



基于常规测井的变质岩裂缝识别方法研究

廖海博, 刘红岐, 崔云江, 汪瑞宏, 李枝林, 陈 东, 刘 伟

Research on fractures identification method of metamorphic rock based on conventional logging

LIAO Haibo, LIU Hongqi, CUI Yunjiang, WANG Ruihong, LI Zhilin, CHEN Dong, and LIU Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023021601>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于分形纹理特征的侧扫声呐图像沉船识别方法研究

Shipwreck identification with side scan sonar image based on fractal texture

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 232

雅浦岛弧变质岩成因和构造环境研究

Origin and tectonic setting of metamorphic rocks in the Yap Island Arc

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(4): 71

渤海海域沙南凹陷烃源岩TOC测井预测模型优选及应用

Optimization of TOC well logging prediction models and their application to source rock evaluation in the Shanan Sag of Bohai Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 182

基于HHT方法的地层Q值补偿方法研究

Research of compensation method for formation Q value based on HHT method

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 175

北部湾盆地涠西南凹陷灰岩潜山储层特征及分布规律

Characteristics of limestone buried-hills and their distribution in the Weixinan Depression of the Beibu Gulf Basin

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 94

基于岩石物理模拟与声学实验识别孔隙—裂隙充填型水合物

Identification of pore-filling and fracture-filling hydrate by petrophysical simulation and acoustic experiment

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 208



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

廖海博, 刘红岐, 崔云江, 等. 基于常规测井的变质岩裂缝识别方法研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(4): 189-198.

LIAO Haibo, LIU Hongqi, CUI Yunjiang, et al. Research on fractures identification method of metamorphic rock based on conventional logging[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(4): 189-198.

基于常规测井的变质岩裂缝识别方法研究

廖海博¹, 刘红岐¹, 崔云江², 汪瑞宏², 李枝林³, 陈东³, 刘伟¹

1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

3. 川庆钻探钻采工程技术研究院, 广汉 618300

摘要: BZ19-6 气田变质岩潜山储层结构复杂、多样, 裂缝发育且非均质性强。在储层评价中, 识别有效的裂缝是一个紧迫的难题, 而这对于该气田的勘探开发具有重要的意义。以岩性主要为花岗岩片麻岩、夹少量侵入岩的太古界为研究层位, 通过对常规测井曲线进行重极标差 (R/S) 分析, 以识别研究层位的裂缝发育程度, 并通过计算 $Lg(R/S)$ 的牛顿二阶差分预测裂缝的发育位置。进一步将 R/S 分析结果与岩芯薄片裂缝观察统计和电成像图解释结果进行对比, 建立了利用赫尔特指数识别花岗岩片麻岩储层裂缝发育程度分类标准。研究表明: ① 将 R/S 分析和牛顿差分法相结合改进的裂缝识别方法, 在变质岩储层裂缝评价中具有可行性, 可识别宽度 >0.005 mm 的裂缝; ② $Lg(R/S)$ 曲线二阶差分能够准确地识别天然裂缝的发育位置, 并且 $K-R_{xo}$ 与裂缝线密度呈正相关, 相关性高; ③ 岩性各向异性和裂缝充填情况对常规测井曲线 R/S 分析方法识别裂缝精度有影响。

关键词: 变质岩潜山; 随钻测井; R/S 法; 裂缝识别; 常规测井

中图分类号: P744

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023021601

Research on fractures identification method of metamorphic rock based on conventional logging

LIAO Haibo¹, LIU Hongqi¹, CUI Yunjiang², WANG Ruihong², LI Zhilin³, CHEN Dong³, LIU Wei¹

1. College of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. Tianjin Branch, China National Offshore Oil Corporation, Tianjin 300459, China

3. Drilling and Production Engineering Technology Research Institute of Chuangqing Drilling Engineering Co., Ltd., Guanghan 618300, China

Abstract: The structure of the reservoir in the BZ19-6 gas field metamorphic rock sub-salt dome is complex and diverse, with developed and heterogeneous fractures. Identifying effective fractures in reservoir evaluation is an urgent problem, which is important for the exploration and development of the gas field. The study mainly focuses on the granite gneiss and Archean intrusions with a small amount of intrusive rock as the research layer. The degree of fracture development of the research layer is identified by analyzing the R/S (rescaled range) of conventional logging curves. The development position of fractures is predicted by calculating the second-order difference of $Lg(R/S)$. Furthermore, the R/S analysis results are compared with the statistical observation of thin-section fractures and the interpretation results of electric imaging to establish a classification standard for the degree of fracture development in granite gneiss reservoirs using the Hurst index. The study shows that: 1) The improved method of combining R/S analysis and Newton's difference method is feasible for fracture evaluation in metamorphic rock reservoirs and can identify fractures with a width greater than 0.005 mm. 2) The second-order difference value of $Lg(R/S)$ curve can accurately identify the development position of natural fractures, and $K-R_{xo}$ is positively correlated with fracture line density, with high correlation. 3) Rock anisotropy and fracture filling have an impact on the accuracy of fracture identification using the conventional logging curve R/S analysis method.

