

## 深层-超深层碎屑岩地应力测井评价及其控储效应\*

吴永平<sup>1,2</sup> 肖露<sup>3</sup> 朱波<sup>1,4</sup> 杨薰<sup>3</sup> 白晓佳<sup>1,5</sup>  
闫炳旭<sup>1,2</sup> 张荣虎<sup>6</sup> 李栋<sup>3</sup> 李红斌<sup>3</sup> 赖锦<sup>3</sup>

- 1 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000
- 2 中国石油超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆库尔勒 841000
- 3 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249
- 4 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆库尔勒 841000
- 5 新疆超深油气重点实验室, 新疆库尔勒 841000
- 6 中国石油天然气股份有限公司杭州地质研究院, 浙江杭州 310023

**摘要** 地应力对深层-超深层致密砂岩储集层品质控制明显, 厘清应力控储效应对深层-超深层致密砂岩储集层综合评价与预测至关重要。通过岩心、薄片等分析化验资料揭示了库车坳陷中秋地区白垩系巴什基奇克组储集层基本特征, 实现了地应力大小测井评价, 并阐明地应力对储集层品质控制。结果表明, 储集层岩性主要为中细砂岩, 以原生粒间孔隙为主, 次生孔隙较少, 偶尔可见裂缝。通过成像测井实现了裂缝面形态拾取, 同时实现了裂缝参数测井计算, 在此基础上通过测井资料完成了地应力大小评价, 并揭示了地应力对基质孔隙及裂缝参数耦合控制关系。综合物性参数以及地应力大小实现了巴什基奇克组储集层分类评价, 优质储集层主要发育在裂缝发育段以及低水平两向应力差区域。通过地应力测井评价结合储集层参数计算, 可实现储集层品质分类评价以及优质储集层测井预测。研究成果可为深层-超深层致密砂岩储集层综合评价与有利区带预测提供技术支持。

**关键词** 深层-超深层 地应力 储集层品质 巴什基奇克组 中秋区块 库车坳陷 塔里木盆地

**第一作者简介** 吴永平, 男, 1979年生, 高级工程师, 主要从事油气田开发研究。E-mail: wuyyp-ilm@petro-China.com.cn。

**通讯作者简介** 赖锦, 男, 1988年生, 副教授, 博士生导师, 从事沉积储层与测井地质学教学与研究工作。E-mail: laijin@cup.edu.cn。

中图分类号: P631.8 文献标志码: A

Logging evaluation of *in situ* stress and its effects on reservoir quality in deep and ultra-deep clastic rockWU Yongping<sup>1,2</sup> XIAO Lu<sup>3</sup> ZHU Bo<sup>1,4</sup> YANG Xun<sup>3</sup> BAI Xiaojia<sup>1,5</sup>  
YAN Bingxu<sup>1,2</sup> ZHANG Ronghu<sup>6</sup> LI Dong<sup>3</sup> LI Hongbin<sup>3</sup> LAI Jin<sup>3</sup>

1 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, CNPC, Xinjiang Korla 841000, China

\* 国家自然科学基金项目(编号: 41872133)、中国石油大学(北京)科研启动基金(编号: 2462021YXZZ003)和中国石油-中国石油大学(北京)战略合作协议(编号: ZLZX2020-01-06-01)联合资助。[Co-funded by National Natural Science Foundation of China (No. 41872133), Science Foundation of China University of Petroleum (Beijing) (No. 2462021YXZZ003) and strategic cooperation project of PetroChina and China University of Petroleum (Beijing) (No. ZLZX2020-01-06-01)]

收稿日期: 2024-07-10 改回日期: 2024-09-26

2 R & D Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC, Xinjiang Korla 841000, China

3 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

4 Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Korla 841000, China

5 Xinjiang Key Laboratory of Ultra-deep Oil and Gas, Xinjiang Korla 841000, China

6 PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China

**Abstract** *In situ* stress significantly controls the quality of deep and ultra-deep tight sandstone reservoirs. It is important to clarify the stress-controlled storage effect for the comprehensive evaluation and prediction of deep and ultra-deep tight sandstone reservoirs. In this paper, basic characteristics of the Cretaceous Bashijiqike Formation in the Zhongqiu area of Kuqa Depression are revealed through analysis of cores and thin sections, the logging evaluation of *in situ* stress is realized, and the control of *in situ* stress on reservoir quality is clarified. The results show that the reservoir is mainly made of medium-fine sandstones, which is dominated by primary intergranular pores, with less secondary pores and occasional fractures. The fracture surface morphology is picked up by image logging, and the logging calculation of fracture parameters is realized. Evaluation of *in situ* stress is completed through logging data, and the coupling control relationships between *in situ* stress, and matrix pores and fracture parameters are revealed. The reservoir classification and evaluation of the Bashijiqike Formation are realized by combining physical parameters with *in situ* stress. High-quality reservoirs are mainly developed in fractured zones and intervals with low *in situ* horizontal stress differences. Through logging evaluation of *in situ* stress combined with calculation of reservoir parameter, the reservoir quality classification evaluation and high-quality reservoir logging prediction can be realized. The research results may provide technical support for the comprehensive evaluation of deep and ultra-deep tight sandstone reservoirs and the prediction of favorable zones.

**Key words** deep and ultra-deep reservoir, *in-situ* stress, reservoir quality, Bashijiqike Formation, Zhongqiu area, Kuqa Depression, Tarim Basin

**About the first author** WU Yongping, born in 1979, is a senior engineer. He is mainly engaged in oil-gas field development research. E-mail: wuyptlm@petroChina.com.cn.

**About the corresponding author** LAI Jin, born in 1988, is an associate professor and doctoral supervisor. He is mainly engaged in sedimentology, reservoir geology and well logging geology. E-mail: laijin@cup.edu.cn.

## 0 引言

深层-超深层油气是目前中国陆上油气勘探的重要领域(孙龙德等, 2013; 贾承造等, 2023; 赖锦等, 2023a; Su *et al.*, 2024)。通常将中国东部盆地 3500~4500 m 定义为深层, 4500 m 以深则为超深层; 而中国西部盆地则将 4500~6000 m 深度定义为深层, 6000 m 以深则为超深层(孙龙德等, 2013; 赵文智等, 2015; 魏国齐等, 2020; 贾承造等, 2023; 赖锦等, 2023a; 苏洋等, 2025)。中国西部塔里木盆地库车坳陷白垩系为深层-超深层油气勘探开发主战场之一, 具有良好的油气勘探开发

前景(韩登林等, 2011; 冯建伟等, 2020)。深层-超深层致密砂岩由于埋藏深、构造样式复杂, 在复杂的构造、成岩演化过程中, 储集层逐渐变得致密; 此外, 深埋以及复杂构造样式导致深层-超深层领域地应力分布较为集中, 研究表明, 地应力场对储集层品质控制作用明显(Lai *et al.*, 2017, 2024; Xin *et al.*, 2022; 徐珂等, 2022; 赖锦等, 2023b)。强烈挤压应力将使得深层-超深层储集层被压实致密, 对储集层物性起明显破坏作用(贾承造等, 2023)。库车坳陷侏罗系阿合组致密砂岩气储集层构造应力减孔效应明显, 应力减孔量为 8.8%/100 MPa(张荣虎等, 2021)。现今地应力场

控制了天然裂缝的开启性，同时控制了基质孔隙的保存，强挤压应力将导致天然裂缝闭合，同时降低基质孔隙大小，而相对弱挤压应力场则有利于优质储集层形成与发育 (Lai *et al.*, 2019; 徐珂等, 2022; 赖锦等, 2023b)。因此深层-超深层地应力分析对油气勘探开发具有重要理论与实践意义 (印兴耀等, 2014; Dixit *et al.*, 2017; Iqbal *et al.*, 2018; Lai *et al.*, 2024)。

由于地应力实验分析数据的局限导致应力对储集层品质的控制效应尚不明确，为了更好地揭示深层-超深层领域地应力分布特征及其控储效应，亟需通过纵向分辨率高、连续性好的测井资料实现现今地应力大小定量评价，并进一步揭示地应力对深层-超深层储集层品质的控制 (Lai *et al.*, 2019; 赖锦等, 2021; 徐珂等, 2022; Xu *et al.*, 2022)。目前，通过地球物理测井资料评价现今地应力场的方法较多，针对深层-超深层储集层适用性最好的为组合弹簧模型 (徐珂等, 2022; 赖锦等, 2023b)。在岩心资料研究的基础上，利用声波曲线、密度曲线等可计算泊松比和杨氏模量等岩石力学参数，进一步可实现现今应力场的测井评价 (张辉等, 2019; 徐珂等, 2021)。

