

引用格式: 赵进雍, 冀冬生, 吴见, 等, 2022. 准噶尔盆地四棵树凹陷侏罗系—白垩系储层岩石力学参数研究 [J]. 地质力学学报, 28 (4): 573–582. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021158

Citation: ZHAO J Y, JI D S, WU J, et al., 2022. Research on rock mechanics parameters of the Jurassic-Cretaceous reservoir in the Sikeshu sag, Junggar Basin, China [J]. Journal of Geomechanics, 28 (4): 573–582. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021158

准噶尔盆地四棵树凹陷侏罗系—白垩系储层岩石力学参数研究

赵进雍¹, 冀冬生¹, 吴见², 庞志超¹, 吴林^{3,4}
ZHAO Jinyong¹, JI Dongsheng¹, WU Jian², PANG Zhichao¹, WU Lin^{3,4}

1. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院地球物理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830013;

2. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100011;

3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

4. 中国地质调查局油气地质力学重点实验室, 北京 100081
1. *Geophysical Institute, Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Urumqi 830013, Xinjiang, China;*

2. *China United Coalbed Methane Corporation, Ltd, Beijing 100011, China;*

3. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

4. *Key Laboratory of Petroleum Geomechanics, China Geological Survey, Beijing 100081, China*

Research on rock mechanics parameters of the Jurassic-Cretaceous reservoir in the Sikeshu sag, Junggar Basin, China

Abstract: Structural analysis and reservoir evaluation has become increasingly important as petroleum exploration keeps making breakthroughs in the foreland of the southern Junggar Basin. However, the research on rock mechanical parameters which is closely related to them is rare. Based on the drilling core data, logging and seismic data of the Jurassic-Cretaceous in the Sikeshu sag, using the rock mechanics experiment and three-dimensional rock mechanics inversion, we defined the rock mechanics parameters in this study. The dynamic and static Young’s modulus shows a positively correlated linear relationship with the Poisson’s ratio. The rock mechanical parameters are controlled by the lithological variation. The lower K_1q and J_2t , J_2x , J_1b Formations have a higher Young’s modulus and a lower Poisson’s ratio, while the upper K_1q and J_1s Formations have a lower Young’s modulus and a higher Poisson’s ratio. When the Young’s modulus increases and the Poisson’s ratio decreases, the rock compressive strength increases. The inversion results of rock mechanical parameters in the Gaoquan area show that the higher the Young’s modulus and the lower the Poisson’s ratio, the higher the fracture index. The fracture index of the upper K_1q and J_1s Formations is lower than 0.4, indicating poor fracture development and petroleum display; while the fracture index of the lower K_1q and J_2t , J_2x , J_1b Formations is higher than 0.4, suggesting good fracture development and petroleum display. Therefore, the research results are instructive for the deep petroleum exploration in the study area.

Keywords: rock mechanical parameters; fractures; Jurassic; Cretaceous; Junggar Basin; North Tianshan

摘 要: 随着淮南前陆中生界油气勘探持续突破, 构造解析与储层评价越来越重要, 与二者密切相关的岩石力学参数研究却鲜有涉及。针对淮南前陆四棵树凹陷侏罗系—白垩系岩芯、测井、地震资料现状,

基金项目: 国家自然科学基金 (41902158)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41902158)

第一作者简介: 赵进雍 (1985—), 男, 硕士, 工程师, 构造地质学专业。E-mail: zhao@petrochina.com.cn

通讯作者: 吴林 (1987—), 男, 博士, 高级工程师, 构造地质学专业, 从事含油气盆地构造解析研究。E-mail: wulin50@mail.egs.gov.cn

收稿日期: 2021-11-17; **修回日期:** 2022-03-30; **责任编辑:** 范二平

结合三轴岩石力学实验和三维岩石力学反演方法,明确研究区岩石力学参数特征。结果表明:研究区储层动、静态杨氏模量和泊松比均呈正相关线性关系,岩石力学参数受岩性变化控制,白垩系清水河组下部与侏罗系头屯河组、西山窑组、八道湾组杨氏模量较高、泊松比较低,白垩系清水河组上部、侏罗系三工河组杨氏模量较低、泊松比较高;随着杨氏模量增加、泊松比降低,岩石抗压强度增加。基于高泉地区岩石力学参数反演结果表明,杨氏模量越大、泊松比越小,裂缝发育指数越高,越容易形成裂缝。白垩系清水河组上部、侏罗系三工河组裂缝发育指数小于0.4,裂缝不发育、油气显示差;白垩系清水河组下部、侏罗系西山窑组与头屯河组裂缝发育指数大于0.4,裂缝发育、油气显示好,因此此研究成果对研究区深层油气勘探具有重要指导意义。

关键词: 岩石力学参数; 裂缝; 侏罗系; 白垩系; 准噶尔盆地; 北天山

中图分类号: TE121 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 04-0573-10

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021158

0 引言

岩石力学特征是地下储层的固有属性,是盆地构造应力模拟、钻井设计、储层压裂改造的主要依据,不但影响天然裂缝形成演化,同时控制人工裂缝的扩展分布,是油气勘探开发中的重要参数之一 (Han et al., 1986; Ward et al., 1994; Bowers, 1995; 李志明和张金珠, 1997; 黄思静等, 1999; 周文等, 2008; 丁文龙等, 2010; 归榕和万永平, 2012; 刘佳庚等, 2020; 吴林等, 2022)。目前常用的岩石力学参数主要包括弹性模量、泊松比、抗压强度、脆性指数等,主要通过实验测试或是测井数据计算两种方法获取 (Ward et al., 1994; Bowers, 1995; 归榕和万永平, 2012)。

2019年,淮南前陆四棵树凹陷高探1井在侏罗系—白垩系试油获高产,日产原油 1213 m^3 、天然气 $32.17\times 10^4\text{ m}^3$,成为淮南勘探里程碑式发现,证实侏罗系—白垩系具备形成大型油气田的巨大潜力 (杜金虎等, 2019; 何海清等, 2019; 靳军等, 2019; 杨迪生等, 2019; 徐新组等, 2020; 刘惠民等, 2020)。勘探实践表明,淮南侏罗系—白垩系油气富集高产可能与储层裂缝密切相关,急需重视储层岩石力学特征研究。然而,相关学者目前多关注构造解析及构造演化对储层的影响 (赵桂萍, 2003; 管树巍等, 2013; Han and Zhao, 2018; 高志勇等, 2020; 关旭同等, 2020; 梁则亮等, 2020; 朱明等, 2020),往往忽略了储层自身特征对构造变形的影响,尤其缺乏储层岩石力学特征与裂缝响应关系分析,影响研究区目的层整体评价 (吴林等, 2022)。文中系统分析四棵树地