Key words: metamorphic rock buried hill; logging while drilling; rescaled range analysis; fracture identification; conventional logging

渤海湾含油气盆地是继大庆油田发现之后, 在中国东部地区所发现的另一个重要的含油气盆地, 可分为碎屑岩、古潜山变质岩、湖相碳酸盐岩、火山岩等 4 大岩石类型。其中, 古潜山变质岩的勘探

程度较低, 已探明储量仅占总储量的 20%^[1]。因此, 古潜山油气藏是渤海湾盆地主要的勘探目标^[2]。BZ19-6 气田是渤海湾盆地最大的凝析气田, 探明储量超千亿方^[3], 主要目的层为太古界潜山地层, 岩性

资助项目: 中石油创新联合体项目“长水平段薄箱体页岩储层地质导向钻井技术”(2020CX040203)

作者简介: 廖海博(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事测井资料处理解释与储层评价、油藏描述研究, E-mail: 1075129119@qq.com

收稿日期: 2023-02-16; 改回日期: 2023-04-02。张现荣编辑

主要为花岗片麻岩,夹少量侵入岩^[4-5]。受印支期、燕山期和喜马拉雅期等多期次构造运动的影响,太古界变质花岗岩潜山发育溶蚀孔隙-裂缝型和裂缝型储层,其中裂缝是主要的储集空间和渗流通道^[6-7]。因此,有效的裂缝识别方法对该区块未探明单元的油气勘探至关重要。

目前,识别储层裂缝的方法有直接法和间接法。直接法是从露头、岩芯和成像测井中识别裂缝特征,可以直接反映储层裂缝,但其局限性强、价格昂贵、操作不易。间接法通过处理和分析常规测井资料、地震资料和动态生产资料识别裂缝,可以根据少量数据获得大面积内的裂缝特征,但其必须引入复杂的数学算法。近年来,随着计算机技术的迅速发展和数学理论基础的深入研究,许多学者将常规测井与数学方法相结合,间接地识别裂缝发育的位置和程度。例如,Xiao等^[8]利用重标极差(R/S)分析法对不同岩性进行了裂缝识别,表明运用 R/S 分析方法识别储层的裂缝具有可行性;陈义国等^[9]采用 R/S 分析方法对常规测井资料进行裂缝识别,发现裂缝识别参数与裂缝线密度呈良好的线性关系;Li等^[10]通过 R/S 分析方法对北贵州地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层的裂缝进行识别,表明 R/S 分析方法可以有效地区分裂缝与噪声信号;Zhang等^[11]基于 R/S 分析方法识别裂缝,表明可通过计算裂缝与基质之间的比例来确定裂缝线密度,进而预测天然裂缝的发育程度和空间分布规律;Xiao等^[12]利用 R/S 分析方法对致密砂岩储层的非均质性进行评估,认为 R/S 分析方法可定量评估储层的非均质性;

Aghli等^[13]基于 R/S 分析方法识别碳酸盐岩储层裂缝,表明 R/S 分析方法能定量反映裂缝参数;Ge等^[14]探讨了火成岩多重分形参数与裂缝发育程度之间的关系,发现裂缝发育程度与多重分形特征呈负相关。研究成果显示,重标极差(R/S)分析与分形维数已广泛应用于天然裂缝的识别,但仍存在以下问题:①识别裂缝的尺度具有局限性;②对噪声和异常值较敏感,需要通过其他地质、地球物理等资料进行验证。

将此方法用于该区块的裂缝识别,仍面临着巨大的挑战。首先,BZ19-6气田储层裂缝网络复杂,主要发育微裂缝,裂缝宽度集中分布于0.01~0.2 mm,且大多数裂缝被方解石、泥质等填充;其次,针对岩性更为复杂的花岗片麻岩储层, R/S 分析方法识别裂缝的研究鲜见。鉴于此,本文基于 R/S 分析方法并结合测井、岩芯和薄片等资料,旨在:①研究 R/S 分析方法识别裂缝的最小尺度;②建立利用赫尔特指数识别花岗片麻岩储层裂缝发育程度分类标准;③分析岩性各向异性对 R/S 分析方法识别裂缝精度的影响。

1 地质背景

BZ19-6气田位于渤中凹陷西南部,东南方向为渤南低凸起,西部为埕北低凸起,呈洼中隆的构造格局(图1)。如图2所示(图1中DD'剖面),太古界潜山地层在近南北向发育的构造脊上是古隆起的背景下发育的、经过多期次的构造作用改造的、