库车坳陷自北向南可分为北部单斜带、克拉苏-依奇克里克构造带、秋里塔格构造带、南部斜坡带、拜城凹陷、阳霞凹陷、乌什凹陷“四带三凹”7个次级构造单元，不同构造带以断裂为界或与断裂伴生，同时内部发育不同级次断裂与褶皱 (图 1) (Lai *et al.*, 2017; 杜金虎等, 2019)。秋里塔格构造带位于南天山山前，可分为东秋、中秋、西秋 3 段，主力产气层段白垩系巴什基奇克组形成于辫状

河三角洲沉积体系，砂体发育条件优越，但受地应力分布集中且单井变化较大影响，造就储集层品质的明显差异。

以库车坳陷秋里塔格构造带白垩系巴什基奇克组深层-超深层碎屑岩储集层为例，在前人研究工作基础上，利用岩心、薄片等多科研究资料，阐明储集层基本特征，进一步通过测井资料利用组合弹簧模型实现单井地应力测井定量评价，结合物性分析以及测井解释结果，阐明地应力对储集层品质控制作用，然后在应力控储机制下实现了深层-超深层储集层分类评价。通过地应力与储集层参数相结合的方法可揭示应力对深层-超深层储集层品质控制效应，这对深层-超深层储集层成因解剖有一定的指导意义，同时可为优质储集层预测及油气勘探开发提供方法支撑。

## 1 区域地质概况

库车坳陷构造变形具有典型的“东西分段、南北分带和上下分层”的特征 (图 1) (朱如凯等, 2007; 李忠等, 2009)。库车坳陷是深层-超深层油气勘探的热点和重点区域，其侏罗系和白垩系目的层多形成于辫状河-一曲流河三角洲沉积体系，砂体较为发育，具有规模优质储集层发育的沉积条件 (杜金虎等, 2012; 张荣虎等, 2015)。同时库车坳陷具备优越的石油地质条件，侏罗系及三叠系煤系烃源岩为油气聚集奠定了物质基础，规模发育的河流-三角洲砂体为天然气良好的储集体；叠瓦冲断构造为天然气聚集提供了有效圈闭 (雷刚林等 2007; 杜金虎等, 2012)。此外，古近系库姆格勒

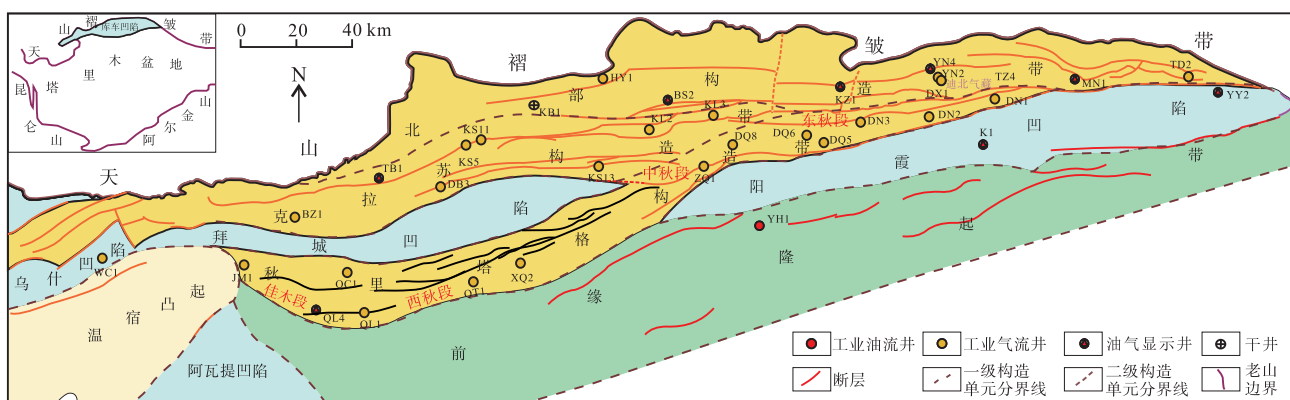


图 1 塔里木盆地库车坳陷构造纲要图 (据杜金虎等, 2019; 唐雁刚等, 2021; 信毅等, 2024)

Fig. 1 Structural division of Kuqa Depression of Tarim Basin (after Du *et al.*, 2019; Tang *et al.*, 2021; Xin *et al.*, 2024)

木群 ( $E_{1-2} km$ ) 等巨厚的膏盐层盖层封盖能力优越 (杜金虎等, 2012)。

中秋区块位于库车坳陷秋里塔格构造带中部, 2018 年中秋 1 井高产工业油气流的发现证实了中秋地区的勘探潜力 (图 1)。但其白垩系目的层埋深普遍超过 6000 m, 深埋过程中储集层经历成岩演化较为复杂, 普遍具高温高压特征 (张荣虎等, 2014; Zhu *et al.*, 2015; Lai *et al.*, 2017; 冯建伟等, 2020)。受复杂构造样式以及构造演化影响, 储集层不同程度发育裂缝, 尤其是喜山运动以来的强烈挤压作用, 大量裂缝形成 (张惠良等, 2014; 张荣虎等, 2017; 徐珂等, 2022)。但在现今应力场的改造下, 部分裂缝容易闭合, 且部分基质孔隙也难以保留。因此, 深层-超深层高温超高温条件下, 基质孔隙以及裂缝的开启性研究显得尤为重要。研究表明, 对深层-超深层储集层, 其现今应力场特征尤其是现今应力场大小控制了基质孔隙的保存以及天然裂缝的启闭性 (Lai *et al.*, 2019; 徐珂等, 2022)。

## 2 储集层基本特征

通过岩心观察描述, 秋里塔格构造带白垩系巴

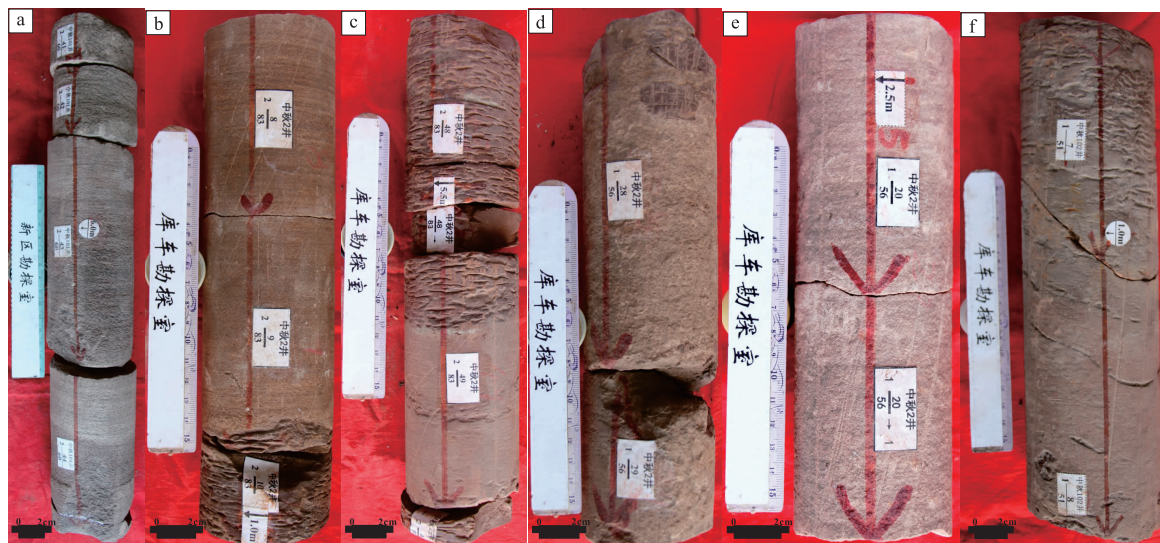
什基奇组主要的岩性类型包括褐色、灰色中、细砂岩以及红褐色泥岩, 此外岩心观察还可揭示其沉积构造主要包括平行层理、冲刷面、废弃面, 甚至可以观察到泥砾, 体现了水动力较强的特征, 部分层段偶可见裂缝。体现了秋里塔格构造带辫状河三角洲的沉积体系特征 (图 2)。

根据岩心实测, 巴什基奇组储集层孔隙度主要分布在 1.9%~16.4% 之间, 平均可达 12.6%; 渗透率主要分布在  $(0.056 \sim 458) \times 10^{-3} \mu m^2$  之间, 平均  $8.251 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。镜下薄片观察表明, 巴什基奇组储集层储集空间以原生粒间孔为主, 其次是粒间溶孔、粒内溶孔、微孔隙 (图 3)。因此深层-超深层储集层受一定的构造、沉积条件和成岩因素影响, 在深埋背景下仍能保存有较好的物性条件。