区侏罗系—白垩系碎屑岩岩石力学参数,明确岩石力学参数分布特征,探讨岩石力学参数的地质意义,为油气勘探评价提供重要支撑。

1 地质概况

四棵树凹陷位于准噶尔盆地南缘西部 (图1a),南部为北天山构造体系,西北部和北部为扎伊尔山构造体系,控制凹陷中新生界沉积充填 (管树巍等, 2013; Han and Zhao, 2018; 高志勇等, 2020; 梁则亮等, 2020; 朱明等, 2020)。凹陷内沉积地层向上依次为三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系、第四系,碎屑岩储层总厚度大于5000 m (况军和齐雪峰, 2006; 方世虎等, 2007; 雷德文等, 2008; 邵雨等, 2011; 孟元库等, 2012; 肖立新等, 2012; 朱文等, 2017)。随着油气勘探开发向深部推进,侏罗系与白垩系下部成为重点关注对象,包括八道湾组 (J_1b)、三工河组 (J_1s)、西山窑组 (J_2x)、头屯河组 (J_2t)、齐古组 (J_3q)、清水河组 (K_1q)、呼图壁组 (K_1h)等。受新生代以来喜马拉雅运动影响,凹陷内地层明显褶皱变形,形成艾卡构造带、高泉构造带 (管树巍等, 2013; Han and Zhao, 2018; 朱明等, 2020)。

艾卡构造带位于四棵树凹陷北部,邻近北侧车排子凸起,石油地质条件良好,已在中生界以浅实现油气商业发现,包括独山子油田、艾卡油田、西湖油田等。高泉构造带位于四棵树凹陷南部,目前已被三维地震勘探数据覆盖,多口探井揭示侏罗系—白垩系是近期油气勘探重点关注区域 (图1b)。该地区成测井资料显示,断裂附近井筒中砂岩储层裂缝发育,裂缝发育段与油气显

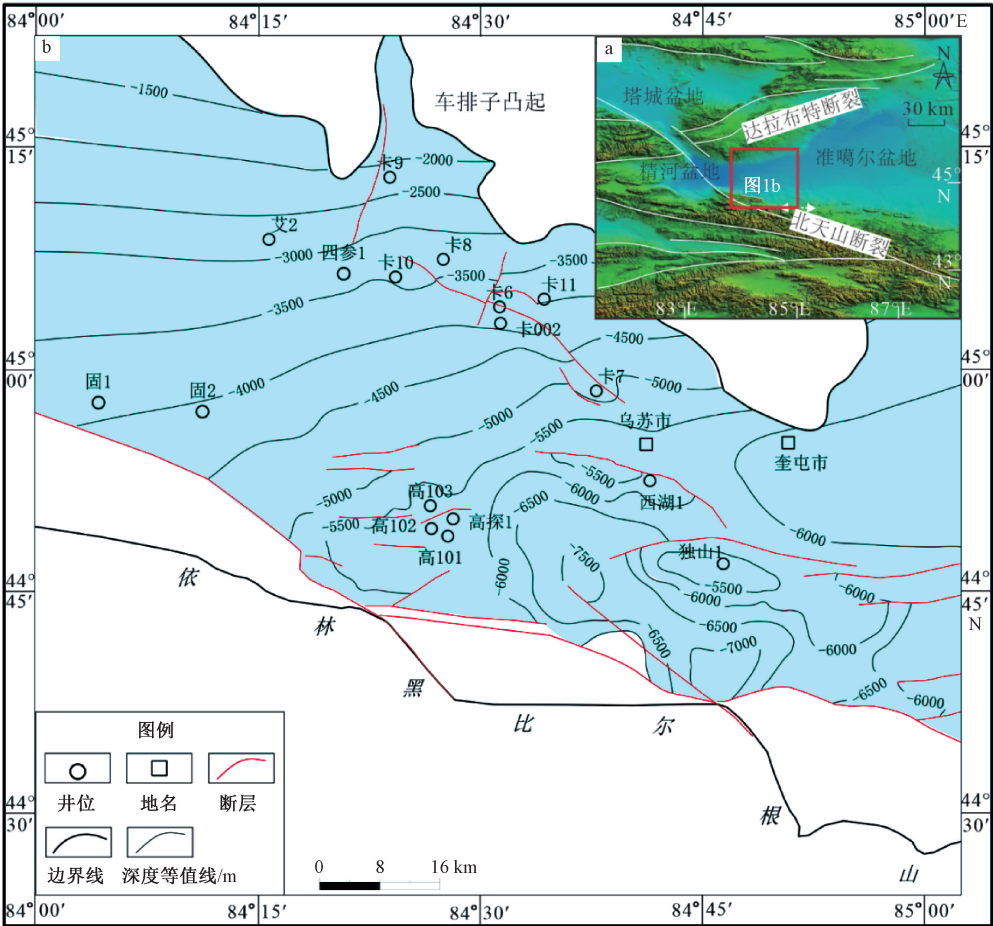


图 1 四棵树凹陷侏罗系顶面构造图
Fig. 1 Plane structure of the superface of the Jurassic in the Sikeshu sag

示段较为一致。

2 侏罗系—白垩系岩石力学参数

淮南西段四棵树地区发育巨厚碎屑岩储层，与其相关的常规岩石力学参数主要包括杨氏模量 E 、剪切模量 μ 、脆性指数 t 和泊松比 ν 等，其中杨氏模量和泊松比最为重要（李志明和张金珠，1997）。目前通常根据两种方法获取岩石力学参数：一种通过实验室岩样实测获得静态参数，一种是利用地球物理测井资料计算获得动态参数，二者存在一定差异（周宏伟等，2010；王珂等，2014）。通常需要将动态参数进行转换，获取静态参数、评价储层特征。

