

## 深层超深层钻井地质信息测井拾取与评价\*

苏 洋<sup>1,2</sup> 赖 锦<sup>1,2</sup> 别 康<sup>3</sup> 李 栋<sup>2</sup>  
赵 飞<sup>2</sup> 陈康军<sup>4</sup> 李红斌<sup>2</sup> 王贵文<sup>1,2</sup>

1 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000

4 中国石油西南油气田分公司开发事业部, 四川省成都市 610017

**摘 要** 顺应国家深海、深地、深空和深蓝战略部署, 陆地钻井不断向深层超深层进军, 但深部极端环境测井资料获取困难, 钻井采集新技术(核磁共振、成像测井和阵列声波)测井少, 导致测井资料多解性强, 亟需利用有限的地球物理测井信息挖掘深层超深层钻井蕴含的地质信息。经过大量的文献调研, 论述了深层超深层测井评价的重点, 通过对典型研究案例的分析, 系统地梳理测井地质学在深层超深层领域的应用, 包括利用测井资料实现对构造地质现象解读、沉积学信息拾取、储集层评价与预测、储集层裂缝评价和对地应力评价。最后探讨了深层超深层领域发展趋势: 重视多角度数据的融合(岩心、实验资料和地震资料等数据), 并根据深层超深层环境的差异, 发展适应深层超深层环境因素的先进岩石物理模型。同时在大数据人工智能的发展背景下, 利用新技术测井的优势, 推进深层超深层领域测井地质学突破技术瓶颈。

**关键词** 深层超深层 地球物理测井 地质信息 拾取与刻画 测井地质学 人工智能

**第一作者简介** 苏洋, 女, 2002 年生, 在读博士研究生, 从事沉积储集层和测井地质学研究工作。E-mail: suyangcupb@163.com。

**通讯作者简介** 赖锦, 男, 1988 年生, 博士, 副教授, 博士生导师, 从事沉积储集层和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

## Well logging evaluation and characterization of geological information for deep and ultra-deep drilling wells

SU Yang<sup>1,2</sup> LAI Jin<sup>1,2</sup> BIE Kang<sup>3</sup> LI Dong<sup>2</sup>  
ZHAO Fei<sup>2</sup> CHEN Kangjun<sup>4</sup> LI Hongbin<sup>2</sup> WANG Guiwen<sup>1,2</sup>

1 National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

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

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

4 Development Division of Southwest Oil and Gasfield Company, Chengdu 610017, China

\* 国家自然科学基金(编号: 42002133)、中国石油大学(北京)科研启动基金(编号: 2462023QNXZ010)与中国石油—中国石油大学(北京)战略合作协议(编号: ZLZX2020-01)联合资助。[Co-funded by National Natural Science Foundation of China (No. 42002133), Science Foundation of China University of Petroleum, Beijing (No. 2462023QNXZ010) and strategic cooperation project of PetroChina and China University of Petroleum, Beijing (ZLZX2020-01)]

收稿日期: 2023-11-14 改回日期: 2024-03-12

**Abstract** In accordance with the strategic deployment of deep sea, deep earth, deep space and deep blue, land drilling is continuously entering towards deep and ultra-deep reservoirs. Fewer new technology logs are collected during drilling, resulting in strong multi-solution of logging data. Therefore, it is urgent to use the limited geophysical logging information to dig dive on the geological information contained in deep and ultra-deep drilling. This paper firstly discusses the focus of logging evaluation in deep and ultra-deep reservoirs based on extensive literature retrieval. Through the analysis of typical research cases, it systematically reviews the application of logging geology in deep and ultra-deep fields, including using logging data to interpret structural geological phenomena, pick up sedimentary information, evaluate and predict reservoir characteristics, and evaluate in-situ stress by using logging data. Finally, the development trend of deep and ultra-deep fields is discussed: paying attention to the integration of multi-angle data (such as core, experimental data, and seismic data), and developing advanced rock physical models that adapt to the environmental factors of deep and ultra-deep environments based on their differences. At the same time, in the context of the development of big data and artificial intelligence, the advantages of new technology logging are utilized to promote breakthroughs in the field of logging geology in deep and ultra-deep fields, thus breaking through technical bottlenecks.

**Key words** deep and ultra-deep, geophysical well logs, geological information, extraction and characterization, well logging geology, artificial intelligence

**About the first author** SU Yang, born in 2002, is a doctoral candidate of China University of Petroleum (Beijing). She is mainly engaged in sedimentology, reservoir geology and well logging geology. E-mail: suyangupb@163.com.

**About the corresponding author** LAI Jin, born in 1988, Ph. D., 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.

2023 年深地塔科 1 井（设计井深达 11 100 m）、深地川科 1 井（设计井深 10 520 m）和顺北跃进 3-3 井（设计垂深 9 472 m）3 口万米深井的开钻奏响了超深层油气勘探开发的序章，2023 年 11 月 15 日中国石化部署在塔里木的“深地一号”跃进 3-3XC 井日产原油 200 t、天然气 5 万 m<sup>3</sup> 更是谱写了挺进地下珠峰的壮丽篇章。国家“十三五”规划大纲明确提出加强“深海、深空、深地、深蓝”四深战略技术部署，万米深井钻探肩负着科学探索与深地油气发现两大重任，事实上，“深地”当下已成为油气发现主阵地，深层超深层油气虽表现为岩性致密、物性差和孔隙结构复杂的特征，但仍可发育规模储集层（何登发等，2019；郭旭升，2022；贾承造，2023）。深层超深层油气是引领未来油气勘探与开发的战略现实领域（贾承造，2023；Laubach *et al.*, 2023）。深层超深层取心困难，而地球物理测井是深入漆黑地下，洞察万米深井岩层信息、寻找并发现石油天然气等其他矿物宝

藏的重要手段。但目前针对深层超深层钻井中地球物理测井信息的地质挖掘与解读尚不完善，一方面是因为测井资料本身存在多解性，另一方面因为深层超深层钻井中新技术采集较少，限制了地球物理测井的广泛应用（赖锦等，2021a；王华和张雨顺，2021；Lai *et al.*, 2023）。

由于不同地区深层超深层特征差异较大深层超深层的深度界限并没有统一的标准。国际标准将超过埋深 4 500 m 油气藏定义为深层油气藏。中国由于东西地区地温梯度的差异，其对应标准有所区分。东部地区 3 500 ~ 4 500 m 为深层领域，大于 4 500 m 则为超深层领域；西部地区埋深在 4 500 ~ 6 000 m 为深层领域，大于 6 000 m 为超深层领域（郭旭升，2022；贾承造，2023；Laubach *et al.*, 2023）。深层超深层领域已有颇为成效的勘探成果，尤其西部塔里木深层超深层领域已经成为中国油气勘探开发的重要领域。为顺应此发展，地球物理测井与地质结合在深层超深层领域取得一定成

果, 总结为如下 4 方面的研究内容: (1) 岩性、沉积相和成岩相测井评价研究(赖锦等, 2013; 张凯逊等, 2016; Fan *et al.*, 2021; 刘宏坤等, 2023); (2) 裂缝测井评价与预测(赖锦等, 2015; 刘志远等, 2021; Yasin *et al.*, 2022); (3) 储集层地应力精细测井评价(肖承文等, 2018; Wang *et al.*, 2022; 赖锦等, 2023b); (4) 微观孔隙结构测井评价及优质储集层预测(王小敏和樊太亮, 2013; Wang *et al.*, 2023)。

以上研究为深入了解深层超深层地质结构和性质提供了重要的技术支持。但由于深层超深层孔隙结构复杂、非均质性强, 其在整个深层超深层领域推广难度颇大, 研究通过对典型案例分析, 以望扩展深层超深层领域测井的地质应用。通过大量文献调研, 首先论述了深层超深层测井评价的重点。阐述了测井资料在构造地质现象解读中的应用, 如测井资料可以拾取不整合面及断层等构造。概述了如何利用测井资料拾取深层超深层沉积学信息。归纳并总结出利用测井资料对储集层进行评价与预测的方法, 包括利用核磁测井资料对储集层孔隙结构进行测井评价, 利用成像测井结合常规测井对储集层裂缝进行评价。并对测井资料评价地应力的重要性和原理方法进行阐述, 优选组合弹簧模型进行地应力大小的计算, 通过获取诱导缝和井壁崩落的方向得到现今地应力的方向。最后探讨了深层超深层测井研究过程中存在的问题包括由于数据获取困难造成的多解性问题以及测井资料横向连续性较差的问题, 并对其未来的发展进行展望, 以期对未来深层超深层油气勘探提供参考和帮助。

## 1 深层超深层测井地质评价重点

具有不同纵向分辨率的集声、电、核及核磁多种测量方法和手段于一身的测井序列在构造地质学、沉积学和石油地质学等方面得到广泛应用(Al-Mudhafar, 2020; 赖锦等, 2021a; 李宁等, 2021)。地球物理测井资料作为多种地质信息的综合响应, 包含了岩性、物性、储集空间、流体性质和岩石蚀变作用结果等多重信息(Iqbal *et al.*, 2018; 赖锦等, 2023a)。然而地球物理测井往往具有多解性, 需要岩心资料的标定与刻度才能给出科学合理以及可靠的解释。岩心分析的数据往往为点数据, 而测井曲线读值或形态是一定范围内(纵

向分辨率)测井响应的综合反映, 因此测井和地质 2 套数据体之间是存在一定的误差(赖锦等, 2022)。深层超深层万米深井取心样品匮乏, 更凸显地球物理测井解释评价重要性, 常规测井以及成像测井、核磁和声波测井等新技术测井中包含了丰富地质信息, 通过精细处理与深入解读, 可加工转化成地质学家所需的地质信息, 从而为油气勘探开发提供理论指导与技术支持。