## 3 深层-超深层碎屑岩应力场特征及测井评价

### 3.1 地应力场特征

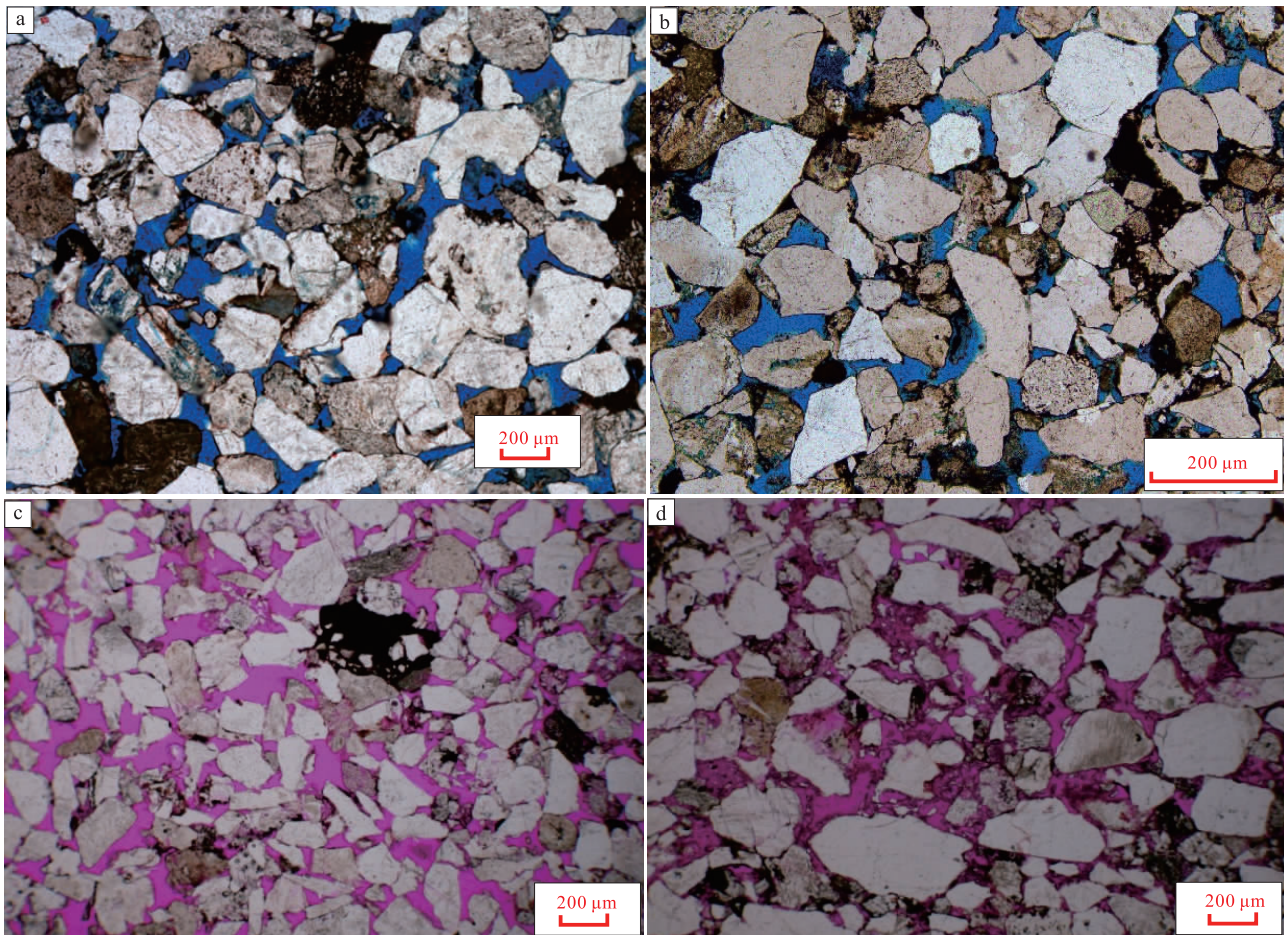
地应力场, 既包括地质历史时期古应力场 (可通过岩石中形成的不同变形和断裂形迹来反推), 也包含目前仍活动的现今地应力场 (第四纪中更新世以来), 应力场研究对地质与工程研究均



a—灰色中砂岩, 平行层理, ZQ 101 井, 井深 6299.68~6299.89 m; b—褐色中细砂岩, 上部见平行层理, 下部为冲刷面, ZQ 2 井, 井深 6342.66~6342.82 m; c—褐色细砂岩与褐色泥岩, 河道废弃面, ZQ 2 井, 井深 6347.34~6347.5 m; d—褐色中细砂岩与褐色泥岩, 上部见泥砾, ZQ 2 井, 井深 6337.36~6337.59 m; e—灰色中细砂岩, 块状构造, ZQ 2 井, 井深 6336.07~6336.29 m; f—褐色细砂岩, 见低角度斜交缝, ZQ 102 井, 井深 6206.01~6206.03 m

图 2 库车坳陷秋里塔格构造带巴什基奇组岩性及沉积构造特征

Fig. 2 Lithology and sedimentary structures of the Bashijiqike Formation in Qiulitage structural belts in Kuqa Depression



a—残余原生粒间孔，中粗粒长石岩屑砂岩，ZQ 101 井，井深 6298.19 m，单偏光；b—残余原生粒间孔，中粒岩屑长石砂岩，ZQ 101 井，井深 6330.70 m，单偏光；c—主要为残余原生粒间孔，其次为粒间溶孔、粒内溶孔，中粒长石岩屑砂岩，DQ 8 井，井深 5204.38 m，单偏光；d—主要为粒间溶孔，其次为粒内溶孔，局部发育微孔隙，中粒长石岩屑砂岩，DQ 8 井，井深 5055.57 m，单偏光

图 3 库车坳陷秋里塔格构造带巴什基奇克组储集空间特征

Fig. 3 Pore spaces of the Bashijiqi Formation in Qilitage structural belts in Kuqa Depression

有重要的意义（赖锦等，2023b）。本次研究侧重现今应力场，其可以分解成垂向应力（ $S_v$ ）、水平最大（ $SH_{max}$ ）和最小主压应力（ $Sh_{min}$ ）方向，而根据现今三轴应力场相对大小可以划分出拉伸（ $S_v > SH_{max} > Sh_{min}$ ）、挤压（ $SH_{max} > Sh_{min} > S_v$ ）和走滑应力场（ $SH_{max} > S_v > Sh_{min}$ ）（Zoback, 2003; Verweij *et al.*, 2016; 赖锦等，2023b; Lai *et al.*, 2024）。

库车地区白垩系储集层超深埋背景导致其承受较大的上覆地层应力，此外古近纪以来库车坳陷受南天山造山带影响，承受了强烈的水平挤压应力作用，不仅形成了复杂的推覆构造样式，同时也对储集层品质产生了重要影响。一方面，伴随着构造压实作用，储集层原生孔隙减少，基质储集层物性变差；另一方面强烈的挤压应力也导致前期形成的天

然裂缝闭合，降低裂缝的有效性。

### 3.2 地应力测井评价

地应力实验测试数据较少，因此亟需通过测井资料实现地应力测井评价。现今地应力的方向可通过成像测井拾取井壁崩落和诱导缝方位来确定，二者分别指示现今最小和最大水平主应力方向（Lai *et al.*, 2018; 赖锦等，2024）。

综合考虑弹性模量对地应力的影响，本次研究采用三轴应力测井计算模型来实现三轴地应力场特征综合评价。其中，某一深度地层的垂向应力（ $S_v$ ）是指该深度以上地层岩石骨架总重力产生的应力：

$$S_v = \int_0^H \rho g dz \quad (1)$$

式中， $S_v$  为垂向应力； $H$  为埋藏深度，m； $\rho$  为岩

石密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $g$  为重力加速度  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。

而水平地应力主要由两部分组成, 其一是由于垂向应力造成, 即水平主应力一部分为  $S_v$  和泊松比的函数, 即  $\frac{\nu}{1-\nu}S_v$ ; 其二是由构造运动所产生的附加应力, 由于构造挤压各个方向不等, 且通常构造应力在 2 个方向上都存在, 因此水平应力存在最大  $SH_{\max}$  和最小  $Sh_{\min}$  之分 (黄荣樽等, 1995; 单钰铭等, 2010)。

$$SH_{\max} = \frac{\nu}{1-\nu}S_v + \frac{1-2\nu}{1-\nu}\alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2}\varepsilon_H + \frac{E\nu}{1-\nu^2}\varepsilon_h \quad (2)$$

$$Sh_{\min} = \frac{\nu}{1-\nu}S_v + \frac{1-2\nu}{1-\nu}\alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2}\varepsilon_h + \frac{E\nu}{1-\nu^2}\varepsilon_H \quad (3)$$