2.1 动态岩石力学参数

阵列声波测井可以用于识别岩性、气水层，准确提取纵、横波信息，分析杨氏模量、泊松比等岩石力学参数，估算储层孔隙度，评价有效天然裂缝

及压裂效果（李志明和张金珠，1997）。此次利用阵列声波测井数据计算动态岩石力学参数，预测杨氏模量、泊松比（Dumitrescu，2019），公式如下：

$$E_d = \frac{\rho}{\Delta t_s^2} \left(\frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_c^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_c^2} \right) \tag{1}$$

$$\nu_d = \frac{\left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)^2 - 2}{2 \left[\left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)^2 - 1 \right]} \tag{2}$$

式中： E_d 为动态杨氏模量，GPa； Δt_s 为横波时差， $\mu\text{s}/\text{m}$ ； Δt_c 为纵波时差， $\mu\text{s}/\text{m}$ ； ρ 为岩石密度， g/cm^3 ； ν_d 为动态泊松比。

根据高泉地区钻井资料情况，分析高 102 井侏罗系—白垩系砂岩的动态岩石力学参数，结果表明（图 2）， J_{2x} 、 J_{2t} 的动态杨氏模量主要分布于 40~70 GPa， K_{1q} 、 K_{1h} 的动态杨氏模量主要分布于 20~40 GPa，中侏罗统的动态杨氏模量相对高于下白垩统（图 2a）。 J_{2x} 、 J_{2t} 的动态泊松比主要分

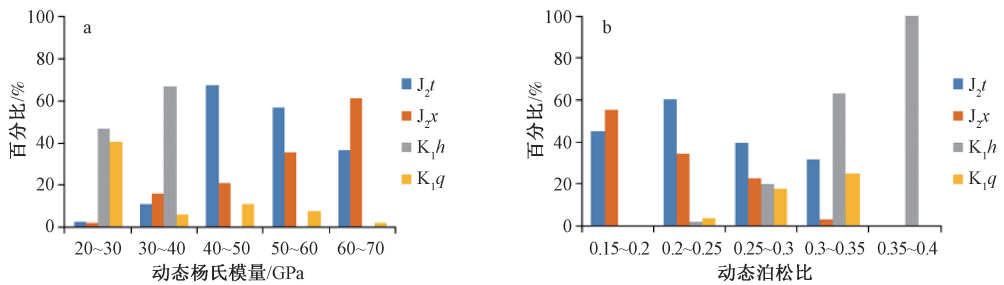


图2 高泉地区高102井动态岩石力学参数分布直方图

Fig. 2 Distribution histogram of dynamic rock mechanical parameters of the Well Gao 102 in the Gaoquan area

布于0.15~0.30, K_1q 、 K_1h 的动态泊松比主要分布于0.25~0.4, 中侏罗统的动态泊松比相对较低于下白垩统(图2b)。总体来看, 下白垩统动态杨氏模量较低、泊松比较高。

2.2 静态岩石力学参数

静态岩石力学参数主要通过砂岩样品的三轴岩石力学实验获取。此次实验在中国石油大学(北京)岩石力学实验室完成, 岩石样品在加载围压后, 通过传感器测量岩样的轴向、横向应变及轴向载荷, 直至岩样产生破坏、停止加载, 自动采集与处理后得到应力-应变曲线, 可以计算静态杨氏模量、泊松比:

$$E_s = \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta\varepsilon_a} \tag{3}$$

$$v_s = \frac{\Delta\varepsilon_r}{\Delta\varepsilon_a} \tag{4}$$

式中, E_s 为静态杨氏模量, GPa; $\Delta\sigma_a$ 为轴向应力增量, MPa; $\Delta\varepsilon_a$ 为轴向应变增量, mm; v_s 为静态泊松比; $\Delta\varepsilon_r$ 为轴向应变增量, mm; $\Delta\varepsilon_r$ 为径向应变增量, mm。

此次对四棵树凹陷岩芯样品进行了三轴岩石力学实验, 样品来自高101、高102、高泉5、独山1井, 共计28件, 其中侏罗系样品23件、白垩系样品5件, 实验结果见表1。

表1 四棵树凹陷侏罗系—白垩系致密砂岩储层动态静态岩石力学数据

Table 1 Experimental data of dynamic and static rock mechanics of the Jurassic-Cretaceous tight sandstone reservoir in the Sikeshu sag

序号	井号	层位	样品编号	动态杨氏模量/GPa	静态杨氏模量/GPa	动态泊松比	静态泊松比
1	高101	K_1q	101-1	63.51	29.52	0.25	0.20
2	高101	J_2t	101-2	47.86	22.56	0.20	0.20
3	高101	J_2t	101-3	44.37	22.78	0.23	0.20
4	高101	J_2t	101-4	43.37	21.51	0.23	0.20
5	高101	J_2t	101-5	55.52	24.17	0.21	0.21
6	高101	J_2t	101-6	53.64	25.52	0.26	0.22
7	高101	J_1s	101-7	66.35	27.76	0.24	0.20
8	高101	J_1s	101-8	55.56	27.18	0.24	0.21
9	高102	J_2t	102-1	50.49	25.33	0.22	0.21
10	高102	J_2t	102-2	57.18	25.41	0.23	0.21
11	高102	J_2t	102-3	55.78	23.41	0.23	0.21
12	高泉5	J_2t	5-1	29.70	10.98	0.23	0.22
13	高泉5	J_2t	5-2	40.98	12.55	0.23	0.22
14	高泉5	K_1q	5-3	59.38	29.55	0.21	0.19
15	高泉5	K_1q	5-4	51.22	25.11	0.24	0.20
16	高泉5	K_1q	5-5	50.50	28.19	0.25	0.24
17	高泉5	K_1q	5-6	60.89	18.64	0.21	0.21
18	高泉5	J_2t	5-7	42.65	20.16	0.21	0.19
19	高泉5	J_2t	5-8	49.78	21.76	0.17	0.21
20	独山1	J_3q	1-1	45.96	15.35	0.19	0.21
21	独山1	J_3q	1-2	34.32	11.33	0.21	0.19
22	独山1	J_3q	1-3	44.09	15.45	0.20	0.22
23	独山1	J_3q	1-4	50.49	17.16	0.21	0.20
24	独山1	J_3q	1-5	50.99	15.14	0.25	0.22
25	独山1	J_3q	1-6	34.79	12.89	0.21	0.23
26	独山1	J_3q	1-7	40.07	24.52	0.17	0.19
27	独山1	J_3q	1-8	43.85	23.39	0.19	0.19
28	独山1	J_3q	1-9	48.17	21.25	0.22	0.23