深层超深层钻井中, 通过测井资料解读出褶皱、断层和不整合面等地质构造有助于弥补地震资料识别盲区并且井震结合提高地质体识别刻画精度, 这对于油气勘探开发工作部署具有重要意义(赖锦等, 2023a)。此外, 沉积相、古水流研究需在缺乏岩心的情况下了解地下地层岩性、沉积构造和沉积序列特征, 测井资料尤其是成像测井资料蕴含丰富的沉积信息, 需求站在地质学家角度深入挖掘或解读出里面的沉积信息(Keeton *et al.*, 2015; Lai *et al.*, 2018)。深层超深层钻井中储集层评价与预测是油气勘探开发的重中之重, 规模储集层的发育与否成为深层超深层油气勘探的关键, 而利用地质与地球物理测井相结合的方法实现优质储集层预测工作具有现实意义(曾庆鲁等, 2020; 赖锦等, 2023a)。而储集层评价的重点为基质孔隙结构、裂缝, 此外, 考虑到深层超深层复杂的应力背景, 有效储集层和裂缝评价需考虑地应力影响(Lai *et al.*, 2022)。深层超深层中同样发育碳酸盐岩优质储集层, 其中的孔洞缝等储集空间的地质与地球物理精细刻画至关重要, 同时深层超深层领域碳酸盐岩断溶体和断缝体同样也是重要的油气储量增长点(Loucks, 1999; 赖锦等, 2021b; Li *et al.*, 2023)。

## 2 构造地质现象解读

地球物理测井通过获取超深钻井井下相关地层的物理属性和构造特征的信息, 从而解读井旁构造地质现象, 可以识别的地质构造包括断层、褶皱以及不整合面等(Lai *et al.*, 2018; 赖锦等, 2021a)。使用常规测井曲线可以指示岩性、物性等信息, 同时对地层倾角测井和井壁成像测井的处理解释, 直观地反映出地层构造特征, 并从中得到足够的信息计算井筒的产状(赖锦等, 2023a)。

不同测井技术相结合, 实现构造地质现象的精确识别。不整合面由于其上覆和下伏地层的物质组



成存在差异，使其测井曲线具有明显的测井响应特征（唐勇等，2022）。以塔中隆起地区钻探的中深5井为例，该井钻探的主力目的层为寒武系白云岩，往下则为前震旦系结晶基底，2套地层分界面通过地震资料难以确定。但是通过测井曲线解读，发现在深度6785 m的位置常规测井曲线产生异常突变，具体表现为GR突然增高又降低，中间的高GR、低密度和高声波时差段为典型的不整合面特征，成像测井在不整合面处表现为暗色块状，且不整合与上下地层具有明显的明暗截切突变的特征。而不整合面之下，GR测井曲线重新变为低值，但密度测井基本为 $3.0\text{ g/cm}^3$ 以上，说明不整合面之下岩性已经变为比较致密的变质岩。不整合面之上地层为寒武系肖尔布拉克组白云岩，不整合面之下地层为前震旦系浅变质岩。白云岩自然伽马值较低，同时电阻率较低，而浅变质岩由于其性质与上

层白云岩差距较大，表现为低GR和高密度( $>3.0\text{ g/cm}^3$ )特征，因此，通过常规测井技术和成像测井技术相结合，可对不整合面进行较为准确识别(图1)。

3 沉积学信息拾取

利用测井资料进行沉积微相的研究就是把定量的测井数据转化为具有地质意义的测井相模式，并根据其纵向变化趋势分析出目的层区纵向连续沉积相的演化特征（Folkestad *et al.*, 2012; Lai *et al.*, 2018）。常用于拾取沉积学信息的测井方法有常规测井、倾角测井和成像测井。其中，常规测井曲线形态、幅度、光滑程度等测井相特征变化能反映出沉积学信息，将其变化规律归纳总结，可为判别沉积微相类型提供资料（赖锦等，2021a）。而成像测井能提供地下高分辨率的图像（最高分辨率可

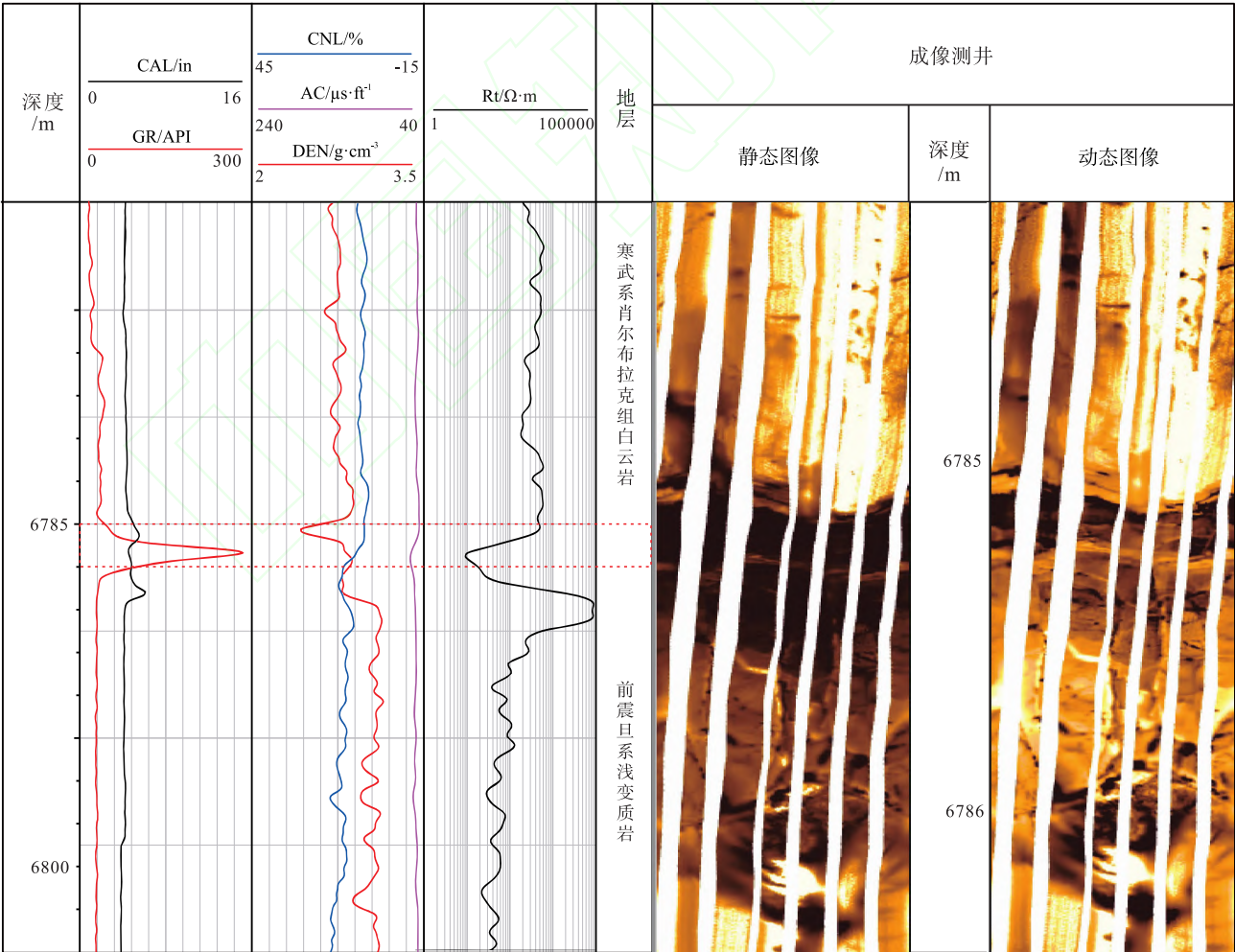


图 1 塔中隆起中深5井典型不整合面测井拾取与评价

Fig. 1 Logging pickout and evaluation of typical unconformity in Well ZS 5 in Tazhong uplift

达到 5 mm)，因此通过成像测井可以识别沉积层理甚至纹层（毫米级）等，进而分析出地层沉积构造特征（李宁等，2023）。

塔里木盆地库车坳陷白垩系巴什基奇克组埋深超过 6000 m，取心资料较少，但地质研究和油气勘探开发工作需求对沉积储集层特征精细描述，因此需挖掘成像测井、常规测井等资料所包含的地质信息，实现沉积学信息提取。研究表明，库车坳陷白垩系巴什基奇克组一段和二段以辫状河三角洲沉积体系为主，可划分出水下分流河道、水下分流河道间、河口坝等沉积微相（张荣虎等，2015；赖锦等，2018）。

图 2 中 6826~6829 m 井段，常规测井曲线钟型自然伽马曲线的特征，进一步通过成像测井可识别出底部的沉积冲刷面，同时可见明显沉积层理发

育。此外层理倾角向上逐渐减小，代表沉积水动力向上逐渐降低，为典型河道相冲刷、充填的特征。通过以上分析结合研究区地质背景，可以判断出此深度段为典型水下分流河道微相。因此结合常规测井和成像测井资料可建立沉积微相测井识别图版，从而实现单井沉积微相的连续划分。

4 储集层评价与预测

4.1 储集层基质孔隙结构测井评价

深层超深层储集层受多种复杂构造和成岩作用的影响，导致其孔隙结构较为复杂。深层超深层储集层品质一方面受到裂缝发育的影响，同时受控于孔隙结构的好坏，裂缝控制了油气储集层能否高产，但储集层的稳产与否受控于基质孔隙结构。孔