式中,  $SH_{\max}$  和  $Sh_{\min}$  分别为水平最大和最小主应力大小,  $P_p$  为孔隙流体压力, 可以用伊顿法计算。  $E$  为杨氏模量,  $\text{GPa}$ 。  $\nu$  为泊松比, 无量纲, 该参数可用密度测井以及声波测井资料计算。而  $\varepsilon_H$  和  $\varepsilon_h$  分别为最大和最小应力校正系数, 可以通过实验数据和井场地应力测试分析刻度所获得 (张辉等, 2019; 徐珂等, 2021; 赖锦等, 2023a; Lai *et al.*, 2024)。

以 ZQ 2 井为例, 首先通过伊顿法利用声波时差测井资料计算了孔隙流体压力, 可以看到测井计算的孔隙压力与实测 MDT 资料的数据点刻度良好。进一步通过声波时差以及密度测井曲线计算了泊松比、杨氏模量岩石力学参数, 然后通过积分法根据公式 (1) 计算了垂向应力, 再然后实现了水平方向  $SH_{\max}$  和  $Sh_{\min}$  应力大小测井评价。由此实现了三轴地应力测井综合评价, ZQ 2 井单井垂向应力随着深度增大而增大, 同时水平方向上  $SH_{\max}$  和  $Sh_{\min}$  应力不断变化, 指示了地应力分布较为复杂的地质特征 (图 4)。且 ZQ 2 井计算处理的三轴应力大小具有  $SH_{\max} > S_v > Sh_{\min}$  的特征, 为典型的走滑应力场模式 (图 4)。

#### 4 应力控储效应及优质储集层评价

库车拗陷深层-超深层岩石力学性质、地应力研究对油气勘探和开发有重要意义, 尤其是现今地

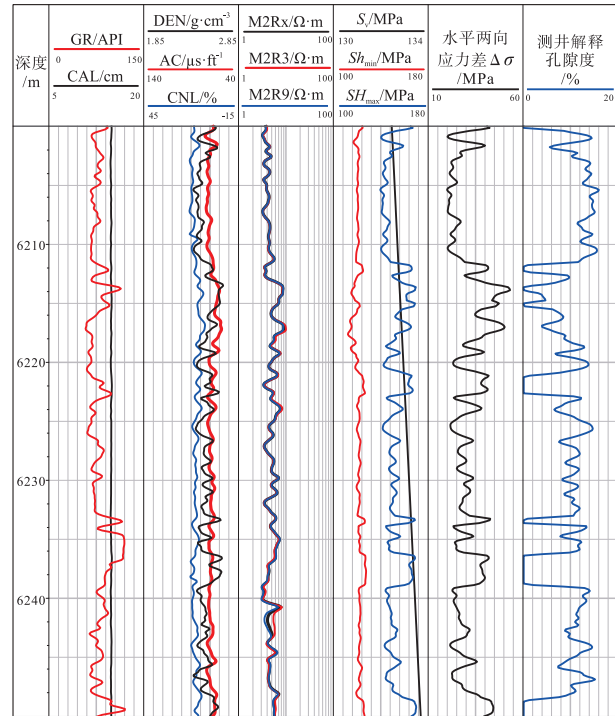


图 4 库车拗陷秋里塔格构造带巴什基奇克组三轴应力测井评价

Fig. 4 Logging evaluation of *in situ* stress of the Bashijiqike Formation in Qiulitage structural belts in Kuqa Depression

应力及其控制下的裂缝状态, 对储集层品质和气井产能起关键作用 (张辉等, 2019; 徐珂等, 2021; Lai *et al.*, 2024)。库车拗陷白垩系整体上处于强构造应力区, 地应力对储集层品质影响较大, 与凹陷区砂岩压实强度不同, 强挤压应力区储集层经历压实作用既包括垂向压实 (上覆岩层重力产生), 同时还包括侧向“压实” (水平构造挤压引起) (王珂等, 2022; 赖锦等, 2023a)。超深层储集层上覆压力最大可超过 200 MPa, 水平应力差可超过 50 MPa (徐珂等, 2022)。对于鄂尔多斯盆地延长组拗陷型湖盆河流三角洲沉积体系砂岩储集层, 通过沉积微相+成岩相+裂缝相叠加即可实现优质储集体预测 (赖锦等, 2013; 单祥等, 2016)。而山前前陆盆地储集层品质受地应力场影响较大, 其储集层综合评价与预测必须考虑地应力场的影响 (赖锦等, 2023a)。现今应力场则主要作用于岩石骨架和裂缝面, 影响储集层品质 (Lai *et al.*, 2019; 徐珂等, 2022)。

在垂向压实以及侧向挤压的共同作用下, 储集层基质孔隙缩小, 同时现今地应力场还将控制天然

裂缝的启闭性，在相对弱挤压应力区，如背斜中和面之上的张应力场区域，裂缝相对易于保持开启，而中和面之下的强挤压应力场区域，天然裂缝在强应力作用下将闭合 (Lai *et al.*, 2019; 冯建伟等, 2020; 徐珂等, 2021; 王珂等, 2022)。研究表明，水平两向应力差 ( $\Delta\sigma = SH_{\max} - Sh_{\min}$ ) 是控制储集层品质和裂缝张开度等重要参数 (Lai *et al.*, 2019)。一般  $\Delta\sigma$  较低时，储集层基质孔隙较大，且天然裂缝开启性较好；而  $\Delta\sigma$  较高时，天然裂缝将逐渐闭合且基质孔隙将逐渐降低。

#### 4.1 地应力场与基质孔隙关系

库车坳陷在喜山运动以来，遭受强烈的构造挤压变形，在此过程中储集层内部聚集了较强的应力场，应力场（方向与大小）平面上分布复杂，且单井剖面上地应力各向异性明显 (张辉等, 2019; 徐珂等, 2021; 赖锦等, 2023a)。在强挤压应力场背景下，库车坳陷白垩系储集层品质受地应力控制显著，体现出明显的地应力控储效应。通过测井解释地应力与岩心测量孔隙度之间耦合关系表明，水平两向应力差 ( $\Delta\sigma = SH_{\max} - Sh_{\min}$ ) 与测井解释孔隙度之间为明显负相关关系 (图 5)。水平两向应力差较高的层段，岩石往往易于被压实致密，而相对水平两向应力差值  $\Delta\sigma$  较小的层段，岩石原生孔隙能得到一定程度的保留 (图 5)。水平方向上地应力主要由垂向应力在水平方向上分量以及构造侧向挤压构成，当  $\Delta\sigma$  较高时，说明水平方向上的构造挤压应力较强，因而岩石将变得较为致密，基质孔隙度

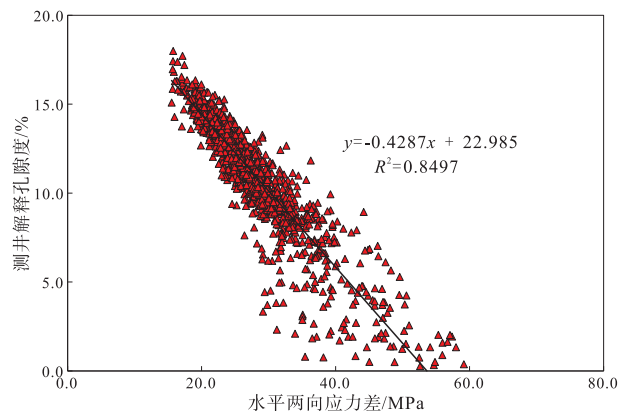


图 5 库车坳陷秋里塔格构造带白垩系储集层孔隙度与现今地应力关系

Fig. 5 Crossplot of porosity versus *in situ* stress of the Cretaceous reservoirs in Qiulitage structural belts in Kuqa Depression

降低 (Lai *et al.*, 2019)。随着水平两向应力差增大基质孔隙度逐渐减小，事实上，强烈构造挤压应力确实使砂岩颗粒排列紧密，粒间孔隙度大大降低 (张荣虎等, 2014)。

#### 4.2 地应力场与裂缝对应关系

裂缝在库车坳陷白垩系巴什基奇克组储集层中广泛发育，裂缝的发育有助于改善储集层渗流能力，且裂缝的存在利于地质流体的流动，对后续的生长等矿物溶蚀改造具有明显的促进作用，这也是为什么在库车坳陷强挤压应力场环境中部分裂缝仍有较高开度的原因 (图 6)。通常裂缝孔隙度小于 0.5% (Zeng and Li, 2009; 赖锦等, 2022)，但在部分应力较为松弛层段，即  $\Delta\sigma$  较小的层段，裂缝孔隙度最高可达到 2% 以上 (Lai *et al.*, 2023)。通过分析库车坳陷中秋区块白垩系储集层地应力与裂缝发育耦合关系发现，裂缝往往形成于低应力场区，随着  $\Delta\sigma$  增大，裂缝发育密度呈明显下降的趋势 (图 6)。当储集层发育裂缝时，复杂的挤压应力通过形成裂缝的形式释放出来，因而裂缝发育段，往往也对应低应力场区。因此作用于天然裂缝面的地应力将使得开启裂缝闭合，严重降低储集层渗透性能和流体流动能力 (张辉等, 2019; Lai *et al.*, 2024)。

