 鄂尔多斯盆地构造应力场特征及其构造背景[J]. 大地构造与成矿学, 30(4): 455-462.
- 张冲. 2015. 大牛地气田奥陶系岩溶储层裂缝特征、成因及分布评价[D]. 成都: 成都理工大学, 1-103.
- 张威, 卢涛. 2019. 定北地区断裂系统对气水分布的控制作用[J]. 科技与创新, (16): 81-82.
- 张小菊, 何建华, 徐庆龙, 叶泰然, 邓虎成, 徐争启, 曹峰, 阮韵琪. 2022. 合川地区须二段现今地应力场分布特征与扰动机制研究[J]. 矿物岩石, 42(4): 71-82.
- 张岳桥, 廖昌珍. 2006. 晚中生代—新生代构造体制转换与鄂尔多斯盆地改造[J]. 中国地质, 33(1): 28-40.
- 赵荣华. 2021. 定北地区上古生界天然气成藏类型及模式[J]. 河北地质大学学报, 44(3): 37-40.
- 赵钰挺, 段东, 杨瑶, 方朝合, 曲晓明, 康志勤. 2015. 断层端部地应力分布规律影响因素的数值模拟[J]. 煤矿安全, 46(10): 210-213.