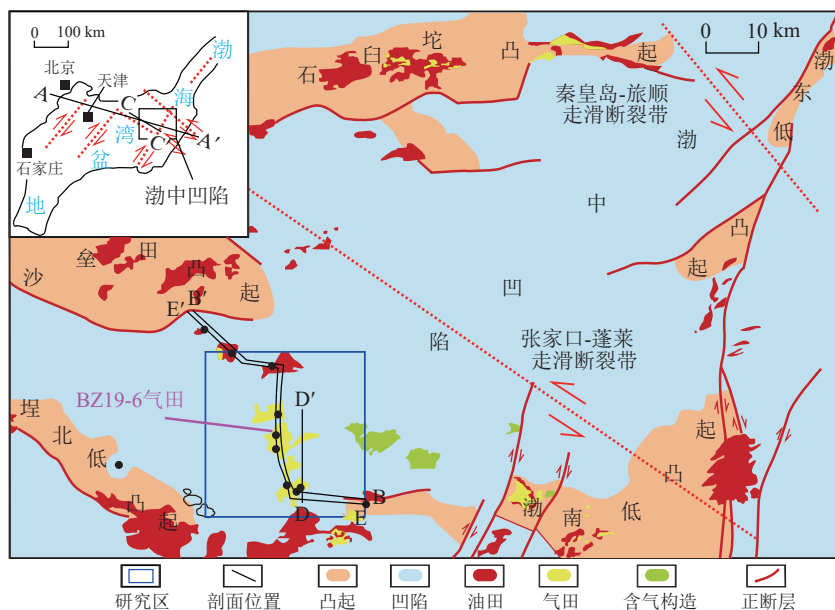


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of study area

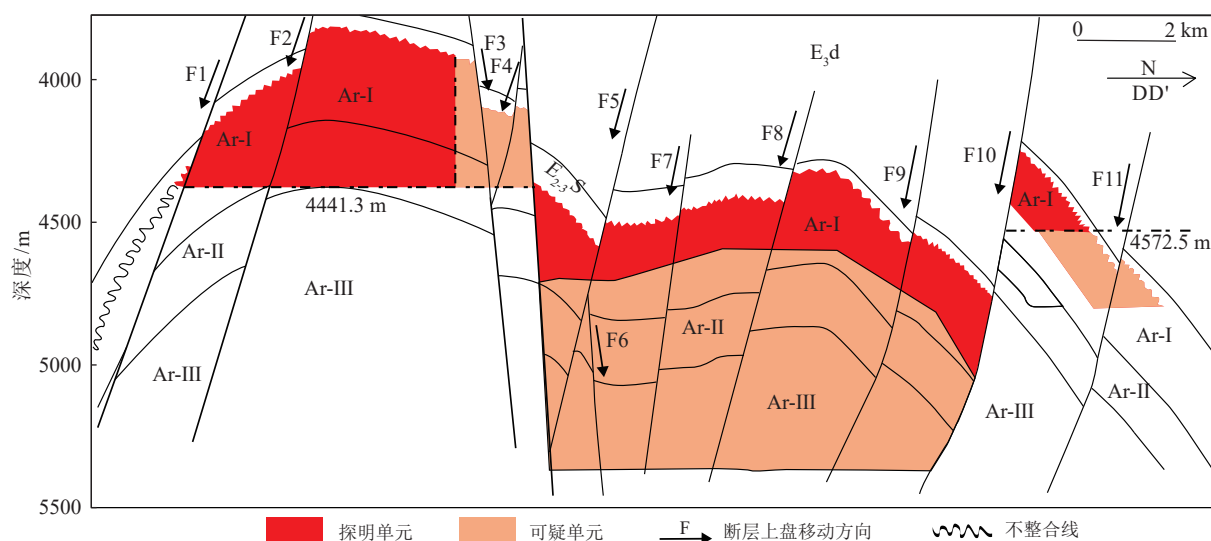


图 2 太古界潜山气藏构造剖面图

Fig.2 Archean buried hill gas reservoir structure profile

被一系列断层复杂化的断层背斜构造, 构造整体南高北低^[15-16], 形态完整, 圈闭面积较大, 埋藏较深, 次生断层、裂缝较为发育^[17]。

研究区太古界潜山与上部始新统孔店组呈不整合接触, 潜山岩性主要为变质岩, 局部可见闪长玢岩、辉绿岩等侵入岩, 纵向上可划分为半风化带和潜山内部^[18]。半风化带岩石颜色较浅, 主要为石英及长石, 少量暗色矿物, 其中部分岩石呈灰黑色, 发育孔隙-裂缝型和裂缝-孔隙型储层^[19]; 半风化带上部溶蚀作用较强, 缝孔洞较为发育, 风化比较严重, 长石大多已经风化为高岭土; 而在下部, 风化程度逐渐变弱。潜山内部则主要发育裂缝型储层和孔隙-裂缝型, 溶蚀孔、洞较少或者不发育。潜山储层主要发育三期裂缝^[20], 第一期裂缝主要发育在印支期, 受华北板块和扬子板块碰撞而产生的大量挤压构造裂缝; 第二期裂缝主要发育在燕山期, 郯庐断裂发生左旋走滑作用, 导致岩石破碎作用强烈,

形成大量碎裂岩和碎斑岩以及一系列动力破碎带, 并派生出大量裂缝; 第三期裂缝与新近纪太平洋俯冲和郯庐断裂发生的右旋走滑作用有关^[21]。

2 裂缝特征

2.1 岩芯薄片裂缝特征

天然裂缝按成因可分为构造裂缝、岩溶裂缝、热胀冷缩裂缝、干缩裂缝等^[22], 按充填情况可分为张开缝和充填缝两类^[23]。通过对 BZ19-6 区块的 112 块岩芯的观察(图 3 中 a、b 是原始岩芯, c、d 为其岩芯切面), 岩性为花岗片麻岩, 裂缝较发育, 多见微缝($<0.1\text{ mm}$)及小缝($0.1\sim0.5\text{ mm}$), 存在少量中缝($0.5\sim10\text{ mm}$)。裂缝产状主要为中高角度, 有少量的垂直缝和水平缝, 裂缝多呈网状交叉, 大多被充填-半充填。