#### 4.3 地应力与优质储集层评价

参照石油行业标准 (SY/T6285-2011) 关于储集层分类标准，结合生产实践 (中秋区块 6% 孔隙度一般为无效储集层) 以及地应力与储集层有效性的关系 (图 5)，同时参考岩性、物性参数以及现今水平两向应力差，可对中秋区块进行储集层分类评价，划分出 4 种储集层级别，其中 I 类、II 类、III 类为有效储集层，IV 类为非储集层 (表 1)。

由前述地应力与孔隙度耦合关系可知，孔隙度大于 6% 时， $\Delta\sigma$  小于 40 MPa，因此，当  $\Delta\sigma$  小于 40 MPa，可达到库车坳陷秋里塔格构造带白垩系储集层下限的标准，而 I 类储集层，即孔隙度大于 12% 的储集层，其  $\Delta\sigma$  一般小于 30 MPa，甚至小于 25 MPa (图 5)。因此，对于库车坳陷白垩系致密储集层，地应力控储效应明显，储集层区域评价与预测可通过地应力测井评价结合孔隙度等实现。中秋区块 ZQ 104 井，总体裂缝不发育，通过常规测井实现了孔隙度测井计算，同时结合声波测井、密

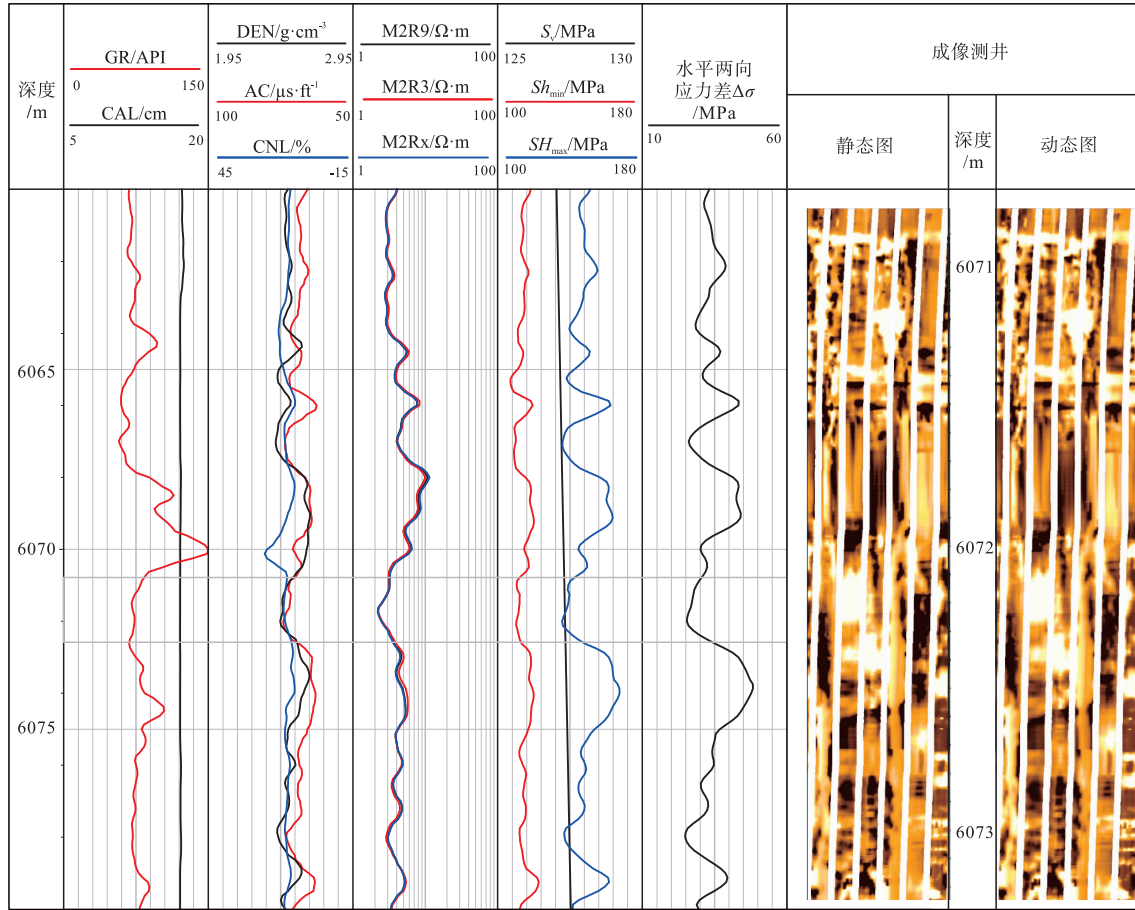


图 6 库车坳陷秋里塔格构造带白垩系地应力与裂缝发育对应关系 (油基钻井液背景成像测井裂缝识别效果较差)

Fig. 6 Crossplots of fracture development versus *in situ* stress of the Cretaceous sandstones in Qiulitage structural belts in Kuqa Depression

表 1 库车坳陷 ZQ 1 井区白垩系巴什基奇克组储集层评价标准

Table 1 Reservoir evaluation criteria of the Cretaceous Bashijiqike Formation in well area ZQ 1 in Kuqa Depression

储集层分类分级	I	II	III	IV
物性				
孔隙度/%	≥ 12	12~9	9~6	< 6
渗透率/10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	> 1	1~0.1	0.1~0.05	< 0.05
岩性	中砂岩、细砂岩	粉砂岩、细砂岩、含砾砂岩	灰质粉砂岩、含砾砂岩	泥质、灰质粉砂岩、含泥粉砂岩、砂砾岩
水平两向应力差/Ma	< 30	30~40	30~40	> 40
孔渗分级	低孔低渗	低孔特低渗	特低孔特低渗	致密层

度测井实现了三轴应力测井评价(图 7)。在此基础上通过水平两向应力差  $\Delta\sigma$  以及孔隙度值,即可实现优质储集层发育段评价(图 7)。

而基于应力控储效应的储集层评价预测结果也表明,该层段以 I 类和 II 类储集层占优势,去除 IV 类泥岩段外,具有高孔隙度和低应力场特征的 I 类和 II 类储集层占比较高(图 7),成像测井观察该口井井壁崩落较少,说明挤压应力相对中等偏弱

(徐珂等, 2021)(图 5)。通常深层-超深层井壁崩落的发育往往指示该井具有较强应力,通常难以获得高产(徐珂等, 2022)。而 ZQ 104 井 6007.5~6100 m 井段试油获得日产气 155 967 m<sup>3</sup>, 日产油 2.81 m<sup>3</sup>, 为中秋区块相对产能较高的井。因此,深层-超深层致密储集层应力控储效应明显(冯建伟等, 2020; 杨海军等, 2021)。库车坳陷中秋区块白垩系致密储集层也体现出明显的应力控储效应