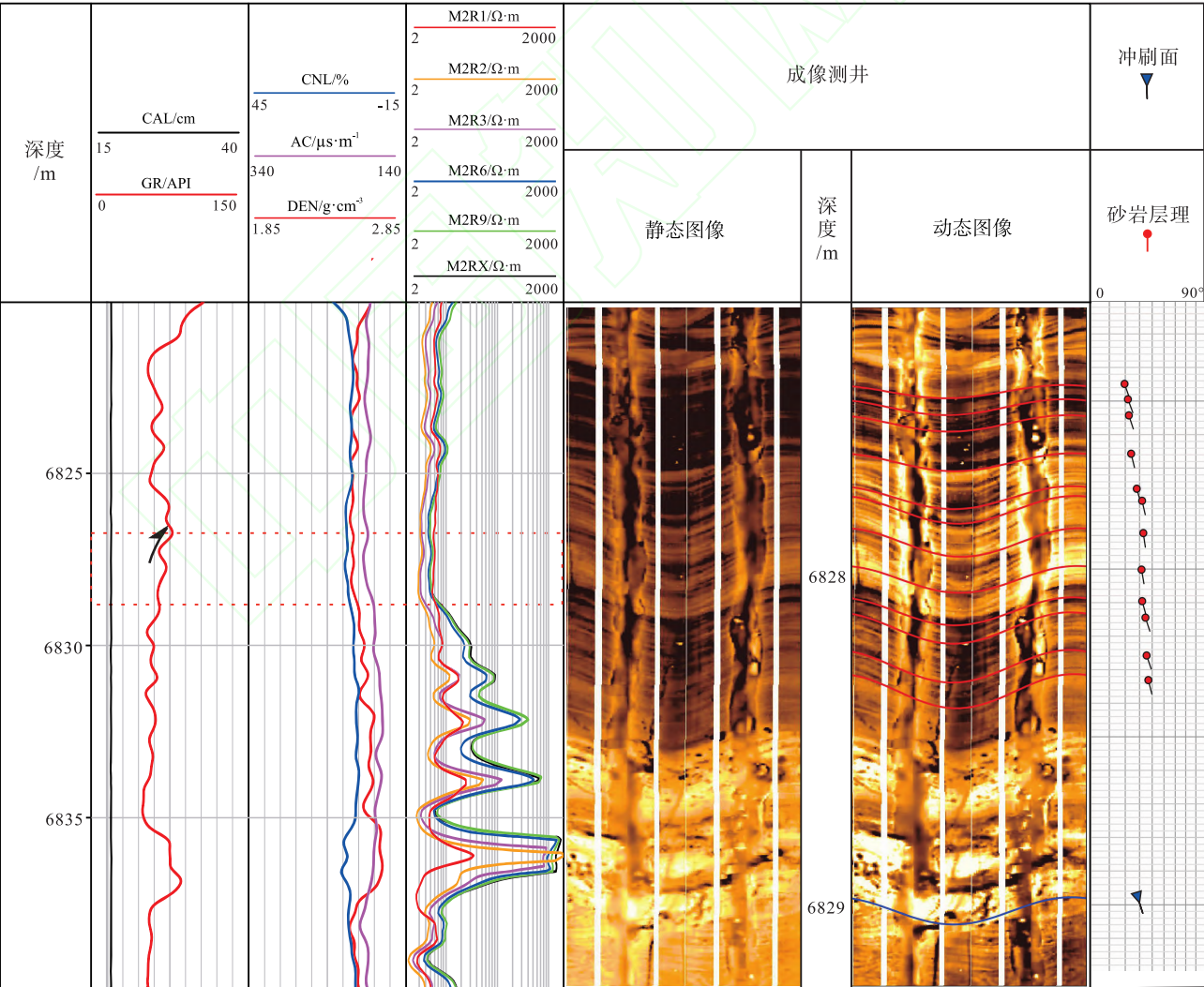


图 2 库车坳陷克深 207 井典型水下分流河道微相测井沉积学信息拾取

Fig. 2 Logging pickout of depositional information of typical underwater distributary channel microfacies in Well KS 207 in Kuqa Depression

隙结构影响着储集层储集和渗流能力,进而影响着油气的充注和运移 (Anovitz and Cole, 2015)。不像传统的测井方法,核磁共振测井因不被储集层岩石成分和骨架结构所影响,反映研究储集层内部孔隙结构,并帮助进行流体识别,是研究孔隙结构的优良手段 (Coates *et al.*, 1999; 李宁等, 2023)。

由核磁共振弛豫机制可知,横向弛豫过程受到自由弛豫、表面弛豫和扩散弛豫 3 种机制控制,它们之间的关系可由式 (1) 表示 (Kleinberg *et al.*, 1994; Coates *et al.*, 1999; Daigle *et al.*, 2014)。当回波间距较短且地层仅为盐水饱和时,表面松弛成为主导,上述表达式可简化为式 (2) (Daigle and Johnson, 2016)。

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2B}} + \frac{1}{T_{2D}} + \frac{1}{T_{2S}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \frac{S}{V} \quad (2)$$

其中  $T_2$  为横向弛豫时间,  $T_{2B}$ 、 $T_{2D}$ 、 $T_{2S}$  分别为体弛豫时间 (ms)、扩散诱导弛豫时间 (ms) 和表面弛豫时间 (ms); 由式 (2) 可见,  $T_2$  与孔径成正比。 $T_2$  值越大对应孔隙半径越大,同时也说明含油气性越好。因此,通过对  $T_2$  谱的分析,可以定性评价孔隙结构。而现今通过建立相应数学模型计算孔隙度、渗透率等参数可实现对孔隙结构的定量评价 (Coates *et al.*, 1999; Zhang *et al.*, 2018)。

同时核磁测井根据不同流体的核磁共振性质的差异,能够进行储集层流体性质的识别。一维核磁测井利用不同流体弛豫与扩散之间的差异,判断流体性质。主要方法有差谱法、移谱法和增强扩散谱法 (毛锐等, 2021)。随着技术的不断精进,二维核磁测井技术相对于一维核磁测井有着更好的流体识别效果。二维核磁共振流体识别方法主要包括扩散—横向弛豫时间法 ( $D-T_2$ )、扩散—纵向弛豫时间法 ( $D-T_1$ ) 和纵—横向弛豫时间法 ( $T_1-T_2$ ) (Huang *et al.*, 2023)。这些方法都是通过改变回波间隔或等待时间获取一系列自旋回波串,借助反演的方法获取二维谱图,从而进行流体识别 (谢然红等, 2009; 宁从前等, 2021)。

对库车拗陷克深 503 井核磁数据进行处理,对比可发现, 6910~6920 m 井段核磁共振  $T_2$  分布呈现单峰左偏,同时以短  $T_2$  弛豫组分为主,孔隙度、渗透率相对较低。6845~6885 m 井段  $T_2$  分布呈现

单峰右偏,同时以长  $T_2$  弛豫组分为主,表明此井段储集层孔隙结构相对发育较好,该井段范围内试气也获得了较高的产能 (图 3)。需要说明的是, 6870 m、6897 m 和 6918 m 深度段核磁  $T_2$  分布谱峰虽较高,但不代表物性和含气性好,而是井眼扩径造成 (图 3)。

## 4.2 储集层裂缝测井评价

深层超深层地层受到断裂发育及构造演化的综合影响,储集层中的裂缝较为发育 (王珂等, 2022; 赖锦等, 2023a)。构造裂缝作为深层超深层储集层有效储集空间和优势渗流通道,其测井评价对油气开采至关重要 (Zeng *et al.*, 2010; Lai *et al.*, 2017)。深层超深层领域井壁稳定性差,为了保护储集层、提高钻井效率 and 安全性,常采用油基钻井液钻井 (Guo *et al.*, 2020)。由于油基钻井液电阻率高,在有钻井液侵入时,常规测井曲线中电阻率曲线易被油基钻井液影响,而声—电成像测井由于其高分辨率的特征能更加准确地识别裂缝 (赖锦等, 2015; Lai *et al.*, 2017)。裂缝在成像测井中表现为正弦曲线,由于其充填物性质的不同、所使用的钻井液存在差异等,使其正弦曲线的颜色产生相应的变化 (Lai *et al.*, 2018; 高建申等, 2020)。在油基钻井液背景下,当钻井液侵入时,介电常数和地层介电常数对测量的影响、渗透性地层中形成的高阻泥饼等因素使地层电阻率成像变得非常复杂,使裂缝的测井判别更加困难 (Gozalpour *et al.*, 2007; Movahed *et al.*, 2014)。声成像测井对于高角度的张开裂缝识别效果具有优势,而电成像测井识别层理等构造相对效果明显 (甘泉等, 2017; Lai *et al.*, 2017)。但声成像测井受井眼形状影响较大,井眼偏心等问题会导致其在成像上产生黑色条带,使相关裂缝识别产生困难 (王丽忱等, 2014)。因此可综合两者优势,即采用声、电成像测井相互结合,使裂缝测井识别与评价更加精确。

库车拗陷博孜—大北地区处于强挤压应力环境,白垩系巴什基奇克组受多期构造运动,储集层中产生大量裂缝,影响着储集层的储集性能和渗流能力 (徐珂等, 2022)。岩心观察表明,大北 9 井白垩系目的层裂缝明显发育,但该井为油基钻井液钻井,可以看到浅电阻 (M2R1) 基本大于深电阻率 (M2RX),为典型油基钻井液钻井的响应 (Lai *et al.*, 2023)。由于受到油基钻井液的影响,虽然