岩石力学实验结果表明, 四棵树凹陷侏罗系—白垩系砂岩静态杨氏模量主要分布于12~30 GPa, 泊松比分布于0.19~0.24。

2.3 岩石力学参数动静转换

由于测井和实验手段中非均质性储层的声波响应不同, 造成岩石力学动态参数与静态参数有一定的差异。同时, 基于测井数据计算的动态岩石力学参数数据量较大, 而基于实验数据获取的静态岩石力学参数较为真实准确, 因此考虑将二者进行交汇分析, 建立数学模型, 以得到更为准确、丰富的静态岩石力学参数。

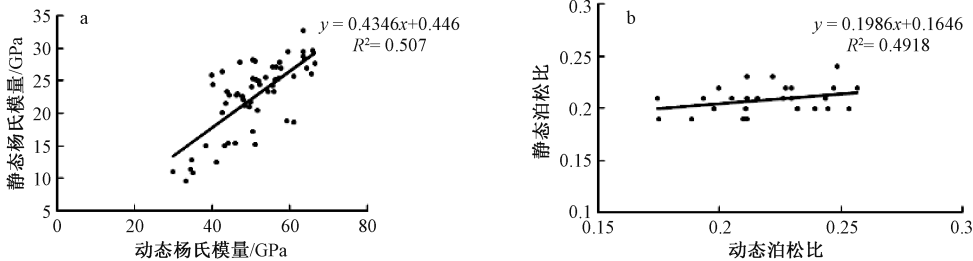


图3 四棵树凹陷侏罗系—白垩系岩石力学参数交汇图
Fig. 3 Crossplot of the Jurassic-Cretaceous rock mechanical parameters for the Sikeshe sag

3 岩石力学参数分布特征

结合单井岩石力学剖面与三维地震数据体, 利用公式(1)(2)和前述动静转换关系模型, 可进行静态岩石力学参数反演(刘建华等, 2020)。此次高泉地区反演结果表明, 静态岩石力学参数与岩性关系密切。清水河组中上部以细粒沉积为主, 发育泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩, 杨氏模量较低, 约30~40 GPa, 泊松比较高, 约0.25~0.35(图4a)。清水河组底部、头屯河组、西山窑组主体发育粗碎屑沉积, 包括泥质粉砂岩、中粗砂岩、砾岩、含砾粗砂岩, 杨氏模量较高, 约30~50 GPa, 泊松比较低, 约0.2~0.3(图4b)。砂砾岩的杨氏模量比泥岩的高约10~20 GPa, 砂砾岩的泊松比比泥岩低约0.05~0.1, 当砂砾岩与泥岩互层时, 杨氏模量和泊松比也发生交互变化, 响应关系较好。

从连井剖面结果中看出(图5), 白垩系清水河组下部与侏罗系头屯河组、西山窑组、八道湾组杨氏模量较高、泊松比较低, 白垩系清水河组上部、侏罗系三工河组杨氏模量较高、泊松比较低, 这种岩石力学参数垂向变化规律在全区均可

结果表明(图3), 动、静态杨氏模量之间呈正相关的线性关系, $E_s = 0.4346 \times E_d + 0.446$, 拟合系数大于0.7, 其中 E_s 为静态杨氏模量, E_d 为动态杨氏模量(图3a)。动、静态泊松比之间也呈正相关的线性关系, $v_s = 0.1986 \times v_d + 0.1646$, 拟合系数大于0.7, 其中 v_s 为静态泊松比, v_d 为动态泊松比(图3b)。总体来看, 与库车及川西等地区深层砂岩储层相比(王珂等, 2014), 研究区动、静态岩石力学参数转换系数相关性较高, 说明此次数学模型可以为该区侏罗系—白垩系岩石力学三维预测提供直接依据。

看到, 指示储层应力-应变关系具有垂向分层性。

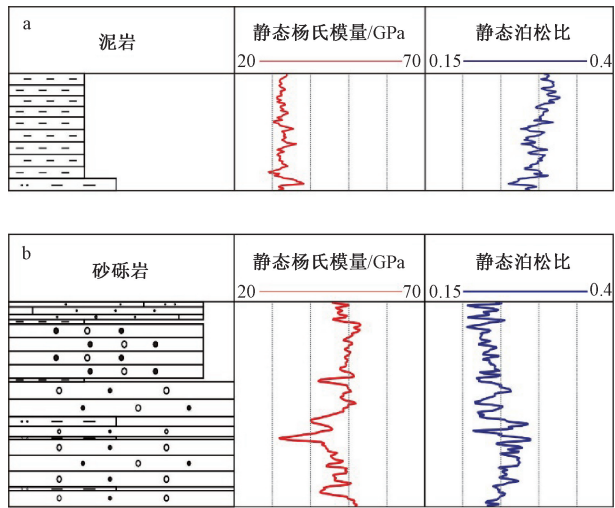


图4 高泉地区不同岩性静态岩石力学参数反演评价
Fig. 4 Evaluation of static rock mechanical parameters of different lithologies

4 岩石力学参数意义

4.1 岩石力学参数与抗压强度

四棵树凹陷侏罗系—白垩系砂岩静态岩石力

学测试结果表明（表 2，图 6），静态杨氏模量与岩石抗压强度成正相关关系，杨氏模量越大，抗压强度越大。静态泊松比与岩石抗压强度成负相关关系，泊松比越小，抗压强度越大。