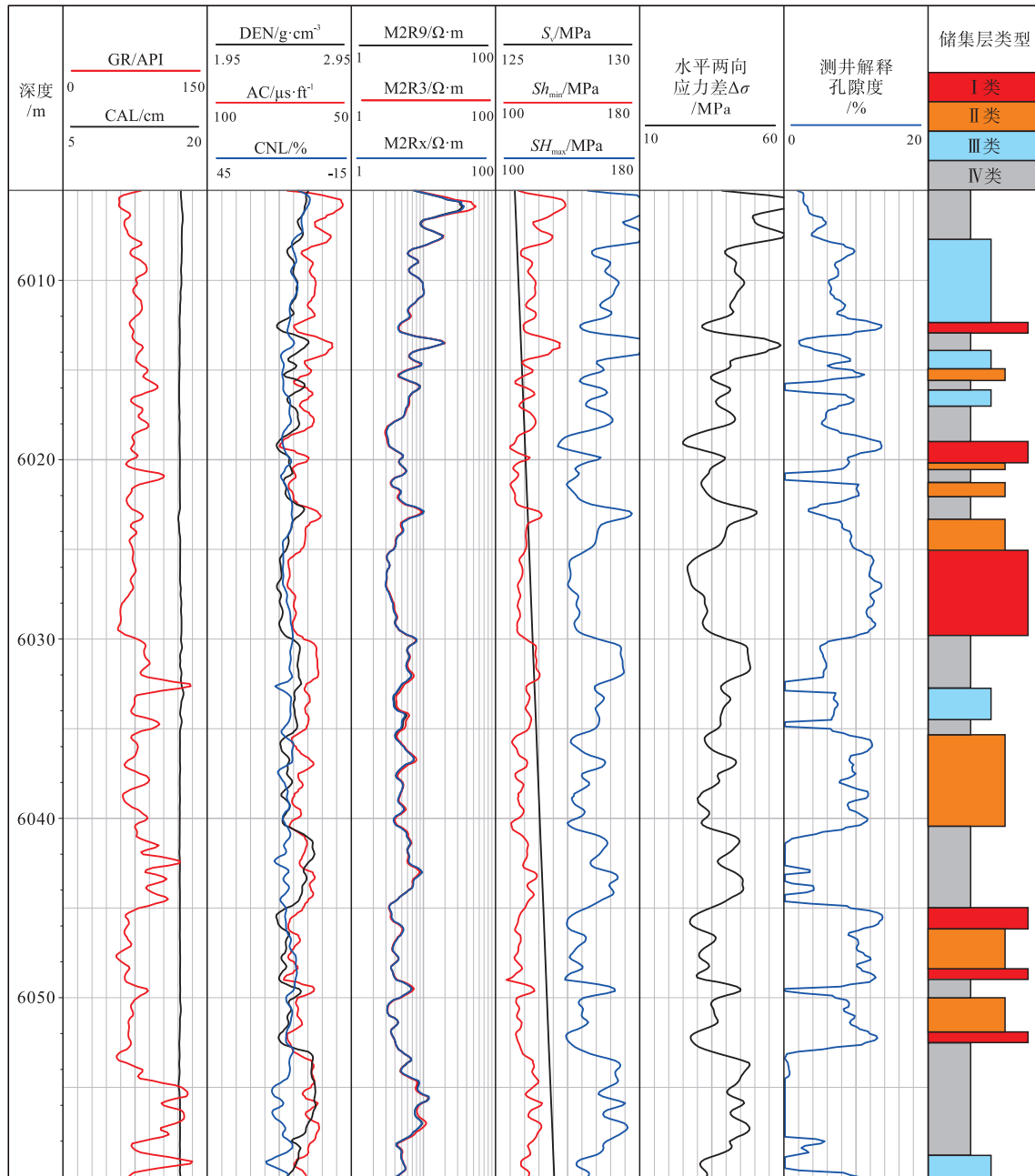


图 7 基于应力控储效应的库车坳陷秋里塔格构造带巴什基奇组优质储集层测井评价 (ZQ 104 井)  
 Fig. 7 Logging evaluation of *in situ* stress and high quality reservoirs of the Cretaceous Bashijiqi Formation in Qiulitage structural belts in Kuqa Depression (Well ZQ 104)

特征，因此通过地应力与基质孔隙结合可实现深层-超深层致密储集层评价与预测。

综上，水平两向应力差 ( $\Delta\sigma = SH_{max} - Sh_{min}$ ) 是控制储集层品质和裂缝张开度的重要参数。通过综合孔隙度、现今水平两向应力差，充分考虑深层-超深层储集层应力控储效应，可建立储集层评价标准。最终通过地应力与基质孔隙相结合可实现深层-超深层储集层评价与预测。

### 5 结论

1) 通过成像测井拾取井壁崩落和诱导缝方位，分别判断现今最小和最大水平主应力方向。再综合考虑弹性模量对地应力的影响，可以采用三轴应力测井计算模型，计算三轴应力 ( $S_v$ 、 $SH_{max}$ 、 $Sh_{min}$ ) 大小，并通过判断三者相对大小，得出应力场模式。以 ZQ 2 井白垩系巴什基奇组为例，

计算处理的三轴应力大小具有  $SH_{\max} > S_v > Sh_{\min}$  的特征, 为典型的走滑应力场模式。

2) 水平两向应力差 ( $\Delta\sigma = SH_{\max} - Sh_{\min}$ ) 是控制储集层品质和裂缝张开度的重要参数, 主要表现为:  $\Delta\sigma$  较低时, 储集层基质孔隙较大且天然裂缝开启性较好;  $\Delta\sigma$  较高时, 基质孔隙逐渐降低且天然裂缝逐渐闭合。 $\Delta\sigma$  较高的层段, 岩石被压实致密, 导致砂岩颗粒排列紧密, 粒间孔隙度大大降低; 反之, 压实强度小, 原生孔隙得到一定程度的保留。裂缝往往形成于低应力场区, 随着  $\Delta\sigma$  增大, 裂缝发育密度明显下降。

3) 综合岩性、物性参数、现今水平两向应力差以及地应力与储集层有效性的关系, 建立了中秋井区白垩系巴什基奇克组储集层评价标准。其中, I 类储集层 (孔隙度 > 12%) 表现为  $\Delta\sigma$  一般小于 30 MPa, 甚至小于 25 MPa。有效储集层 (孔隙度 > 6%) 对应的  $\Delta\sigma$  小于 40 MPa。深层-超深层致密储集层应力控储效应明显, 通过地应力与基质孔隙结合可实现深层-超深层储集层评价与预测。

### 参考文献 (References)

- 杜金虎, 王招明, 胡素云, 王清华, 谢会文. 2012. 库车前陆冲断带深层大气区形成条件与地质特征. 石油勘探与开发, 39(4): 385-393. [Du J H, Wang Z M, Hu S Y, Wang Q H, Xie H W. 2012. Formation and geological characteristics of deep giant gas provinces in the Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 39(4): 385-393]
- 杜金虎, 田军, 李国欣, 杨海军, 张义杰, 李勇, 徐振平, 罗浩渝. 2019. 库车坳陷秋里塔格构造带的战略突破与前景展望. 中国石油勘探, 24(1): 16-23. [Du J H, Tian J, Li G X, Yang H J, Zhang Y J, Li Y, Xu Z P, Luo H Y. 2019. Strategic breakthrough and prospect of Qiulitag structural belt in Kuqa Depression. China Petroleum Exploration, 24(1): 16-23]
- 冯建伟, 赵力彬, 王焰东. 2020. 库车坳陷克深气田超深层致密储层产能控制因素. 石油学报, 41(4): 478-488. [Feng J W, Zhao L B, Wang Y D. 2020. Controlling factors for productivity of ultra-deep tight reservoirs in Keshen gas field, Kuqa Depression. Acta Petrolei Sinica, 41(4): 478-488]
- 韩登林, 李忠, 寿建峰. 2011. 背斜构造不同部位储集层物性差异: 以库车坳陷克拉 2 气田为例. 石油勘探与开发, 38(3): 282-286. [Han D L, Li Z, Shou J F. 2011. Reservoir property difference between structural positions in the anticline: a case study from Kela-2 gas field in the Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 38(3): 282-286]
- 黄荣樽, 陈勉, 邓金根, 王康平, 陈治喜. 1995. 泥页岩井壁稳定力学与化学的耦合研究. 钻井液与完井液, 12(3): 18-24, 28. [Huang R Z, Chen M, Deng J G, Wang K P, Chen Z X. 1995. Study on shale stability of wellbore by mechanics coupling with chemistry method. Drilling Fluid & Completion Fluid, 12(3): 18-24, 28]
- 贾承造, 张荣虎, 魏国齐, 王珂, 余朝丰, 曾庆鲁, 司学强. 2023. 天山陆内冲断带构造动力控储效应与超深层规模储层. 石油学报, 44(8): 1191-1205. [Jia C Z, Zhang R H, Wei G Q, Wang K, Yu C F, Zeng Q L, Si X Q. 2023. Reservoir-controlling effects of tectonic dynamics and ultra-deep reservoirs in Tianshan intracontinental thrust belt. Acta Petrolei Sinica, 44(8): 1191-1205]
- 赖锦, 王贵文, 陈敏, 王书南, 柴毓, 蔡超, 张永辰, 李鉴伦. 2013. 基于岩石物理相划分的储层孔隙结构分类评价: 以鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8 油层组为例. 石油勘探与开发, 40(5): 566-573. [Lai J, Wang G W, Chen M, Wang S N, Cai M, Cai C, Zhang Y C, Li J L. 2013. Pore structures evaluation of low permeability clastic reservoirs based on petrophysical facies: a case study on Chang 8 reservoir in the Jiyuan region, Ordos Basin. Petroleum Exploration and Development, 40(5): 566-573]
- 赖锦, 王贵文, 庞小娇, 韩宗晏, 李栋, 赵仪迪, 王松, 江程舟, 李红斌, 黎雨航. 2021. 测井地质学前世、今生与未来: 写在《测井地质学·第二版》出版之时. 地质论评, 67(6): 1804-1828. [Lai J, Wang G W, Pang X J, Han Z Y, Li D, Zhao Y D, Wang S, Jiang C Z, Li H B, Li Y H. 2021. The past, present and future of well logging geology: to celebrate the publication of second edition of "Well Logging Geology". Geological Review, 67(6): 1804-1828]
- 赖锦, 庞小娇, 赵鑫, 赵仪迪, 王贵文, 黄玉越, 李红斌, 黎雨航. 2022. 测井地质学研究典型误区与科学思维. 天然气工业, 42(7): 31-44. [Lai J, Pang X J, Zhao X, Zhao Y D, Wang G W, Huang Y Y, Li H B, Li Y H. 2022. Typical misunderstandings and scientific thinking in well logging geology. Natural Gas Industry, 42(7): 31-44]
- 赖锦, 肖露, 赵鑫, 赵飞, 黎雨航, 朱世发, 王贵文, 刘宏坤. 2023a. 深层-超深层优质碎屑岩储层成因与测井评价方法: 以库车坳陷白垩系巴什基奇克组为例. 石油学报, 44(4): 612-625. [Lai J, Xiao L, Zhao X, Zhao F, Li Y H, Zhu S F, Wang G W, Liu H K. 2023a. Genesis and logging evaluation of deep to ultra-deep high-quality clastic reservoirs: a case study of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa Depression. Acta Petrolei Sinica, 44(4): 612-625]
- 赖锦, 白天宇, 肖露, 赵飞, 李栋, 李红斌, 王贵文, 张荣虎. 2023b. 地应力测井评价方法及其地质与工程意义. 石油与天然气地质, 44(4): 1033-1043. [Lai J, Bai T Y, Xiao L, Zhao F, Li D, Li H B, Wang G W, Zhang R H. 2023b. Well-logging evaluation of in-situ stress field and its geological and engineering significances. Oil & Gas Geology, 44(4): 1033-1043]
- 赖锦, 肖露, 白天宇, 范旗轩, 黄玉越, 李红斌, 赵飞, 王贵文. 2024. 成像测井解释评价方法及其地质应用. 地质科技通报, 43(3): 323-340. [Lai J, Xiao L, Bai T Y, Fan Q X, Huang Y Y, Li H B, Zhao F, Wang G W. 2024. Interpretation and evaluation methods of image logs and their geological applications. Bulletin of Geological Science and Technology, 43(3): 323-340]
- 雷刚林, 谢会文, 张敬洲, 王月然, 黄少英, 叶茂林, 张国伟. 2007. 库车坳陷克拉苏构造带构造特征及天然气勘探. 石油与天然气地质, 28(6): 816-820, 835. [Lei G L, Xie H W, Zhang J Z, Wang