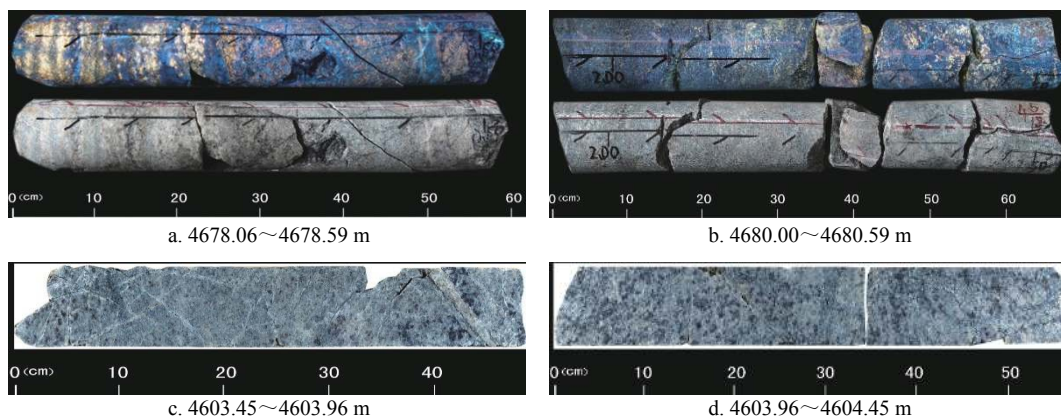


图 3 太古界天然裂缝岩芯图片

Fig.3 Core pictures of Archean natural fractures

观察 201 份岩芯薄片后,发现薄片裂缝较为发育,主要为微裂缝和小缝,大多处于充填-半充填状态。裂缝主要被云母化泥质、铁质、碳酸盐岩和黄铁矿充填,但也可见少量未充填的裂缝。其中,部分薄片显示斜长石绢云母化普遍,钾长石高岭土化,常见铁白云石交代现象及被铁质或铁泥质充填的岩石微裂缝(图 4a)。另外,部分薄片显示黑云母见后期白云石交代现象,见微小裂缝,宽度为 0.01~0.15 mm,其内被白云石、铁白云石和方解石所致密充填(图 4b、c)。此外,部分岩石内裂缝和颗粒裂隙也较为发育,缝宽为 0.01~0.20 mm,见被黄铁矿充填的微裂缝,但也可见少量未充填的裂缝(图 4d)。另有部分岩石内发育数条裂缝,缝宽为 0.01~0.17 mm,部分被碳酸盐矿物充填,也可见未充填裂缝,缝宽约为 0.01~0.03 mm(图 4e)。还有部分岩石见两期裂缝发育,缝宽为 0.02~0.05 mm,裂缝先被石英、白云石、方解石完全充填,后被铁质或铁白云石充填,微裂隙较为发育,微裂隙宽度为 0.01 mm 左右(图 4f)。

2.2 随钻成像测井裂缝特征

测井资料处理解释过程中将裂缝分为天然裂缝和诱导缝。其中,天然裂缝可进一步分为高阻缝和高导缝,按裂缝的倾角又可分为高角度裂缝、中角度裂缝和低角度裂缝。为了进一步了解该区块

的裂缝发育情况及特征,对该井进行了 Microscope-HD 随钻成像测井资料处理分析。结果显示,该区块发育高导缝(图 5a)、高阻缝(图 5b)、诱导缝(图 5c)及线理(图 5d)。其中,高导缝较为发育,走向主要有 NW-SE 和近 E-W 向(图 5e),以中高角度为主,倾角集中在 40°~70°,均值为 48°左右(图 5f)。裂缝宽度集中分布在 0.001~0.1 mm,其中 <0.1 mm 的裂缝占比 91.12%(图 5g);裂缝密度为 1~13 条/m,1~8 条/m 占所有的 96.22%,平均为 2.3~4.32 条/m(图 5h)。区块高阻缝发育较少,走向为 NNW-SSE,以中等角度为主。电成像测井只能识别到毫米级别的裂缝,埋深和充填情况都会降低其分辨率;而岩芯的分辨率可以达到亚毫米级别,可直接观察到岩石的构造和裂缝,但岩芯取样点不连续且难以覆盖整个井段。两者在识别裂缝的尺度上不统一,均难以识别研究区的微裂缝。因此,亟需一种更为精细、有效的裂缝评价方法。

3 研究方法

R/S 分析,也称为重标极差分析,由 Hurst 在 1951 年提出,用于研究尼罗河水流量与库容之间的关系^[24],后被众多学者证明它是分析一维分形变量的有效技术^[25-27]。对于单一岩性的地层,天然裂缝的发育给测井所测得的物理性质带来很大的变化,