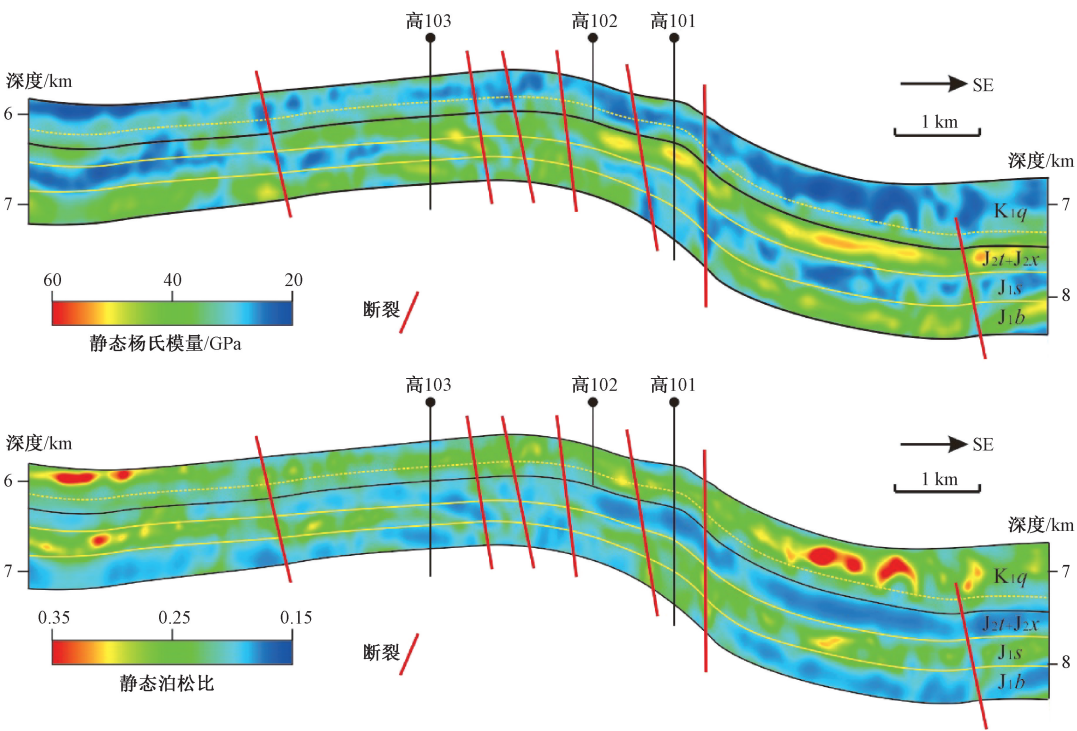


图 5 高泉地区静态岩石力学参数反演剖面

Fig. 5 Inversion profile of the static rock mechanical parameters for the Gaoquan area

表 2 四棵樹凹陷侏羅系—白堊系致密砂岩儲層静态岩石力学实验数据

Table 2 Experimental data of static rock mechanics of the Jurassic-Cretaceous tight sandstone reservoir in the Sikeshu sag

序号	井号	井深/ m	层位	长度/ mm	直径/ mm	重量/ g	密度/ (g/cm ³)	围压/ MPa	抗压强度/ MPa	静态杨氏 模量/GPa	静态 泊松比
1	艾 2	3520	J ₂ x	50.47	25.08	64.72	2.60	49.30	282.21		0.228
2	卡 8	3955	J ₂ t	50.18	25.08	58.04	2.34	55.40	245.14	21.98	0.228
3	卡 002	3992	J ₂ t	49.58	25.03	56.68	2.32	55.90	228.14	21.18	
4	卡 002	3999	J ₂ t	49.85	24.98	55.46	2.27	56.00	195.59	19.49	0.236
5	卡 8	4074	J ₂ t	49.95	25.06	64.06	2.60	57.0	309.96	29.58	
6	卡 002	4080	J ₂ t	49.75	24.96	56.26	2.31	57.10	246.96	22.86	0.243
7	卡 002	4126	J ₂ x	50.45	25.08	58.40	2.34	57.80	273.06	22.96	0.246
8	卡 7	4176	K ₁ q	46.46	25.06	53.49	2.34	58.60	307.13	24.02	
9	卡 8	4228	J ₁ b	50.11	25.13	63.72	2.57	59.20	410.56	34.21	
10	独山 1	6017	J ₂ t	50.43	25.05	61.19	2.46	65.00	390.58	34.13	0.207
11	独山 1	6413	J ₂ t	45.39	25.03	57.23	2.56	65.00	320.64		0.221
12	独山 1	6415	J ₂ t	50.12	25.08	61.06	2.47	65.00	378.38	32.46	0.203

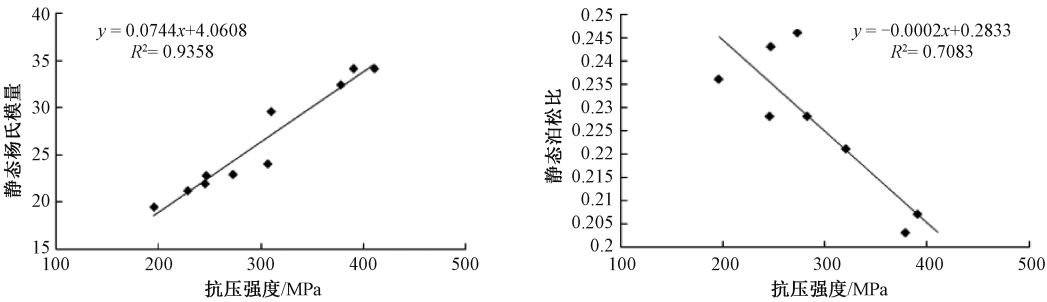


图 6 四棵樹凹陷侏羅系—白堊系岩石力学参数与抗压强度关系图

Fig. 6 Relationship between rock mechanical parameters and compressive strength of the Jurassic-Cretaceous rocks in the Sikeshu sag

4.2 岩石力学参数与储层裂缝

基于静态岩石力学参数储层反演数据, 选取常用岩石破裂 Rickman 脆性指数模型, 评价储层裂缝发育情况 (Rickman et al., 2008; 孙建孟等, 2015), 数学模型表达式如下:

$$En = (E - E_{min}) / (E_{max} - E_{min}) \quad (5)$$

$$Vn = (V_{max} - V) / (V_{max} - V_{min}) \quad (6)$$

$$Fn = (En + Vn) / 2 \quad (7)$$

式中, Fn 、 En 、 Vn 为裂缝发育指数、杨氏模量指数、泊松比指数, 取值范围 0~1 之间, 无量纲; E_{max} 、 E_{min} 、 E 分别为目的层静态杨氏模量的最大值、最小值、测点值, GPa; V_{max} 、 V_{min} 、 V 分别为目的层静态泊松比的最大值、最小值、测点值, 无量纲。一般认为, 当 $Fn < 0.4$, 裂缝不发育,