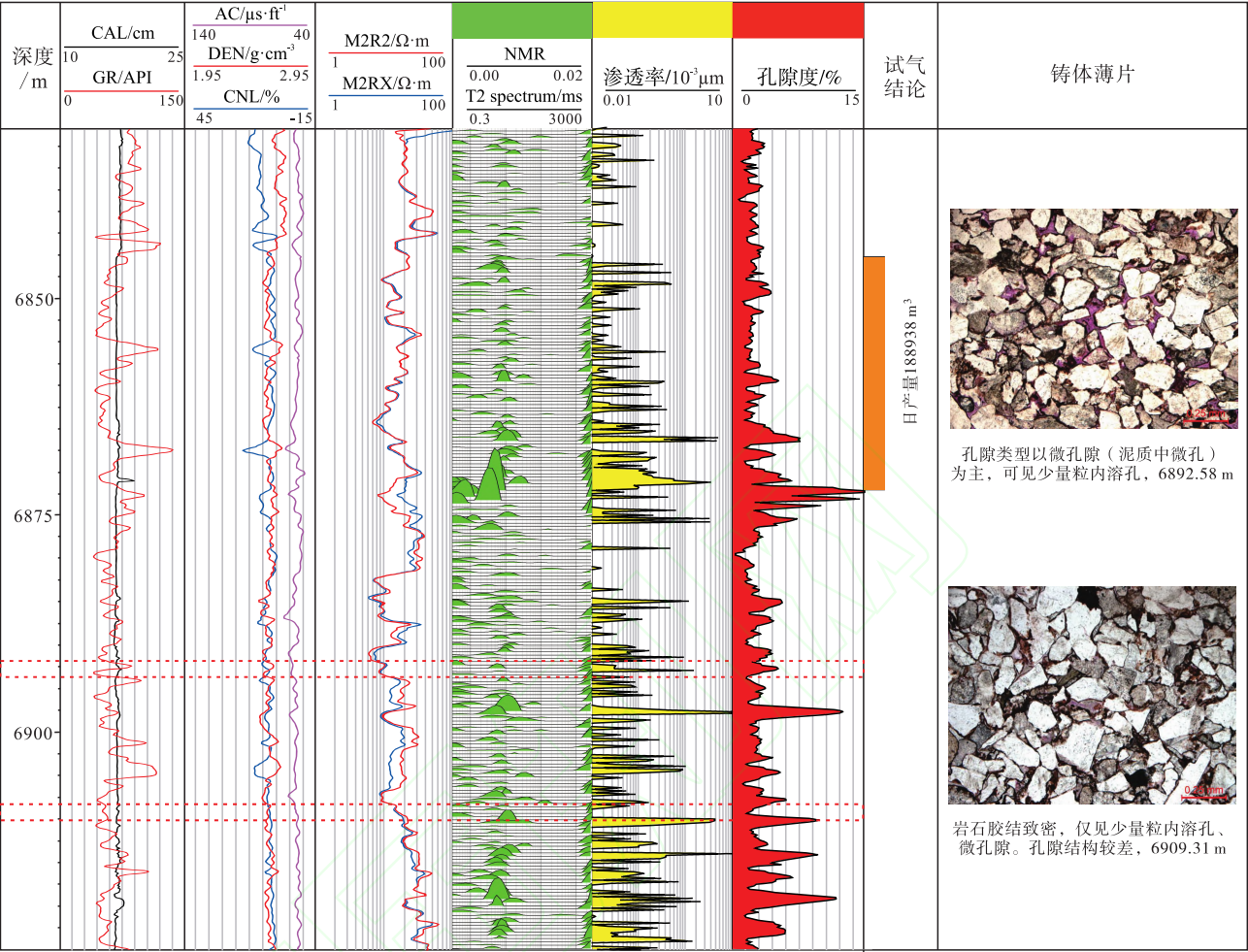


图 3 库车坳陷克深 503 井储集层参数计算及对应薄片特征

Fig. 3 Calculation of reservoir parameters and characterization of corresponding thin section in Well KS 503 in Kuqa Depression

通过电成像测井（贝克—阿特拉斯公司 EI 测井）可以根据其若隐如现的正弦曲线判断出裂缝发育带，但对于裂缝发育的真实情况及裂缝的开启性等信息无法进行判别(图 4)。进一步通过常规测井资料解读发现，电阻率曲线对该可能的裂缝发育带的响应特征不显著，三孔隙度曲线中，中子测井和密度测井也没有出现明显变化，仅仅声波时差测井出现增大的趋势。声波测井基本不受钻井液类型影响，在裂缝发育段也呈现增大趋势，但由于油基钻井液密度较大，因而裂缝发育段密度不会显著降低，同时中子也基本没有响应(图 4)。因此，常规测井资料和电成像测井资料识别裂缝出现困难和挑战。进一步结合电成像测井和声成像测井，在 4866~4871 m 的深度段，EI 成像测井共识别出 4 条裂缝（亮色断续的正弦曲线），而 UXPL 超声成

像测井中共识别到 7 条裂缝，而根据其暗色的正弦曲线可以看出，裂缝均为张开裂缝(图 4)。因此，在油基钻井液钻井背景下在声波成像测井识别裂缝具有明显的优势。

与油基钻井液中裂缝的测井响应不同，水基钻井液背景下，成像测井可以提供高分辨率的图像，拾取出裂缝面的形态特征。如水基钻井液钻井的博孜 104 井，其未充填裂缝其常表现暗色连续或不连续正弦曲线，充填裂缝由其充填物的性质决定其正弦曲线的样式（Khoshbakht *et al.*, 2009）。常规测井数据裂缝发育时地层可能出现井径扩大，双井径曲线出现椭圆井眼，孔隙度曲线变化不显著，声波时差呈锯齿状且明显增大，同时电阻率曲线出现下降，双侧向电阻率曲线出现明显分异（Ameen *et al.*, 2012；赖锦等，2015）。通过对成像测井拾

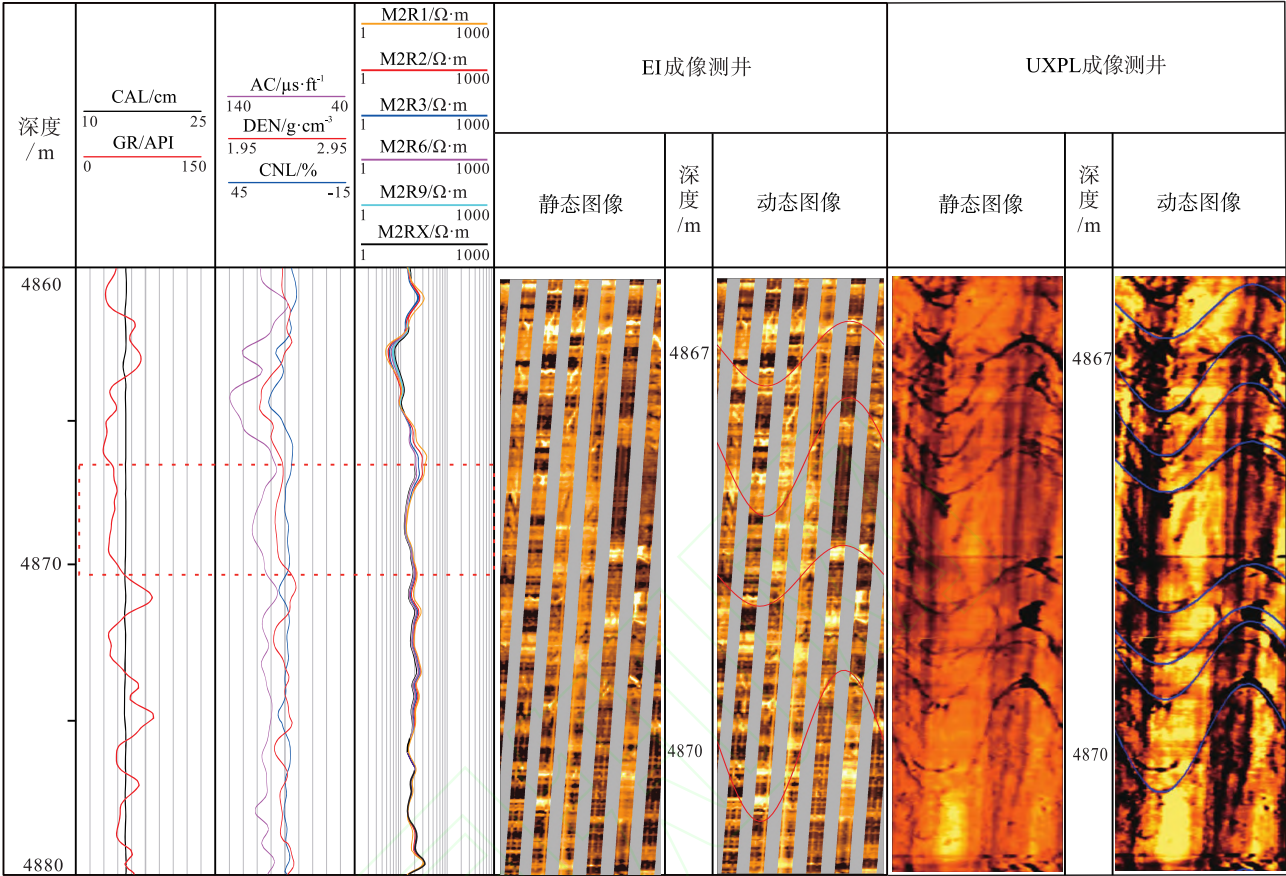


图 4 库车坳陷大北 9 井白垩系声、电结合裂缝识别效果图

Fig. 4 Effect diagram of fault identification of the Cretaceous in Well DB 9 in Kuqa Depression using combination of borehole image and acoustic image log

取裂缝面形态和常规测井曲线裂缝响应特征的分析，使用相应数学方法和统计学方法建立裂缝参数与影响测井响应特征的因素之间的关系模型，进而计算出裂缝参数，实现裂缝定量评价（Luthi and Souhaite, 1990；Lai *et al.*, 2021）（图 5）。电成像测井观察到裂缝发育的地层电阻率曲线出现降低，同时出现明显正异常。对单位面积上裂缝的信息进行统计，并进一步计算裂缝孔隙度等参数（图 5）。

5 地应力测井评价

地应力的研究为压裂改造提供指导方向，并帮助解决井筒不稳定的问题（Zoback *et al.*, 2003；Lai *et al.*, 2019）。同时地应力的研究对评价储集层质量和判断裂缝有效性起着重要的作用（付建伟等，2015；赖锦等，2023b）。由于测井资料价格低廉且数据相对连续，地球物理测井是研究地应力的有