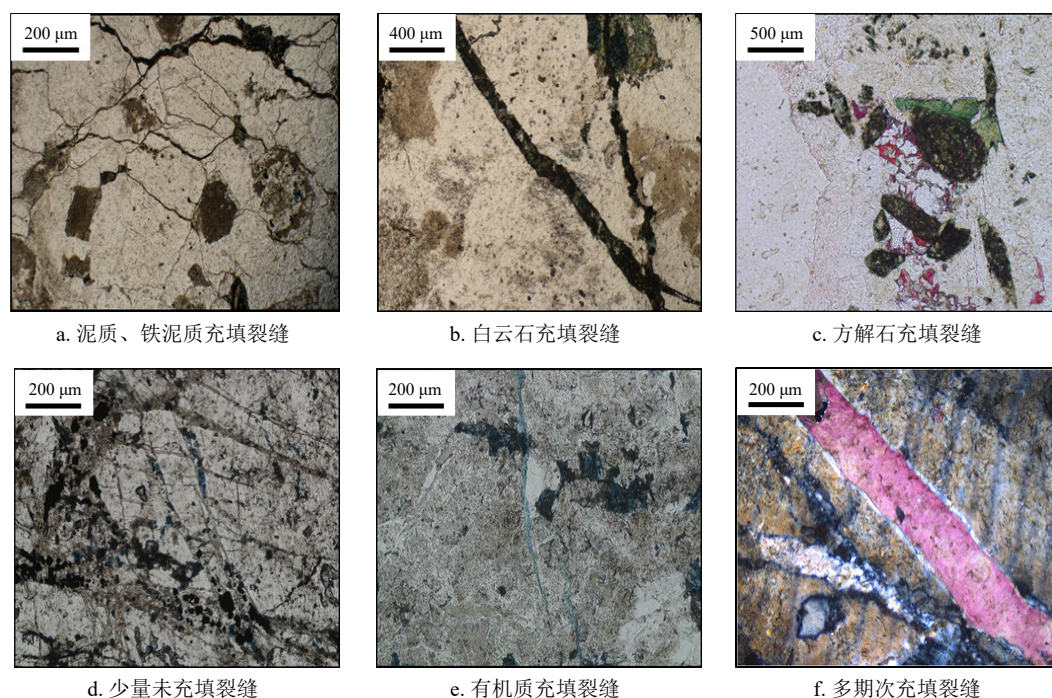


图 4 太古界岩石薄片

Fig.4 Rock slices of Archean strata

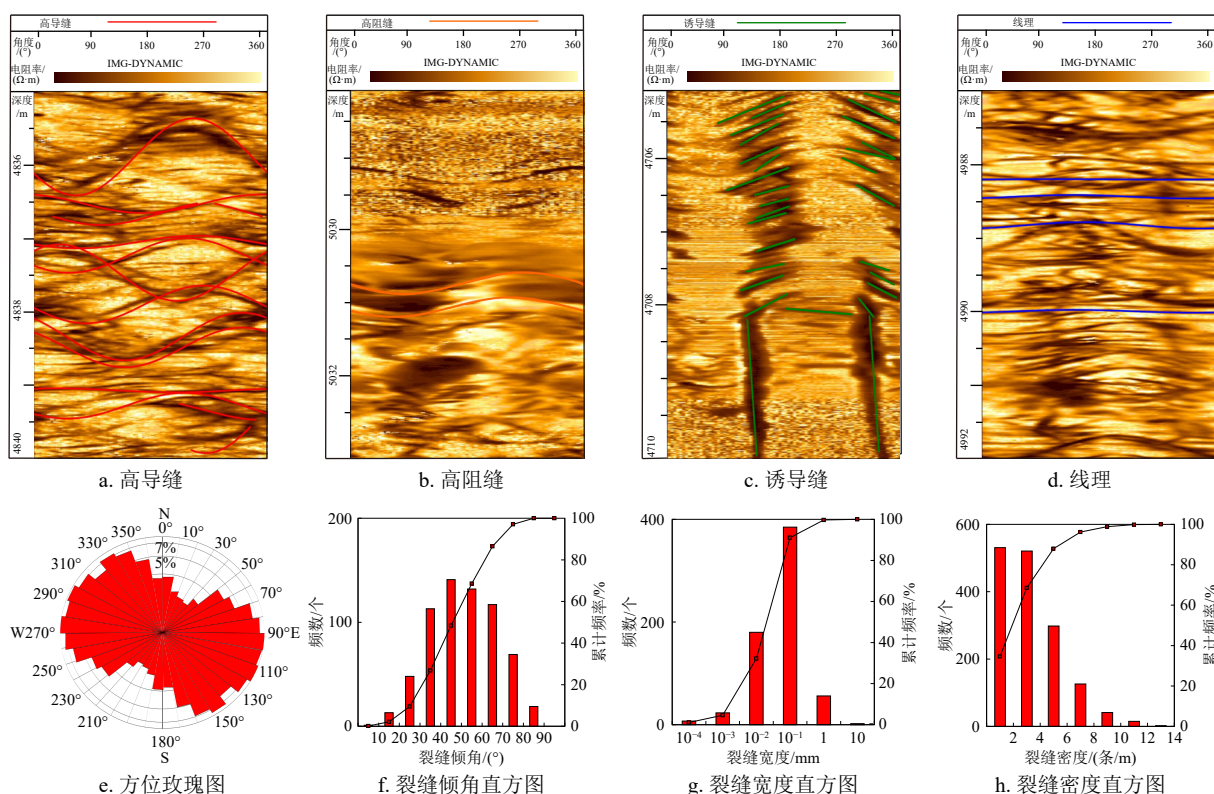


图 5 Microscope 电成像图裂缝特征

Fig.5 Fracture characteristics of Microscope electrical imaging

增强了地层的非均质性, 裂缝发育程度不同, 其物理性质的改变情况有所不同^[28]。因此, 可以根据测井曲线上的突变点大致判断裂缝的位置, 根据突变点的强弱分析裂缝的发育程度。

通过分析某些测井参数的 $R(n)/S(n)$ (后文缩写为 R/S) 与测井采样点 n 的关系, 预测裂缝的发育程度。如公式 (1)、(2)、(3) 所示, $R(n)$ 是最大累积偏差与最小累积偏差之差, 代表测井序列的复杂性; $S(n)$ 是变化的平方根, 代表时间序列的平均趋势; $Z(i)$ 是测井序列, 每一个采样间隔点上的值; i, j, k 是从 0 到 n 变化的常数, 其中 k 大于等于 i , H 表示赫尔特指数。

$$R(n) = \max_{0 < k < n} \left\{ \sum_{i=1}^k Z(i) - \frac{k}{n} \sum_{j=1}^n Z(j) \right\} - \min_{0 < k < n} \left\{ \sum_{i=1}^k Z(i) - \frac{k}{n} \sum_{j=1}^n Z(j) \right\} \quad (1)$$

$$S(n) = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z(i)^2 - \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z(j) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (2)$$