- Y R, Huang S Y, Ye M L, Zhang G W. 2007. Structural features and natural gas exploration in the Kelasu structural belt, Kuqa, Depression. *Oil & Gas Geology*, 28(6): 816-820, 835]
- 李忠, 张丽娟, 寿建峰, 韩登林, 沈杨, 张惠良. 2009. 构造应变与砂岩成岩的构造非均质性: 以塔里木盆地库车坳陷研究为例. *岩石学报*, 25(10): 2320-2330. [Li Z, Zhang L J, Shou J F, Han D L, Shen Y, Zhang H L. 2009. Structural strain and structural heterogeneity of sandstone diagenesis: a case study for the Kuqa subs basin in the northern Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2320-2330]
- 单祥, 陈能贵, 郭华军, 唐勇, 孟祥超, 邹志文, 徐洋. 2016. 基于岩石物理相的砂砾岩储层分类评价: 以准噶尔盆地玛 131 井区块百二段为例. *沉积学报*, 34(1): 149-157. [Shan X, Chen N G, Guo H J, Tang Y, Meng X C, Zou Z W, Xu Y. 2016. Reservoir evaluation of sand-conglomerate reservoir based on peteophysical facies: a case study on Bai 2 reservoir in the Ma131 region, Junggar Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(1): 149-157]
- 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. *矿物岩石*, 30(3): 69-76. [Shan Y M, Zhou W, Tong K J, Xie R C. 2010. Application of synthetic evaluation for present ground stress field in deep formation of XC Gas Field in western Sichuan. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 30(3): 69-76]
- 苏洋, 赖锦, 别康, 李栋, 赵飞, 陈康军, 李红斌, 王贵文. 2025. 深层超深层钻井地质信息测井拾取与评价. *古地理学报*, 27(1): 225-239. [Su Y, Lai J, Bie K, Li D, Zhao F, Chen K J, Li H B, Wang G W. 2025. Well logging evaluation and characterization of geological information for deep and ultra-deep drilling wells. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(1): 225-239]
- 孙龙德, 邹才能, 朱如凯, 张云辉, 张水昌, 张宝民, 朱光有, 高志勇. 2013. 中国深层油气形成、分布与潜力分析. *石油勘探与开发*, 40(6): 641-649. [Sun L D, Zou C N, Zhu R K, Zhang Y H, Zhang S C, Zhang B M, Zhu G Y, Gao Z Y. 2013. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China. *Petroleum Exploration and Development*, 40(6): 641-649]
- 唐雁刚, 杨宪彰, 谢会文, 徐振平, 魏红兴, 谢亚妮. 2021. 塔里木盆地库车坳陷侏罗系阿合组致密气藏特征与勘探潜力. *中国石油勘探*, 26(4): 113-124. [Tang Y G, Yang X Z, Xie H W, Xu Z P, Wei H X, Xie Y N. 2021. Tight gas reservoir characteristics and exploration potential of Jurassic Ahe Formation in Kuqa Depression, Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 26(4): 113-124]
- 王珂, 张荣虎, 曾庆鲁, 王俊鹏, 夏九峰, 莫涛. 2022. 库车坳陷博孜一大北地区下白垩统深层-超深层储层特征及成因机制. *中国矿业大学学报*, 51(2): 311-328. [Wang K, Zhang R H, Zeng Q L, Wang J P, Xia Q F, Mo T. 2022. Characteristics and formation mechanism of Lower Cretaceous deep and ultra-deep reservoir in Bozi-Dabei area, Kuqa Depression. *Journal of China University of Mining & Technology*, 51(2): 311-328]
- 魏国齐, 王俊鹏, 曾联波, 唐永亮, 王珂, 刘甜甜, 杨钰. 2020. 克拉苏构造带盐下超深层储层的构造改造作用与油气勘探新发现. *天然气工业*, 40(1): 20-30. [Wei G Q, Wang J P, Zeng L B, Tang Y L, Wang K, Liu T T, Yang Y. 2020. Structural reworking effects and new exploration discoveries of subsalt ultra-deep reservoirs in the Kelasu tectonic zone. *Natural Gas Industry*, 40(1): 20-30]
- 信毅, 王贵文, 刘秉昌, 王冰, 艾勇, 蔡德洋, 曹军涛, 赵新建. 2024. 库车坳陷侏罗系致密砂岩气藏“三品质”测井评价. *地球科学*, 49(6): 2085-2102. [Xin Y, Wang G W, Liu B C, Wang B, Ai Y, Cai D Y, Cao J T, Zhao X J. 2024. Well logging evaluation of “three quality” of Jurassic tight gas sandstone reservoirs in Kuqa Depression. *Earth Science*, 49(6): 2085-2102]
- 徐珂, 杨海军, 张辉, 王海应, 袁芳, 王朝辉, 李超. 2021. 克拉苏构造带博孜 1 气藏现今地应力场和高效开发. *新疆石油地质*, 42(6): 726-734. [Xu K, Yang H J, Zhang H, Wang H Y, Yuan F, Wang C H, Li C. 2021. Current in-situ stress field and efficient development of Bozi-1 gas reservoir in Kelasu structural belt. *Xinjiang Petroleum Geology*, 42(6): 726-734]
- 徐珂, 田军, 杨海军, 张辉, 鞠玮, 刘新宇, 王志民, 房璐. 2022. 塔里木盆地库车坳陷超深层现今地应力对储层品质的影响及实践应用. *天然气地球科学*, 33(1): 13-23. [Xu K, Tian J, Yang H J, Zhang H, Ju W, Liu X Y, Wang Z M, Fang L. 2022. Effects and practical applications of present-day in-situ stress on reservoir quality in ultradeep layers of Kuqa Depression, Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 33(1): 13-23]
- 杨海军, 李勇, 唐雁刚, 雷刚林, 周鹏, 周露, 许安明, 邹志鹏, 朱文慧, 陈维力, 胡春雷, 杨敬博. 2021. 塔里木盆地克深气田成藏条件及勘探开发关键技术. *石油学报*, 42(3): 399-414. [Yang H J, Li Y, Tang Y G, Lei G L, Zhou P, Zhou L, Xu A M, Huan Z P, Zhu W H, Chen W L, Hu C L, Yang J B. 2021. Accumulation conditions, key exploration and development technologies for Keshen gas field in Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 42(3): 399-414]
- 印兴耀, 马妮, 马正乾, 宗兆云. 2014. 地应力预测技术的研究现状与进展. *石油物探*, 57(4): 488-504. [Yin X Y, Ma N, Ma Z Q, Zong Z Y. 2014. Review of in-situ stress predicted technology. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 57(4): 488-504]
- 张辉, 尹国庆, 王志民, 王海应. 2019. 库车坳陷深层裂缝性砂岩气藏可压裂性评价. *新疆石油地质*, 40(1): 108-115. [Zhang H, Yin G Q, Wang Z M, Wang H Y. 2019. Fracability evaluation of deep-burial fractured sandstone gas reservoir in Kuqa Depression. *Xinjiang Petroleum Geology*, 40(1): 108-115]
- 张惠良, 张荣虎, 杨海军, 寿建峰, 王俊鹏, 刘春, 陈戈. 2014. 超深层裂缝-孔隙型致密砂岩储集层表征与评价: 以库车前陆盆地克拉苏构造带白垩系巴什基奇克组为例. *石油勘探与开发*, 41(2): 158-167. [Zhang H L, Zhang R H, Yang H J, Shou J F, Wang J P, Liu C, Chen G. 2014. Characterization and evaluation of ultra-deep fracture-pore tight sandstone reservoirs: a case study of Cretaceous Bashiji qike Formation in Kelasu tectonic zone in Kuqa foreland basin, Tarim, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 41(2): 158-167]
- 张荣虎, 杨海军, 王俊鹏, 寿建峰, 曾庆鲁, 刘群. 2014. 库车坳陷超深层低孔致密砂岩储层形成机制与油气勘探意义. *石油学报*, 35(6): 1057-1069. [Zhang R H, Yang H J, Wang J P, Shou J F, Zeng Q L, Liu Q. 2014. The formation mechanism and exploration and exploration significance of ultra-deep, low-porosity and tight sandstone reservoirs in Kuqa Depression, Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 35(6): 1057-1069]