$0.4 \leq Fn < 0.7$, 裂缝较发育, $Fn \geq 0.7$, 裂缝发育。

研究结果表明 (图 7), 四棵树凹陷侏罗系—白垩系静态杨氏模量越大、泊松比越小, 裂缝发育指数越大, 越容易形成裂缝。清水河组中上部、三工河组裂缝发育指数约 0.1~0.4, 裂缝相对不发育; 清水河组下部、西山窑组裂缝发育指数约 0.4~0.7, 裂缝较发育; 头屯河组裂缝发育指数约 0.7~0.9, 裂缝发育。将裂缝预测指数与成像测井解释的裂缝数量进行对比, 即裂缝指数越大, 裂缝数量越多, 二者较为吻合, 证实预测结果较为合理。该区高探 1 井在清水河组下部、头屯河组油气显示好, 指示裂缝可能具有重要贡献。因此, 基于静态岩石力学参数预测储层裂缝具有重要的油气勘探意义。

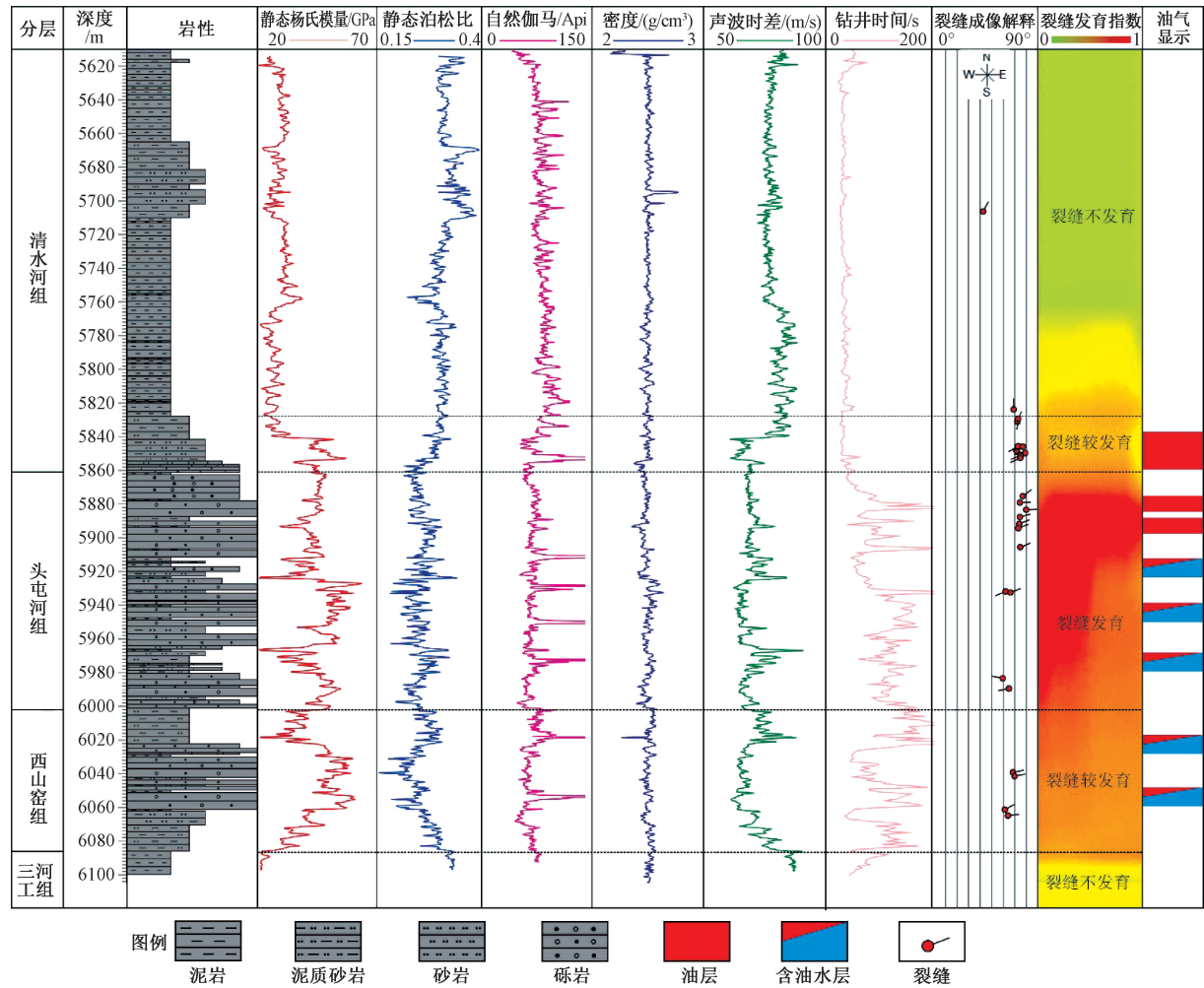


图 7 高泉地区侏罗系—白垩系岩石力学参数与裂缝响应关系图

Fig. 7 Relationship between rock mechanical parameters and fracture response of the Jurassic-Cretaceous rocks in the Gaoquan area

5 结论

(1) 四棵樹凹陷侏羅系—白堊系儲層動、靜態楊氏模量和泊松比均呈正相關線性關係，岩石力學參數受岩性變化控制，白堊系清水河組下部與侏羅系頭屯河組、西山窑組、八道灣組楊氏模量較高、泊松比較低，白堊系清水河組上部、侏羅系三工河組楊氏模量較低、泊松比較高。隨著楊氏模量增加、泊松比降低，岩石抗壓強度增加。

(2) 基於高泉地區岩石力學參數反演結果表明，楊氏模量越大、泊松比越小，裂縫發育指數越高，越容易形成裂縫。白堊系清水河組上部、侏羅系三工河組裂縫發育指數小於 0.4，裂縫不發育、油氣顯示差；白堊系清水河組下部、侏羅系西山窑組與頭屯河組裂縫發育指數大於 0.4，裂縫發育、油氣顯示好。因此基於岩石力學預測儲層裂縫對油氣勘探具有重要指導意義，在淮南前陸深層油氣勘探中應予以重視。

References

BOWERS G L, 1995. Pore pressure estimation from velocity data; accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction [J]. SPE Drilling & Completion, 10 (2): 89-95.