效方法和手段（李军等，2001；徐珂等，2022）。利用测井资料评价的地应力主要为现今地应力，其评价内容包括获取现今地应力方向和计算现今地应力大小。现今地应力方向的获取通过利用成像测井资料观察井筒的破坏特征，对井壁崩落、诱导裂缝特征分析，其中诱导裂缝的走向指示最大主应力方向，井壁崩落导致椭圆井眼的长轴方向指示最小主应力的方向（黄继新等，2006；Massiot *et al.*, 2015）。此外，通过对快慢横波的各向异性分析，也可有效分析现今应力场展布（魏周拓等，2012）。而现今地应力的大小可依靠测井资料建立一维岩石力学模型计算（Zoback *et al.*, 2003）。以对库车坳陷博孜 104 井计算地应力大小为例，研究表明，库车坳陷经历多期构造运动叠加，因此需优选考虑到应变影响的组合弹簧模型实现地应力的计算（徐珂等，2021、2022）。组合弹簧模型考虑了岩石力学参数、正常压实孔隙压力  $P_p$ 、引入了 Biot 系数  $\alpha$



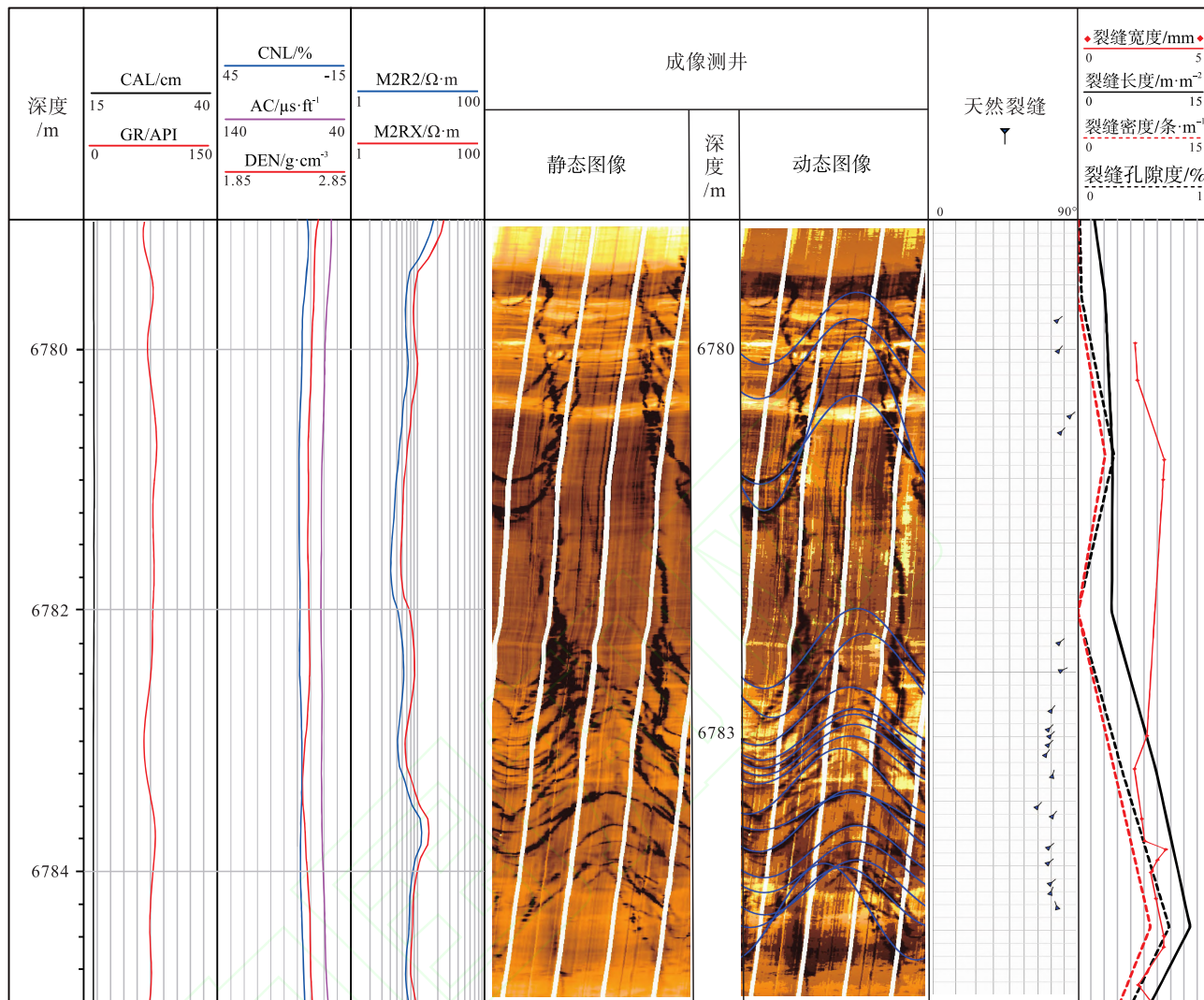


图 5 库车坳陷博孜 104 井白垩系裂缝参数定量计算

Fig. 5 Quantitative calculation of fracture parameters of the Cretaceous in Well BZ 104 in Kuqa Depression

和水平方向最大、最小应力校正系数,  $\varepsilon_H$  和  $\varepsilon_h$ , 可实现现今地应力测井精细计算(式 3-式 6)(图 6)(Zoback *et al.*, 2003; Iqbal *et al.*, 2018)。

$$P_0 = g \int_0^{TVD} \rho_b(z) dz \quad (3)$$

$$P_p = P_0 - (P_0 - P_{pn}) \cdot \alpha \cdot \left( \frac{\Delta t_n}{\Delta t_0} \right)^n \quad (4)$$

$$\sigma_h = \frac{v}{1-v} \sigma_v - \frac{v}{1-v} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E}{1-v^2} \varepsilon_h + \frac{vE}{1-v^2} \varepsilon_H \quad (5)$$

$$\sigma_H = \frac{v}{1-v} \sigma_v - \frac{v}{1-v} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E}{1-v^2} \varepsilon_H + \frac{vE}{1-v^2} \varepsilon_h \quad (6)$$

式中,  $P_0$  为垂向应力 ( $\sigma_v$ ),  $TVD$  为埋藏深度, m,

$\rho_b$  为岩石密度,  $\text{kg/m}^3$ ,  $g$  为重力加速度。  $P_p$  为地层压力, MPa;  $\Delta t_0$ -计算点泥岩测井声波时差,  $\mu\text{s}/\text{ft}$ ;  $\Delta t_n$ -计算点对应的泥岩正常趋势线的声波时差,  $\mu\text{s}/\text{ft}$ ;  $p_{pn}$ -正常压实孔隙压力, MPa;  $\alpha$ 、 $n$  为 Eaton 公式的系数;  $v$ -泊松比;  $E$ -杨氏模量。

研究发现, 地应力的方向和大小对储集层孔隙度与裂缝参数产生影响 (Lai *et al.*, 2019)。地应力方向和大小控制裂缝有效性 (季宗镇等, 2010; Lai *et al.*, 2019)。分析发现, 裂缝孔隙度和开度受地应力有良好的对应关系。随着水平两向应力差值增加, 导致裂缝密度和裂缝孔隙度呈现下降趋势 (图 6)。水平两向应力的差异对孔隙结构也会产生相应的影响 (Lai *et al.*, 2022)。对博孜 104 井进行地应力大小计算, 并结合实测和测井孔隙度数据、

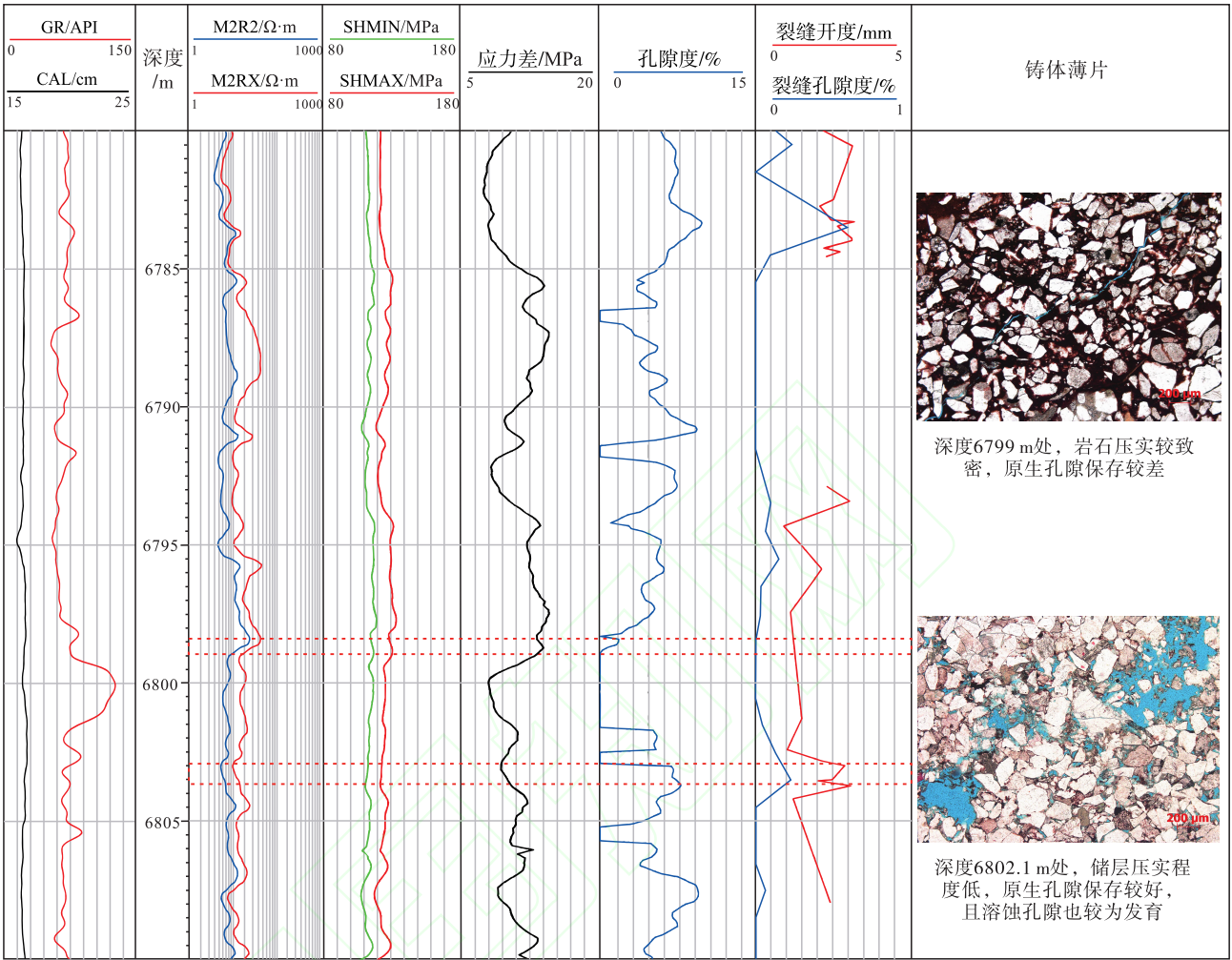


图 6 库车坳陷博孜 104 井三轴应力测井评价及对应铸体薄片特征

Fig. 6 Logging evaluation of in-situ stress magnitude and related thin section images in Well BZ 104 in Kuqa Depression