- Sinica, 35(6): 1057–1069]
- 张荣虎, 王俊鹏, 马玉杰, 陈戈, 曾庆鲁, 周晨光. 2015. 塔里木盆地库车坳陷深层沉积微相古地貌及其对天然气富集的控制. 天然气地球科学, 26(4): 667–678. [Zhang R H, Wang J P, Ma Y J, Chen G, Zeng Q L, Zhou C G. 2015. The sedimentary microfacies, palaeogeomorphology and their controls on gas accumulation of deep-buried cretaceous in Kuqa Depression, Tarim Basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 26(4): 667–678]
- 张荣虎, 王俊鹏, 唐雁刚, 赵建权, 曾庆鲁. 2017. 超深层砂岩黏土矿物特征及其对储层物性的定量控制作用: 以库车前陆冲断带白垩系巴什基奇克组为例. 地质科学, 52(4): 1340–1355. [Zhang R H, Wang J P, Tang Y G, Zhao J Q, Zeng Q L. 2017. Characteristics of clay minerals in ultra-deep sandstone and their quantitative control on reservoir physical properties: a case study of Cretaceous Bashijiqik Formation in Kuqa foreland thrust belt. *Chinese Journal of Geology*, 52(4): 1340–1355]
- 张荣虎, 魏国齐, 王珂, 魏红兴, 杨钊, 余朝丰, 智凤琴. 2021. 前陆冲断带构造逆冲推覆作用与岩石响应特征: 以库车坳陷东部中一下侏罗统为例. 岩石学报, 37(7): 2256–2270. [Zhang R H, Wei G Q, Wang K, Wei H X, Yang Z, Yu C F, Zhi F Q. 2021. Tectonic thrust nappe activity and sandstone rock response characteristics in foreland thrust belt: a case study of Middle and Lower Jurassic, Kuqa Depression, Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 37(7): 2256–2270]
- 赵文智, 胡素云, 刘伟, 王铜山, 姜华. 2015. 论叠合含油气盆地多勘探“黄金带”及其意义. 石油勘探与开发, 42(1): 1–12. [Zhao W Z, Hu S Y, Liu W, Wang T S, Jiang H. 2015. The multi-staged “golden zones” of hydrocarbon exploration in superimposed petroliferous basins of onshore China and its significance. *Petroleum Exploration and Development*, 42(1): 1–12]
- 朱如凯, 郭宏莉, 高志勇, 韩丹, 张丽娟, 孙玉善, 程明. 2007. 塔里木盆地北部地区白垩系—古近系储集性与储层评价. 中国地质, 34(5): 837–842. [Zhu R K, Guo H L, Gao Z Y, Han D, Zhang L J, Sun Y S, Cheng M. 2007. Characteristics and evaluation of Cretaceous-Paleogene reservoirs in the northern Tarim Basin. *Geology in China*, 34(5): 837–842]
- Dixit N C, Hanks A L, Wallace W K, Ahmadi M, Awoleke O. 2017. In situ stress variations associated with regional changes in tectonic setting, northeastern Brooks Range and eastern North Slope of Alaska. *AAPG Bulletin*, 101(3): 343–360.
- Lai J, Wang G W, Chai Y, Xin Y, Wu Q K, Zhang X T, Sun Y H. 2017. Deep burial diagenesis and reservoir quality evolution of high-temperature, high-pressure sandstones: examples from Lower Cretaceous Bashijiqike Formation in Keshen area, Kuqa Depression, Tarim Basin of China. *AAPG Bulletin*, 101(6): 829–862.
- Lai J, Wang G W, Wang S, Cao J T, Li M, Pang X J, Han C, Fan X Q, Yang L, He Z B, Qin Z Q. 2018. A review on the applications of image logs in structural analysis and sedimentary characterization. *Marine and Petroleum Geology*, 95: 139–166.
- Lai J, Li D, Wang G W, Xiao C W, Hao X L, Luo Q Y, Lai L B, Qin Z Q. 2019. Earth stress and reservoir quality evaluation in high and steep structure: the Lower Cretaceous in the Kuqa Depression, Tarim Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 101: 43–54.
- Lai J, Zhao F, Zhang M, Bai T Y, Huang Y Y, Li D, Wang G W, Qin Z Q. 2023. How high can fracture porosity become in the ultra-deep subsurface? *Geoscience Frontiers*, 14: 101617.
- Lai J, Su Y, Xiao L, Zhao F, Bai T Y, Li Y H, Li H B, Huang Y Y, Wang G W, Qin Z Q. 2024. Application of geophysical well logs in solving geologic issues: past, present and future prospect. *Geoscience Frontiers*, 15: 101779.
- Su Y, Lai J, Dang W L, Bie K, Zhao Y D, Zhao X J, Li D, Zhao F, Wang G W. 2024. Pore structure characterization and reservoir quality prediction in deep and ultra-deep tight sandstones by integrating image and NMR logs. *Journal of Asian Earth Sciences*, 272: 106232.
- Verweij J M, Boxem T A P, Nelskamp S. 2016. 3D spatial variation in vertical stress in on-and offshore Netherlands: integration of density log measurements and basin modeling results. *Marine and Petroleum Geology*, 78: 870–882.
- Xin Y, Wang G W, Liu B C, Ai Y, Cai D Y, Yang S W, Liu H K, Xie Y Q, Chen K J. 2022. Pore structure evaluation in ultra-deep tight sandstones using NMR measurements and fractal analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 211: 110180.
- Xu K, Yang H J, Zhang H, Ju W, Li C, Fang L, Wang Z M, Wang H Y, Yuan F, Zhao B, Zhang W, Liang J R. 2022. Fracture effectiveness evaluation in ultra-deep reservoirs based on geomechanical method, Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 215: 110604.
- Zeng L B, Li X Y. 2009. Fractures in sandstone reservoirs with ultra-low permeability: a case study of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, China. *AAPG Bulletin*, 93(4): 461–477.
- Zhu G Y, Wang H T, Weng N, Yang H J, Zhang K, Liao F G, Neng Y. 2015. Geochemistry, origin and accumulation of continental condensate in the ultra-deep-buried Cretaceous sandstone reservoir, Kuqa Depression, Tarim Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 65: 103–113.
- Zoback M D, Barton C A, Brudy M, Castillo D A, Finkbeiner T, Grollmund B R, Moos D B, Peska P, Ward C D, Wiprut D J. 2003. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40: 1049–1076.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 陈吉涛)