DING W L, FAN T L, HUANG X B, et al., 2010. Paleo-structural stress field simulation for middle-lower Ordovician in Tazhong area and favorable area prediction of fractured reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum, 34 (5): 1-6. (in Chinese with English abstract)

DU J H, ZHI D M, LI J Z, et al., 2019. Major breakthrough of Well Gaotan 1 and exploration prospects of lower assemblage in southern margin of Junggar basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 46 (2): 205-215. (in Chinese with English abstract)

DUMITRESCU C C, 2019. Brittleness and geomechanical properties estimation using wireline and seismic data in the Duvernay Shale Basin, Canada [C] //Unconventional resources technology conference. Houston, Texas; SEG: 478-493.

FANG S H, JIA C Z, SONG Y, et al., 2007. Mesocenozoic tectonic events and structural constraints in the southern Junggar Basin; evidence from detrital compositions [J]. Chinese Journal of Geology, 42 (4): 753-765. (in Chinese with English abstract)

GAO Z Y, FENG J R, CUI J G, et al., 2020. Comparative analysis on sedimentary and reservoir characteristics of Jurassic to cretaceous between Foreland Basins in southern and northern Tianshan Mountains [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 41 (1): 80-92. (in

Chinese with English abstract)

GUAN S W, HE D F, LEI Y L, et al., 2013. Kinematic classification, structural modeling and prospective fields of the foreland thrust belts in Midwest China [J]. Petroleum Exploration and Development, 40 (1): 66-78. (in Chinese with English abstract)

GUAN X T, WU C D, WU J, et al., 2020. Sedimentary sequence and depositional environment evolution of Upper Jurassic-Lower cretaceous strata in the southern Margin of Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 41 (1): 67-79. (in Chinese with English abstract)

GUI R, WAN Y P, 2012. Rock mechanics parameter calculation based on conventional logging data: a case study of Upper Paleozoic in Ordos Basin [J]. Journal of Geomechanics, 18 (4): 418-424. (in Chinese with English abstract)

HAN D H, NUR A, MORGAN D, 1986. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones [J]. Geophysics, 51 (11): 2093-2107.

HAN Y G, ZHAO G C, 2018. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern central Asian Orogenic belt: constraints on the closure of the Paleo-Asian ocean [J]. Earth-Science Reviews, 186: 129-152.

HE H Q, ZHI D M, LEI D W, et al., 2019. Strategic breakthrough in Gaoquan anticline and exploration assessment on lower assemblage in the southern margin of Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 24 (2): 137-146. (in Chinese with English abstract)

HUANG S J, SHAN Y M, LIU W G, et al., 1999. The relationship between mechanical parameters of rock and formation conditions of reservoir sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 18 (4): 454-459. (in Chinese with English abstract)

JIN J, WANG F Y, REN J L, et al., 2019. Genesis of High-Yield oil and gas in well Gaotan-1 and characteristics of source rocks in Sikeshu Sag, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 40 (2): 145-151. (in Chinese with English abstract)

KUANG J, QI X F, 2006. The structural characteristics and Oil-Gas explorative direction in Junggar Foreland Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 27 (1): 5-9. (in Chinese with English abstract)

LEI D W, TANG Y, CHANG Q S, 2008. The deep and relatively high-quality elastic reservoir bodies and favorable exploration areas in southern margin of Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 29 (4): 435-438. (in Chinese with English abstract)

LI Z M, ZHANG J Z, 1997. In-situ stress and petroleum exploration & development [M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)

LIANG Z L, PANG Z C, JI D S, et al., 2020. Discovery of Ultra-Deep rift basin and its petroleum exploration significance in Sikeshu Sag, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 41 (1): 18-24.

(in Chinese with English abstract)

LIU H M, WANG X J, DU Z J, et al, 2020. Study on pore structure characteristics of tight sandstone in Block 4 of the central Junggar Basin [J]. Journal of Geomechanics, 26 (1): 96-105. (in Chinese with English abstract)

LIU J H, WU C, TAO X H, 2020. Three-dimensional modeling method for drilling rock mechanics and its field application [J]. Drilling & Production Technology, 43 (1): 13-16. (in Chinese with English abstract)

LIU J G, LI J, SU Y L, et al, 2020. Tectonic stress field research on the Ordovician reservoirs in the Tahe Oilfield [J]. Journal of Geomechanics, 26 (1): 48-54. (in Chinese with English abstract)

MENG Y K, SHI F J, WANG X W, 2012. Analysis of the structure and deformation of Sikeshu sag in the southern part of Junggar basin [J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 25 (2): 116-120. (in Chinese with English abstract)

RICKMAN R, MULLEN M, PETRE J, et al. , 2008. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization; all shale plays are not clones of the Barnett Shale [C] //SPE annual technical conference and exhibition. Denver: SPE.

SHAO Y, WANG R F, ZHANG Y Q, et al. , 2011. Strike-slip structures and oil-gas exploration in the NW margin of the Junggar Basin, China [J]. Acta Petrolei Sinica, 32 (6): 976-984. (in Chinese with English abstract)

SUN J M, HAN Z L, QIN R B, et al. , 2015. Log evaluation method of fracturing performance in tight gas reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 36 (1): 74-80. (in Chinese with English abstract)

WANG K, DAI J S, FENG J W, et al. , 2014. Research on reservoir rock mechanical parameters of Keshen foreland thrust belt in Tarim Basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 38 (5): 25-33. (in Chinese with English abstract)

WARD C D, COGHILL K, BROUSSARD M D, 1994. The application of petrophysical data to improve pore and fracture pressure determination in North sea central graben HPHT wells [C] //SPE annual technical conference and exhibition. New Orleans: SPE.

WU L, ZHU M, FENG X Q, et al. , 2022. Interpretation on tectonic stress and deformation of Sikeshu sag in Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 43 (4): 494-506. (in Chinese with English abstract)

XIAO L X, LEI D W, WEI L Y, et al. , 2012. Structural types and features in the west of south margin in the Junggar Basin [J]. Natural Gas Industry, 32 (11): 36-39. (in Chinese with English abstract)

XU X N, LI Y J, RUAN B, et al. , 2020. Integrated Formation pressure testing by logging and genesis of abnormal high pressure in Gaoquan Anticline [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 41 (3): 365-371. (in

Chinese with English abstract)

YANG D S, XIAO L X, YAN G H, et al. , 2019. Structural characteristics and petroleum exploration in Sikeshu sag, southern margin of Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 40 (2): 138-144. (in Chinese with English abstract)

ZHAO G P, 2003. Overpressure and its relation to petroleum accumulation in southern edge of Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 24 (4): 327-331. (in Chinese with English abstract)