计算得到的裂缝参数和铸体薄片照片发现，随着水平两向主应力差值减小，储集层被压实程度越低，原生孔隙保存较好，溶蚀孔隙较为发育，孔隙度越大。而水平两向主应力差越大，储集层被压实的更加致密，导致孔隙度减小(图 7)(Lai *et al.*, 2022)。

6 存在问题与发展趋势

陆上深层、海上深水、非常规油气目前为油气勘探开发领域的重点和热点(郭旭升, 2022; 贾承造, 2023; Laubach *et al.*, 2023)。但是深层超深层地层的复杂性和非均质性使得测井解释变得更加困难。以往的测井解释与评价需要大量的数据依托，同时结合岩心数据和岩石物理实验作为辅助手段。而由于深层超深层成本较高，大大限制了测井

解释方法的工作和相关储集层的研究。

由于深层超深层地层的复杂性和高温高压环境，数据获取困难度较大，数据解释的复杂度也会增加(郭旭升, 2022; 贾承造, 2023)。对深层超深层白云岩裂缝进行评价过程中，由于深层超深层缺少取心资料，确实加剧了测井解释的多解性问题。如塔里木盆地中寒 1 井 7450~7460 m 井段，水基钻井液背景下，断续出现在白云岩中的厚度较小的泥质条带，由于其与裂缝在成像测井具有较为相似的特征，易被判断为裂缝。但常规测井曲线上，其声波时差无明显变化，深浅电阻率曲线并未下降且未出现明显分异，可见其并非裂缝发育段，而为白云岩中夹杂的泥质条带。在缺少岩心的情况下，需要常规测井和成像测井结合分析，帮助解决解释多解性的问题(图 7)。

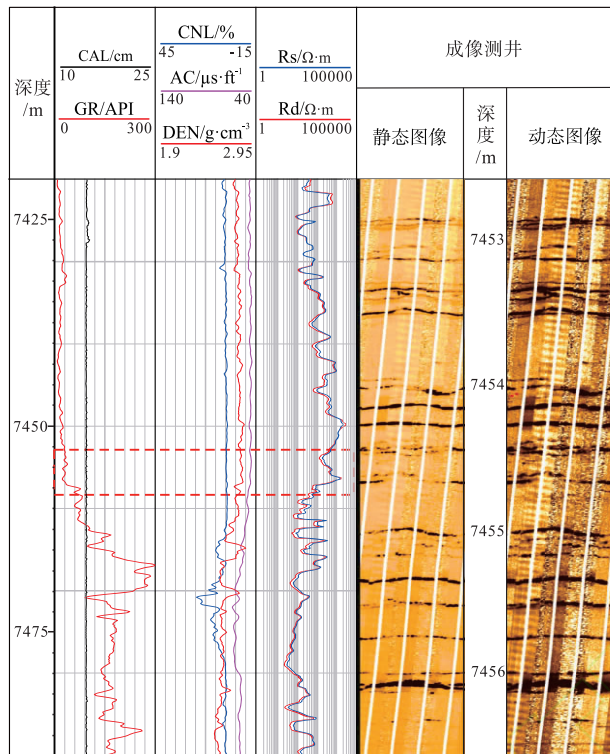


图 7 塔里木盆地中寒 1 井 7450~7460 m 成像测井响应特征

Fig. 7 Image log response characteristics of 7450~7460 m in Well ZH 1 in Tarim Basin

深层超深层领域，测井资料虽然具有较高的分辨率但是横向连续性较差；而地震资料虽具备较好的横向连续性但是其纵向分辨率存在局限，因此测井资料必然需要其与地震资料融合实现，如井震结合刻画碳酸盐岩断溶体 (Li *et al.*, 2023)。由于测井资料和地震资料的不足，对断溶体的研究存在限制。而通过井震结合，帮助明确深层超深层碳酸盐岩主要储集空间和控制因素，进而实现碳酸盐岩断溶体、断缝体精细刻画。

在面临深度超深层储集层复杂地质背景和艰巨的地层环境，依托测井技术发展趋势，深层超深层测井评价发展趋势可以概况为：(1) 对测井数据与信息的进一步强化挖掘：深层超深层测井数据本身获取存在限制，更应努力挖掘其与地层性质和油气资源相关的隐性测井数据，并在新技术测井不断完善的过程中，通过综合多参数测井信息，并与地震资料、实验数据等进行综合比对，在提高解释精度的同时，深入挖掘新技术测井潜在可用、能够用来表征沉积储集层地质特征的信息比如岩性、孔隙度渗透率等地层物性参数 (李浩等, 2015)。(2) 面

对深层超深层复杂的地质情况、岩石力学行为的复杂性问题，多角度分析其地质信息，发展考虑应力、温度和流体性质等因素的先进岩石物理模型，提高深层超深层领域测井解释的可靠性和准确性 (何登发等, 2019; 何志亮等, 2021; 贾承造, 2023)。(3) 数字化和智能化测井评价：通过大数据分析和人工智能技术，机器学习和深度学习等可赋予测井仪器、测井解释软件自主分析处理能力，并对其进行自动解释，实现对大规模测井数据的快速处理和分析，帮助提取地层特征、识别流体类型 (李宁等, 2021; 石玉江等, 2021)。(4) 深层超深层储集层具有复杂力学特征，钻井的稳定性较难控制，将测井地质学与工程结合，更加深入认识储集层内部结构，有助于更好地理解储集层行为 (李浩等, 2015; 赖锦等, 2021a)。

## 7 结束语

1) 地球物理测井资料可以拾取深层超深层中断层和不整合面等构造现象，断层表现为在成像测井中拾取地层的产状发生明显变化，不整合面表现为常规测井曲线产生异常突变，成像测井中出现明显的明暗截切突变的特征。

2) 地球物理测井资料在地下岩心资料匮乏的情况下，洞察地下岩层特征，拾取沉积学信息，包括岩性、粒度和沉积构造等相标志。

3) 深层超深层受高温高压极端条件的影响，储集层性质通常较复杂，地球物理测井资料可以实现对深层超深层储集层精细评价。利用不被储集层岩石成分和骨架结构所影响的核磁共振测井，实现对孔隙结构定量计算并帮助识别储集层流体性质。通过声电成像结合，弥补深层超深层油基钻井液背景下电成像测井识别裂缝的不足，并利用测井资料实现裂缝定量评价。

4) 随着勘探向地下深层迈进，地应力对深层超深层储集层性质具有明显的控制作用。地球物理测井资料可以实现对地应力的精细评价，利用对电成像测井井壁崩落、诱导裂缝特征分析获取深层超深层所受地应力方向。地应力的大小则优选组合弹簧模型实现其精细建模和计算。