$$H = \frac{\partial \text{Lg}(R/S)}{\partial n} \quad (3)$$

通过数值模拟, 计算出 R 和 S 的值, 做 $\text{Lg}(R/S)$ 与 $\text{Lg}(n)$ 的散点图, 其斜率就代表赫尔特指数, H 的范围是 0 到 2, 可以通过 H 的大小判断裂缝的发育程度。再对 $\text{Lg}(R/S)$ 的值进行牛顿差分运算, n 阶差分如公式 (4) 所示:

$$\Delta^n f_i = \Delta^{n-1} f_{i+1} - \Delta^{n-1} f_i \quad (4)$$

对该区块 12 口井进行计算后发现, 二阶差分模型对该区块的裂缝位置预测准确性较高, 其模型如公式 (5) 所示:

$$K = \Delta^2 f_i = \Delta f_{i+1} - \Delta f_i = f_{i+2} - 2f_{i+1} + f_i \quad (5)$$

4 结果与讨论

该区块随钻测井曲线包含井径曲线 (CAL)、自然伽马曲线 (GR)、冲洗带电阻率曲线 (Rxo)、原状地层电阻率曲线 (Rt)、密度曲线 (RHOB)、中子曲线 (TNPH)、声波时差曲线 (DT) 等, 通过岩芯裂缝统计对比, 选择对天然裂缝较为敏感的测井参数。TNPH 曲线受岩性、钻井液等因素干扰严重; GR 曲线主要反映岩性的变化, 而泥质含量的变化和钻井液的变化会对 GR 值影响明显, 从而掩盖或放大裂

缝存在的信息,而花岗片麻岩地层较为致密,密度变化较小。相比之下,CAL、Rxo、DT三条测井曲线对裂缝更为敏感,而GR、RHOB、TNPH对裂缝的敏感度较低(图6)。通过实际处理,发现在 $Lg(n)=3.5$ 左右的深度为4 882 m处,R/S曲线出现明显的下凹区间,表明测井响应在此处有较大的变化,结合电成像图显示,此段裂缝高度发育。因此,本文选择CAL、Rxo、DT三条测井曲线进行处理分析,以进一步分类识别该井的裂缝发育程度。

选取30个层段共150 m,经过R/S分析发现,在花岗片麻岩中利用R/S分析方法能够有效识别裂缝的发育情况。该方法的准确性也得到了电成像资料的验证。针对这30个层段的CAL、Rxo、DT三条测井曲线的R/S分析结果,分别用 H_{CAL} 、 H_{Rxo} 、 H_{DT} 表示,并绘制了三维散点图(图7),发现分区性明显。因此,本文建立了针对花岗片麻岩储层的裂缝发育程度分类识别标准(表1)。

对R/S分析处理后的值采用牛顿差分的方法处理,经过对比后发现二阶差分对裂缝的位置识别较为准确,其中CAL、Rxo、DT曲线的二阶差分分别用 $K-CAL$ 、 $K-Rxo$ 、 $K-DT$ 表示。如图8所示,对电阻率Rxo曲线进行R/S分析,进一步采用牛顿差分的方法处理,得出以下结论:①定义R/S曲线明显下凹的部分为下凹区间,其二阶差分的值为正且大于0.0001,主要反映测井曲线的变化情况,对应裂

缝发育段;②定义R/S曲线明显上凸的部分为上凸区间,其二阶差分的值为负,主要反映基岩段,其裂缝不发育或发育程度低。由式(5)计算的二阶差分K值与测井曲线分析的R/S曲线的下凹区间吻合较好,证明K值对识别曲线的下凹区间是有效的,进一步证明了识别裂缝发育位置的准确性。

如表2显示,通过牛顿二阶差分K值与随钻Microscope-HD电成像图共识别出3个有效的区域类别:①井壁崩落区: $K-CAL$ 值较大, $K-DT$ 和 $K-Rxo$ 值较小,因此 $K-CAL$ 值可以明显预测井壁崩落的位置;②裂缝发育区: $K-DT$ 敏感程度强,从图像上也可以发现,裂缝发育的小层段, $K-DT$ 值都比较突出;③基岩区: $K-Rxo$ 值突出,成像图上显示特征为高阻亮色,裂缝不发育。对每一个区域类别的深入对比分析,可以得出以下结论:① $K-CAL$ 值可以区分井壁崩落区和裂缝发育区,井壁崩落区 $K-CAL > 0.00003$,裂缝发育区 $K-CAL < 0.00003$;② $K-DT$ 值对裂缝的发育位置识别较为准确,即裂缝越发育, $K-DT$ 越大;③ $K-Rxo$ 值可以区分裂缝发育区和基岩区,裂缝发育区 $K-Rxo < 0.00001$,基岩区 $K-Rxo > 0.00001$ 。

在裂缝发育区($K-Rxo < 0.00001$),为进一步识别裂缝的发育程度,除了应用前文的赫尔特指数H值之外,电成像解释的裂缝线密度与 $K-Rxo$ 散点图(图9)显示,裂缝线密度与 $K-Rxo$ 值呈正相关,