ZHOU H W, XIE H P, ZUO J P, et al. , 2010. Experimental study of the effect of depth on mechanical parameters of rock [J]. Chinese Science Bulletin, 55 (34): 3276-3284. (in Chinese with English abstract)

ZHOU W, GAO Y Q, SHAN Y M, et al. , 2008. Lithomechanical property of tight sand reservoirs in the second member of Shaximiao Formation in Xinchang gas field, West Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 28 (2): 34-37. (in Chinese with English abstract)

ZHU M, WANG X, XIAO L X, 2020. Structural characteristics and evolution in the southern Margin of Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 41 (1): 9-17. (in Chinese with English abstract)

ZHU W, WU C D, WANG J L, et al. , 2017. Triassic provenance and its tectonic significance in Sikeshu sag, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 38 (5): 512-518. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

丁文龙, 樊太亮, 黄晓波, 等, 2010. 塔中地区中-下奥陶统古构造应力场模拟与裂缝储层有利区预测 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 34 (5): 1-6.

杜金虎, 支东明, 李建忠, 等, 2019. 准噶尔盆地南缘高探1井重大发现及下组合勘探前景展望 [J]. 石油勘探与开发, 46 (2): 205-215.

方世虎, 贾承造, 宋岩, 等, 2007. 准噶尔盆地南缘中-新生界碎屑成份特征与构造期次 [J]. 地质科学, 42 (4): 753-765.

高志勇, 冯佳睿, 崔京钢, 等, 2020. 天山南北前陆盆地侏罗系: 白垩系沉积及储集层特征对比 [J]. 新疆石油地质, 41 (1): 80-92.

管树巍, 何登发, 雷永良, 等, 2013. 中国中西部前陆冲断带运动学分类、模型与勘探领域 [J]. 石油勘探与开发, 40 (1): 66-78.

关旭同, 吴朝东, 吴鉴, 等, 2020. 准噶尔盆地南缘上侏罗统: 下白垩统沉积序列及沉积环境演化 [J]. 新疆石油地质, 41 (1): 67-79.

归榕, 万永平, 2012. 基于常规测井数据计算储层岩石力学参数: 以鄂尔多斯盆地上古生界为例 [J]. 地质力学学报, 18 (4): 418-424.

何海清, 支东明, 雷德文, 等, 2019. 准噶尔盆地南缘高泉背斜战略突破与下组合勘探领域评价 [J]. 中国石油勘探, 24 (3): 137-146.

黄思静, 单钰铭, 刘维国, 等, 1999. 储层砂岩岩石力学性质与地层条件的关系研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 18 (4): 454-459.

靳军, 王飞宇, 任江玲, 等, 2019. 四棵树凹陷高探1井高产油气成因与烃源岩特征 [J]. 新疆石油地质, 40 (2): 145-151.

况军, 齐雪峰, 2006. 准噶尔前陆盆地构造特征与油气勘探方向 [J]. 新疆石油地质, 27 (1): 5-9.

雷德文, 唐勇, 常秋生, 2008. 准噶尔盆地南缘深部优质储集层及有利勘探领域 [J]. 新疆石油地质, 29 (4): 435-438.

李志明, 张金珠, 1997. 地应力与油气勘探开发 [M]. 北京: 石油工业出版社.

梁则亮, 庞志超, 冀冬生, 等, 2020. 四棵树凹陷超深层裂谷盆地的厘定及油气勘探意义 [J]. 新疆石油地质, 41 (1): 18-24.

刘惠民, 王学军, 杜振京, 等, 2020. 准中4区块致密砂岩孔隙结构特征研究 [J]. 地质力学学报, 26 (1): 96-105.

刘建华, 吴超, 陶兴华, 2020. 钻井岩石力学参数三维建模方法及其现场应用 [J]. 钻采工艺, 43 (1): 13-16.

刘佳庚, 李静, 苏玉亮, 等, 2020. 塔河油田奥陶系储层构造应力场研究 [J]. 地质力学学报, 26 (1): 48-54.

孟元库, 施发剑, 汪新文, 2012. 准噶尔盆地南缘四棵树凹陷构造变形特征分析 [J]. 宁波大学学报 (理工版), 25 (2): 116-120.

邵雨, 汪仁富, 张越迁, 等, 2011. 准噶尔盆地西北缘走滑构造与油气勘探 [J]. 石油学报, 32 (6): 976-984.

孙建孟, 韩志磊, 秦瑞宝, 等, 2015. 致密气储层可压裂性测井评价方法 [J]. 石油学报, 36 (1): 74-80.

王珂, 戴俊生, 冯建伟, 等, 2014. 塔里木盆地克深前陆冲断带储层岩石力学参数研究 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 38 (5): 25-33.

吴林, 朱明, 冯兴强, 等, 2022. 准噶尔盆地四棵树凹陷构造应力场与构造变形解析 [J]. 石油学报, 43 (4): 494-506.

肖立新, 雷德文, 魏凌云, 等, 2012. 淮南西段构造样式及逆冲推覆构造特征 [J]. 天然气工业, 32 (11): 36-39.

徐新纽, 李俞静, 阮彪, 等, 2020. 高泉背斜地层压力测井多参数综合解释与异常高压成因 [J]. 新疆石油地质, 41 (3): 365-371.

杨迪生, 肖立新, 阎桂华, 等, 2019. 准噶尔盆地南缘四棵树凹陷构造特征与油气勘探 [J]. 新疆石油地质, 40 (2): 138-144.

赵桂萍, 2003. 准噶尔盆地南缘异常高压及其与油气成藏的关系 [J]. 石油与天然气地质, 24 (4): 327-331.

周宏伟, 谢和平, 左建平, 等, 2010. 赋存深度对岩石力学参数影响的实验研究 [J]. 科学通报, 55 (34): 3276-3284.

周文, 高雅琴, 单钰铭, 等, 2008. 川西新场气田沙二段致密砂岩储层岩石力学性质 [J]. 天然气工业, 28 (2): 34-37.

朱明, 汪新, 肖立新, 2020. 准噶尔盆地南缘构造特征与演化 [J]. 新疆石油地质, 41 (1): 9-17.

朱文, 吴朝东, 王家林, 等, 2017. 准噶尔盆地四棵树凹陷三叠系物源及其构造意义 [J]. 新疆石油地质, 38 (5): 512-518.