5) 深层超深层测井评价发展应注重于多尺度数据的融合并考虑深层超深层环境因素先进模型的引入，同时结合大数据人工智能等先进技术，从而



优化深层超深层储集层评价与预测的方法。

### 参考文献 (References)

- 付建伟,李洪楠,孙中春,王贵文,罗兴平. 2015. 玛北地区砂砾岩储层地应力方向测井识别及主控因素. 石油与天然气地质, 36(4): 605-611. [Fu J W, Li H N, Sun Z C, Wang G W, Luo X P. 2015. Logging identification and controlling factors of present stress orientations of the coarse-grained clastic reservoirs in Mabei region, Juggar Basin. Oil & Gas Geology, 36(4): 605-611]
- 甘泉,章成广,朱雷,杨淑雯. 2017. 油基泥浆下超声成像测井仪裂缝识别效果分析. 能源与环保, 39(4): 57-63. [Gan Q, Zhang C G, Zhu L, Yang S W. 2017. Analysis on effects of fracture identification based on ultrasonic imaging logging in oil-based mud. Energy and Environment, 39(4): 57-63]
- 高建申,宋阳,刘彦萍,朱凯然,刘昕. 2020. 低电阻率地层基于凹陷电极对的油基泥浆电成像测井四参数计算方法. 石油学报, 41(8): 960-968. [Gao J S, Song Y, Liu Y P, Zhu K R, Liu X. 2020. A four-parameter calculation method of oil-based mud electric imaging logging based on concave electrode pairs in low-resistivity formation. Acta Petrolei Sinica, 41(8): 960-968]
- 郭旭升. 2022. 以关键核心技术突破带动我国深层、超深层油气勘探开发突破. 能源, 164(9): 46-50. [Guo X S. 2022. Breakthroughs in deep and ultra-deep oil and gas exploration and development in China driven by key core technology breakthroughs. Energy, 164(9): 46-50]
- 何登发,马永生,刘波,蔡勋育,张义杰,张健. 2019. 中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题. 地学前缘, 26(1): 1-12. [He D F, Ma Y S, Liu B, Cai X Y, Zhang Y J, Zhang J. 2019. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petroliferous basins in China. Earth Science Frontiers, 26(1): 1-12]
- 何治亮,马永生,朱东亚,段太忠,耿建华,张军涛,丁茜,钱一雄,沃玉进,高志前. 2021. 深层—超深层碳酸盐岩储层理论技术进展与攻关方向. 石油与天然气地质, 42(3): 533-546. [He Z L, Ma Y S, Zhu D Y, Duan T Z, Geng J H, Zhang J T, Ding Q, Qian Y X, Wo Y J, Gao Z Q. 2021. Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs. Oil & Gas Geology, 42(3): 533-546]
- 黄继新,彭仕宓,王小军,肖昆. 2006. 成像测井资料在裂缝和地应力研究中的应用. 石油学报, 27(6): 65-69. [Huang J S, Peng S M, Wang X J, Xiao K. 2006. Applications of imaging logging data in the research of fracture and ground stress. Acta Petrolei Sinica, 27(6): 65-69]
- 季宗镇,戴俊生,汪必峰. 2010. 地应力与构造裂缝参数间的定量关系. 石油学报, 31(1): 68-72. [Ji Z Z, Dai J S, Wang B F. 2010. Quantitative relationship between crustal stress and parameters of tectonic fracture. Acta Petrolei Sinica, 31(1): 68-72]
- 贾承造. 2023. 含油气盆地深层—超深层油气勘探开发的科学技术问题. 中国石油大学学报(自然科学版), 47(5): 1-12. [Jia C Z. 2023. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 47(5): 1-12]
- 赖锦,王贵文,王书南,郑懿琼,吴恒,张永辰. 2013. 碎屑岩储层成岩相研究现状及进展. 地球科学进展, 28(1): 39-50. [Lai J, Wang G W, Wang S N, Zheng Y Q, Wu H, Zhang Y C. 2013. Research status and advances in the diagenetic facies of clastic reservoirs. Advance in Earth Science, 28(1): 39-50]
- 赖锦,王贵文,孙思勉,蒋晨,周磊,郑新华,吴庆宽,韩闯. 2015. 致密砂岩储层裂缝测井识别评价方法研究进展. 地球物理学进展, 30(4): 1712-1724. [Lai J, Wang G W, Sun S M, Jiang C, Zhou L, Zheng X H, Wu Q K, Han C. 2015. Research advances in logging recognition and evaluation method of fractures in tight sandstone reservoirs. Progress in Geophysics, 30(4): 1712-1724]
- 赖锦,韩能润,贾云武,季玉山,王贵文,庞小娇,贺智博,王松. 2018. 基于测井资料的辫状河三角洲沉积储层精细描述. 中国地质, 45(2): 304-318. [Lai J, Han N R, Jia Y W, Ji Y S, Wang G W, Pang X J, He Z B, Wang S. 2018. Detailed description of the sedimentary reservoir of a braided delta based on well logs. Geology in China, 45(2): 304-318]
- 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. 2021a. 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. 2021a. The past, present and future of well logging geology: to celebrate the publication of the second edition of "Well Logging Geology". Geological Review, 67(6): 1804-1828]
- 赖锦,包萌,刘士琛,李栋,王松,杨科夫,陈旭,王贵文,丁修建. 2021b. 塔里木盆地深层、超深层白云岩优质储集层测井预测. 古地理论, 23(6): 1225-1242. [Lai J, Bao M, Liu S C, Li D, Wang S, Yang K F, Chen X, Wang G W, Ding X J. 2021b. Prediction of high quality deep and ultra-deep dolostones reservoirs in Tarim Basin by well logs. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 23(6): 1225-1242]
- 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 ideas in well logging geology research. 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 fields and its geological and engineering significances. *Oil & Gas Geology*, 44(4): 1033-1043]
- 李军, 王贵文, 欧阳健. 2001. 利用测井信息定量研究库车坳陷山前地区地应力. *石油勘探与开发*, 28(5): 93-95. [Li J, Wang G W, Ouyang Y J. Using logging data to quantitatively study terrestrial-stress of Kuqa field. 2001. *Petroleum Exploration and Development*, 28(5): 93-95]
- 李浩, 刘双莲, 魏修平, 谭承军. 2015. 隐性测井地质信息的识别方法. *地球物理学进展*, 30(1): 195-202. [Li H, Liu S L, Wei X P, Tan C J. 2015. Method exploration of implicit logging geological information research. *Progress in Geophysics*, 30(1): 195-202]
- 李宁, 徐彬森, 武宏亮, 冯周, 李雨生, 王克文, 刘鹏. 2021. 人工智能在测井地层评价中的应用现状及前景. *石油学报*, 42(4): 508-522. [Li N, Xu B S, Wu H L, Fen Z, Li Y S, Wang K W, Liu P. 2021. Application status and prospects of artificial intelligence in well logging and formation evaluation. *Acta Petrolei Sinica*, 42(4): 508-522]
- 李宁, 冯周, 武宏亮, 田瀚, 刘鹏, 刘英明, 刘忠华, 王克文, 徐彬森. 2023. 中国陆相页岩油测井评价技术方法新进展. *石油学报*, 44(1): 28-44. [Li N, Feng Z, Wu H L, Tian H, Liu P, Liu Y M, Liu Z H, Wang K W, Xu B S. 2023. New advances in methods and technologies for well logging evaluation of continental shale oil in China. *Acta Petrolei Sinica*, 44(1): 28-44]
- 刘宏坤, 艾勇, 王贵文, 陈康军, 蔡德洋, 曹军涛, 解宇强, 李栋, 赖锦. 2023. 深层、超深层致密砂岩储层成岩相测井定量评价: 以库车坳陷博孜一大北地区为例. *地质科技通报*, 42(1): 299-310. [Liu H K, Ai Y, Wang G W, Cheng K J, Cai D Y, Cao J T, Xie Y Q, Li D, Lai J. 2023. Quantitative well logging evaluation of diagenetic facies of deep and ultra deep tight sandstone reservoirs: a case study of Bozi-Dabei area in Kuqa Depression. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(1): 299-310]
- 刘志远, 李浩, 武清钊, 南泽宇, 苏俊磊, 金武军. 2021. 致密砂岩裂缝测井识别特色技术及其应用效果: 以四川盆地川西坳陷新场气田上三叠统须家河组二段为例. *石油与天然气地质*, 42(4): 981-991. [Liu Z Y, Li H, Wu Q Z, Nan Z Y, Su J L, Jin W J. 2021. Characteristics and application effect of logging-based fracture identification in tight sandstones: a case study of the Upper Triassic Xu 2 Member in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 42(4): 981-991]
- 毛锐, 牟立伟, 王刚, 樊海涛. 2021. 基于核磁共振自由弛豫特征的含油性评价方法: 以玛湖凹陷下乌尔禾组砾岩储层为例. *岩性油气藏*, 33(5): 140-147. [Mao R, Mou L W, Wang G, Fan H T. 2021. Oil-bearing evaluation method based on NMR free relaxation characteristics: a case study of conglomerate reservoirs of lower Urho Formation in Mahu Sag, Junggar Basin. *Lithologic Reservoirs*, 33(5): 140-147]
- 宁从前, 周明顺, 成捷, 苏芮, 郝鹏, 王敏, 潘景丽. 2021. 二维核磁共振测井在砂砾岩储层流体识别中的应用. *岩性油气藏*, 33(1): 267-274. [Ning C Q, Zhou M S, Cheng J, Su R, Hao P, Wang M, Pan J L. 2021. Application of 2D NMR logging in fluid identification of glutenite reservoir. *Lithologic Reservoirs*, 33(1): 267-274]
- 石玉江, 刘国强, 钟吉彬, 王娟, 张文静. 2021. 基于大数据的测井智能解释系统开发与应用. *中国石油勘探*, 26(2): 113-126. [Shi Y J, Liu G Q, Zhong J B, Wang J, Zhang W J. 2021. Development and application of intelligent logging interpretation system based on big data. *China Petroleum Exploration*, 26(2): 113-126]
- 唐勇, 纪杰, 郭文建, 陈洪, 李彦颖, 董方. 2022. 准噶尔盆地阜康凹陷东部中/上二叠统不整合结构特征及控藏作用. *石油地球物理勘探*, 57(5): 1138-1147, 1005. [Tang Y, Ji J, Guo W J, Chen H, Li Y Y, Dong F. 2022. Characteristics and reservoir-control effect of Upper/Middle Permian unconformity structures in the east of Fūkang Sag, Junggar Basin. *Oil Geophysical Prospecting*, 57(5): 1138-1147, 1005]
- 王华, 张雨顺. 2021. 测井资料人工智能处理解释的现状 & 展望. *测井技术*, 45(4): 345-356. [Wang H, Zhang Y S. 2021. Research status and prospect of artificial intelligence in logging data processing and interpretation. *Well Logging Technology*, 45(4): 345-356]
- 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 J 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 and Technology*, 51(2): 311-328]
- 王丽忱, 甄鉴, 邹长春, 聂昕. 2014. 成像测井岩心空间归位方法及效果分析. *地质科技情报*, 33(4): 207-212. [Wang L C, Zhen J, Zou C C, Nie X. 2014. Core spatial restoring with imaging logging data and effect analysis. *Geological Science and Technology Information*, 33(4): 207-212]
- 王小敏, 樊太亮. 2013. 碳酸盐岩储层渗透率研究现状与前瞻. *地学前缘*, 20(5): 166-174. [Wang X M, Fan T L. 2013. Progress of research on permeability of carbonate rocks. *Earth Science Frontiers*, 20(5): 166-174]
- 魏周拓, 范宜仁, 陈雪莲. 2012. 横波各向异性在裂缝和应力分析中的应用. *地球物理学进展*, 27(1): 217-224. [Wei Z T, Fan Y R, Chen X L. 2012. Application of shear wave anisotropy in fractures and in-situ stress analysis. *Progress in Geophysics*, 27(1): 217-224]
- 肖承文, 杨林, 万金彬, 韩闯, 王谦, 夏宏泉, 王伟. 2018. 基于地应力的库车前陆盆地储层有效性测井评价. *测井技术*, 42(1): 78-84. [Xiao C W, Yang L, Wan J B, Han C, Wang Q, Xia H Q, Wang W. 2018. Log evaluation of reservoir validity from formation stress in Kuche Foreland Basin. *Well Logging Technology*, 42(1): 78-84]
- 谢然红, 肖立志, 陆大卫. 2009. 识别储层流体的( $T_2$ ,  $T_1$ )二维核磁共振方法. *测井技术*, 33(1): 26-31. [Xie R H, Xiao L Z, Lu D W. 2009. ( $T_2$ ,  $T_1$ ) Two-dimensional NMR method for fluid typing. *Well Logging Technology*, 33(1): 26-31]
- 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 ultra-deep layers of Kuqa Depression, Tarim Basin. Natural Gas Geoscience, 33(1): 13-23 ]
- 曾庆鲁, 莫涛, 赵继龙, 唐永亮, 张荣虎, 夏九峰, 胡春雷, 史玲玲. 2020. 7000 m 以深优质砂岩储层的特征, 成因机制及油气勘探意义: 以库车坳陷下白垩统巴什基奇克组为例. 天然气工业, 40(1): 38-47. [ Zeng Q L, Mo T, Zhao J L, Tang Y L, Zhang R H, Xia J F, Hu C L, Shi L L. 2020. Characteristics, genetic mechanism and oil & gas exploration significance of high-quality sandstone reservoirs deeper than 7000 m: a case study of the Bashijiqike Formation of Lower Cretaceous in the Kuqa Depression. Natural Gas Industry, 40(1): 38-47 ]
- 张凯逊, 白国平, 王权, 牛新杰, 李秋伟, 卢小新. 2016. 致密砂岩储集层成岩相的测井识别与评价: 以冀中坳陷饶阳凹陷古近系沙河街组三段为例. 古地理学报, 18(6): 921-938. [ Zhang K X, Bai G P, Wang Q, Niu X J, Li Q W, Lu X X. 2016. Wireline log response-based recognition and evaluation of diagenetic facies in tight sandstone reservoirs: a case study of the Member 3 of Paleogene Shahejie Formation in Raoyang sag of Jizhong Depression. Journal of Palaeogeography( Chinese Edition ), 18(6): 921-938 ]
- 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, palaeo-geomorphology and their controls on gas accumulation of deep-buried cretaceous in Kuqa Depression. Tarim Basin, China. Natural Gas Geoscience, 26(4): 667-678 ]
- Al-Mudhafar W J. 2020. Integrating machine learning and data analytics for geostatistical characterization of clastic reservoirs. Journal of Petroleum Science and Engineering, 195: 107837.
- Ameen M S, MacPherson K, Al-Marhoon M, Rahim Z. 2012. Diverse fracture properties and their impact on performance in conventional and tight-gas reservoirs, Saudi Arabia: the Unayzah, South Haradh case study. AAPG Bulletin, 96(3): 459-492.
- Anovitz L M, Cole D R. 2015. Characterization and analysis of porosity and pore structures. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 80(1): 61-164.
- Coates G R, Xiao L, Prammer M G. 1999. NMR Logging Principles and Applications. Halliburton Energy Services Publication, Houston.
- Daigle H, Johnson A. 2016. Combining mercury intrusion and nuclear magnetic resonance measurements using percolation theory. Transport in Porous Media, 111: 669-679.
- Daigle H, Thomas B, Rowe H, Nieto M. 2014. Nuclear magnetic resonance characterization of shallow marine sediments from the Nankai Trough, Integrated Ocean. Drilling Program Expedition 333. Journal of Geophysical Research, 119: 2631-2650.
- Fan H, Shi J, Fan T L, Gao Z Q, Gu Y, Gao Z, Zhang T H, Li Y, Li B. 2021. Sedimentary microfacies analysis of carbonate formation based on FMI and conventional logs: a case study from the Ordovician in the Tahe Oilfield, Tarim Basin, China. Journal of Petroleum Science and Engineering, 203: 108603.
- Folkestad A, Veselovsky Z, Roberts P. 2012. Utilising borehole image logs to interpret delta to estuarine system: a case study of the subsurface Lower Jurassic Cook Formation in the Norwegian northern North Sea. Marine and Petroleum Geology, 29(1): 255-275.
- Gozalpour F, Danesh A, Todd A C, Tohidi B. 2007. Application of tracers in oil-based mud for obtaining high-quality fluid composition in lean gas/condensate reservoirs. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 10(1): 5-11.
- Guo X, Xu P, Xu M B, Cai J J, Huang T, He M. 2020. Formation protection method of oil-based drilling fluid for deep fractured tight gas reservoir. Energy Science & Engineering, 8(10): 3682-3701.
- Huang Y Y, Wang G W, Zhang Y, Xi J H, Huang L L, Wang S, Zhang Y L, Lai J, Jiang C Z. 2023. Logging evaluation of pore structure and reservoir quality in shale oil reservoir: the Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin, China. Marine and Petroleum Geology, 156: 106454.
- Iqbal O, Ahmad M, Abd Kadir A. 2018. Effective evaluation of shale gas reservoirs by means of an integrated approach to petrophysics and geomechanics for the optimization of hydraulic fracturing: a case study of the Permian Roseneath and Murteree Shale Gas reservoirs, Cooper Basin, Australia. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 58: 34-58.
- Khoshbakht F, Memarian H, Mohammadnia M. 2009. Comparison of Asmari, Pabdeh and Gurpi formation's fractures, derived from image log. Journal of Petroleum Science and Engineering, 67(1-2): 65-74.
- Keeton G I, Pranter M J, Cole R D, Edmund R. 2015. Stratigraphic architecture of fluvial deposits from borehole images, spectral-gamma-ray response, and outcrop analogs, Piceance Basin, Colorado. AAPG Bulletin, 99(10): 1929-1956.
- Kleinberg R L, Kenyon W E, Mitra P P. 1994. Mechanism of NMR relaxation of fluids in rock. Journal of magnetic resonance, Series A, 108(2): 206-214.
- Lai J, Wang G W, Fan Z Y, Wang Z Y, Chen J, Zhou Z L, Wang S H, Xia C W. 2017. Fracture detection in oil-based drilling mud using a combination of borehole image and sonic logs. Marine and Petroleum Geology, 84: 195-214.
- 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 im-