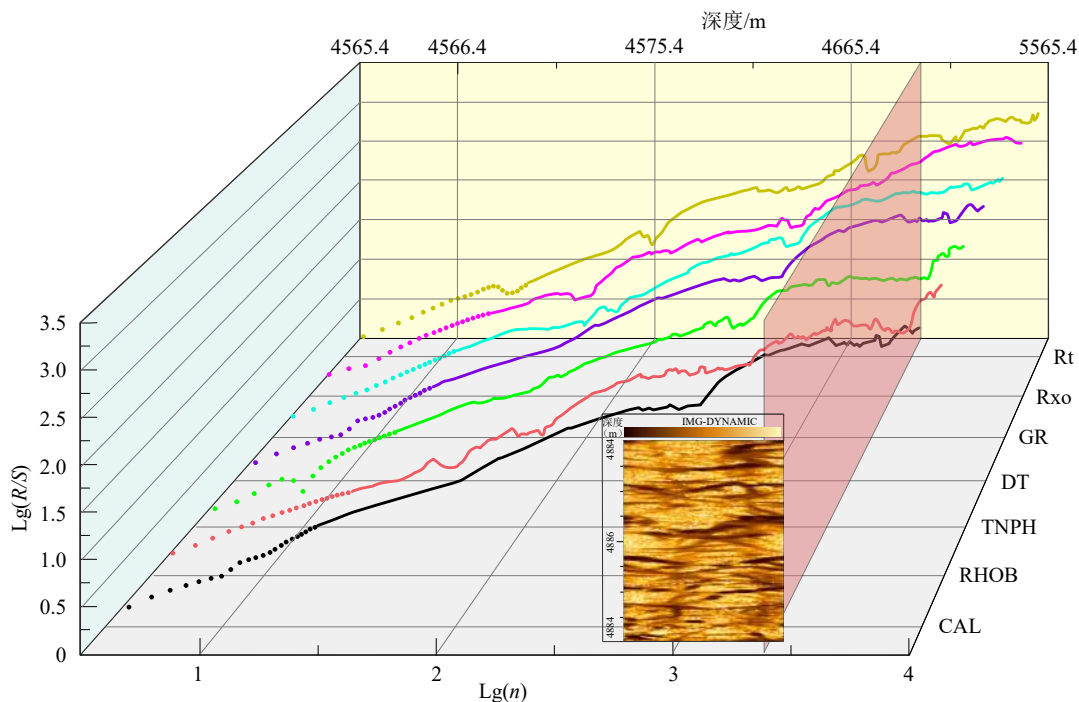


图6 R/S分析曲线

Fig.6 R/S analysis curve

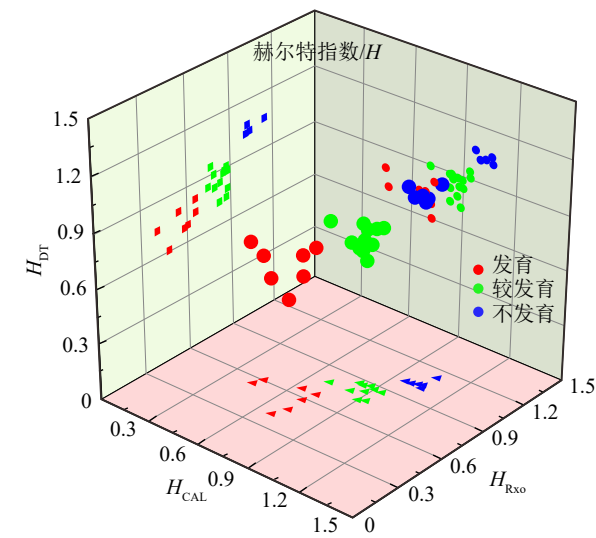


图 7 赫尔特指数三维散点图

Fig.7 Three-dimensional scatter plot of Hurst index

即裂缝线密度越大, K -Rxo 值越大, 其相关性 $R^2=0.8895$ 。因此, 在裂缝发育区 (K -Rxo <0.00001), K -Rxo 值越大, 裂缝线密度越大, 裂缝越发育。

表 1 花岗片麻岩储层裂缝发育程度分类识别标准

Table 1 Classification and identification standard of fracture development degree of granite gneiss reservoir

裂缝发育情况	H_{CAL}	H_{Rxo}	H_{DT}
不发育	>0.95	>1.0	>1.0
较发育	$0.75<H_{CAL}<0.95$	$0.7<H_{Rxo}<1.0$	$0.75<H_{DT}<1.0$
发育	<0.75	<0.7	<0.75

裂缝是油气井初周日产量的主要影响因素之一, 初周的日产气和日产液可间接验证研究区裂缝的发育程度与分形维数的预测效果。选取研究区裂缝较为发育的层段, 其垂直深度在 4 650~4 700 m, 在研究区井位平面图上绘制裂缝发育层段 DT 曲线 R/S 分析曲线二阶差分 K 值的等值图, 结合初周日产量与电成像图等资料, 对 BZ19-6 气田的裂缝相对发育情况进行预测(图 10)。由图可知, A7H 井裂缝较发育, A3H 井裂缝发育程度低。在其他各种因素相近的条件下, 牛顿差分 K 值与油气井初周日

表 2 牛顿二阶差分 K 值与 Microscope-HD 电成像图对比

Table 2 Comparison of Newton 's second-order difference K value and Microscope-HD electrical imaging map

类别	测井曲线特征				参数特征
	K-CAL 00.0005 CAL 4in10	深度/m DT 90μs/ft40	K-DT 00.00030 Rxo 0.5Ω-m50000	K-Rxo 00.0001 IMG_DYNAMIC 0Ω-m256	
井壁崩落区					①K-CAL>0.00003 ②K-DT<0.00001 ③K-Rxo<0.00001
裂缝发育区					①K-CAL<0.00003 ②K-DT>0.00001 ③K-Rxo<0.00001
基岩区					①K-CAL<0.00003 ②K-DT>0.00001 ③K-Rxo>0.00001