- age logs in structural analysis and sedimentary characterization. *Marine and Petroleum Geology*, 95: 139–166.
- Lai J, Li D, Wang G, Cao J T, Li M, Pang X J, Han C, Fan X Q, Yang L, He Z 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, Chen K, Xin Y, Wu X N, Chen X, Yang K F, Song Q Q, Wang G W, Ding X J. 2021. Fracture characterization and detection in the deep Cambrian dolostones in the Tarim Basin, China: insights from borehole image and sonic logs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196: 107659.
- Lai J, Li D, Ai Y, Liu H K, Cai D Y, Chen K J, Xie Y Q, Wang G W. 2022. Structural diagenesis in ultra-deep tight sandstones in the Kuqa Depression, Tarim Basin, China. *Solid Earth*, 13(6): 975–1002.
- Lai J, Wang G, Fan Q X, Zhao F, Zhao X, Li Y H, Zhao Y D, Pang X J. 2023. Towards the scientific interpretation of geophysical well logs: typical misunderstandings and countermeasures. *Surveys in Geophysics*, 44: 463–494.
- Laubach S E, Zeng L, Hooker J N, Wang Q, Zhang R, Wang J, Ren B. 2023. Deep and ultra-deep basin brittle deformation with focus on China. *Journal of Structural Geology*, 175: 104938.
- Li H B, Wang G W, Li Y H, Bai M M, Pang X J, Zhang W F, Zhang X M, Wang Q, Ma X J, Lai J. 2023. Fault-karst systems in the deep Ordovician carbonate reservoirs in the Yingshan Formation of Tahe Oil-field Tarim Basin, China. *Geoenergy Science and Engineering*, 231: 212338.
- Loucks R G. 1999. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications. *AAPG Bulletin*, 83(11): 1795–1834.
- Luthi S M, Souhaite P. 1990. Fracture apertures from electrical borehole scans. *Geophysics*, 55(7): 821–833.
- Massiot C, McNamara D D, Lewis B. 2015. Processing and analysis of high temperature geothermal acoustic borehole image logs in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geothermics*, 53: 190–201.
- Movahed Z, Junin R, Safarkhanlou Z, Akbar M. 2014. Formation evaluation in Dezful embayment of Iran using oil-based-mud imaging techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 121: 23–37.
- Wang S, Wang G W, Li D, Wu X N, Chen X, Wang Q Q, Cao J T, Zhang Y L. 2022. Comparison between double caliper, imaging logs, and array sonic log for determining the in-situ stress direction: a case study from the ultra-deep fractured tight sandstone reservoirs, the Cretaceous Bashijiqike Formation in Keshen8 region of Kuqa depression, Tarim Basin, China. *Petroleum Science*, 19(6): 2601–2617.
- Wang X, Wang D, Li X, Han C C. 2023. Study on pore structure characterization of strong diagenesis sandstones and the logging response characteristics in Tazhong area, Tarim Basin. *Journal of Applied Geophysics*, 215(8): 105117.
- Yasin Q, Ding Y, Baklouti S, Boateng C D, Du Q, Golsanami N. 2022. An integrated fracture parameter prediction and characterization method in deeply-buried carbonate reservoirs based on deep neural network. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208: 109346.
- Zeng L B, Wang H J, Gong L, Liu B M. 2010. Impacts of the tectonic stress field on natural gas migration and accumulation: a case study of the Kuqa Depression in the Tarim Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 27(7): 1616–1627.
- Zhang P, Lu S, Li J, Chen C, Xue H T, Zhang J. 2018. Petrophysical characterization of oil-bearing shales by low-field nuclear magnetic resonance(NMR). *Marine and Petroleum Geology*, 89: 775–785.
- 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(7–8): 1049–1076.

(责任编辑 郑秀娟)