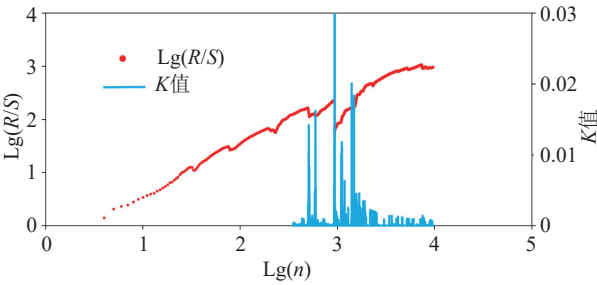


图 8 Lg(R/S) 曲线的 K 值和凹区间对比

Fig.8 Comparison of K value and concave interval of Lg(R/S) curve

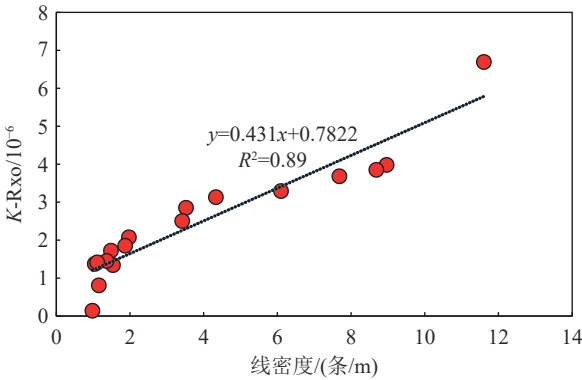


图 9 裂缝线密度与 K-Rxo 散点图

Fig.9 Fracture line density and K-Rxo scatter plot

产液产量间存在正相关性, 裂缝相对发育区的产量明显高于裂缝相对不发育区。

计算结果表明, 应用 R/S 分析结合二阶差分的方法进行裂缝识别和预测不仅具备坚实的理论基

础, 而且计算结果与成像测井所解释的裂缝信息具有较好的吻合度。客观地分析此方法识别裂缝精度存在误差的原因主要有以下 3 个方面: 一是测井信息不仅包括裂缝信息, 还包括母岩本身的纵向非均质性信息(如岩性、物性、电性、含水饱和度等), 其势必会给裂缝识别带来一定的影响; 且岩性从花岗片麻岩变为闪长玢岩(图 11), 而又有裂缝发育, 其中 K -DT 值与 K -Rxo 值较小, 因此对非花岗片麻岩储层中的裂缝 K 值预测效果欠佳。二是研究区天然裂缝中充填方解石、白云石、石英、黄铁矿和泥质等矿物, 当裂缝被矿物充填时, 测井响应特征不明显, 因此对完全充填缝的识别较难。三是该区块的裂缝宽度集中分布在 $0.001 \sim 0.1 \text{ mm}$, 大量数据表明此方法对裂缝宽度小于 0.005 mm 的微裂缝仍然有响应, 但特征不明显, 因此裂缝的宽度对识别效果有影响。

5 结论

(1) 将 R/S 分析和牛顿差分法相结合改进的裂缝识别方法, 在变质岩储层裂缝评价中具有可行性, 并建立了利用赫尔特指数识别花岗片麻岩储层裂缝发育程度分类标准。

(2) 此方法可识别宽度大于 0.005 mm 的裂缝, 提高了裂缝识别的精度。此外, 研究还发现, K -Rxo 值与裂缝线密度呈正相关关系, 且相关性较好。

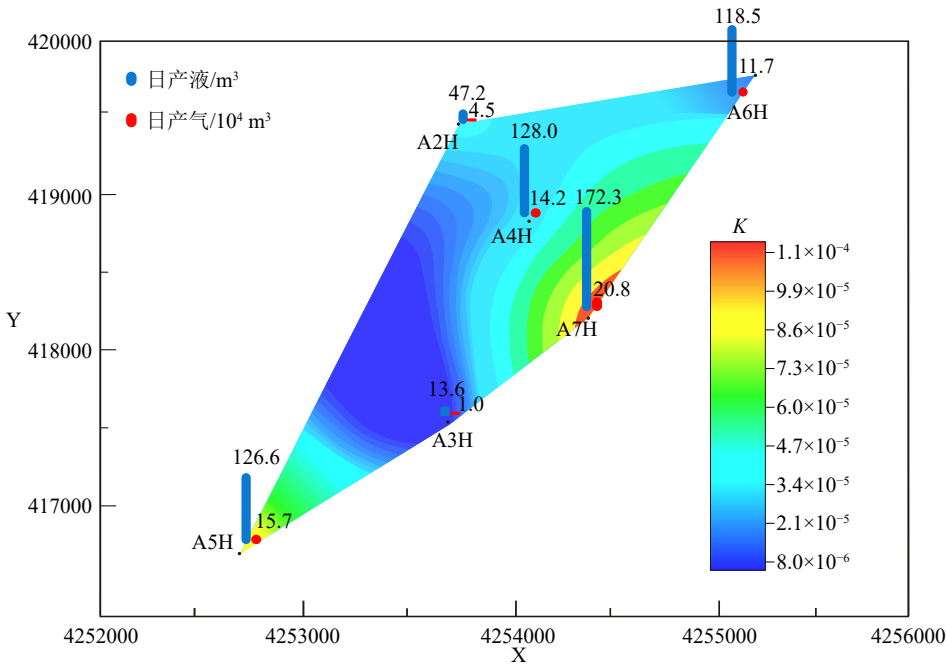


图 10 BZ19-6 气田裂缝发育预测

Fig.10 Prediction of Fracture Development in BZ19-6 Gas Field

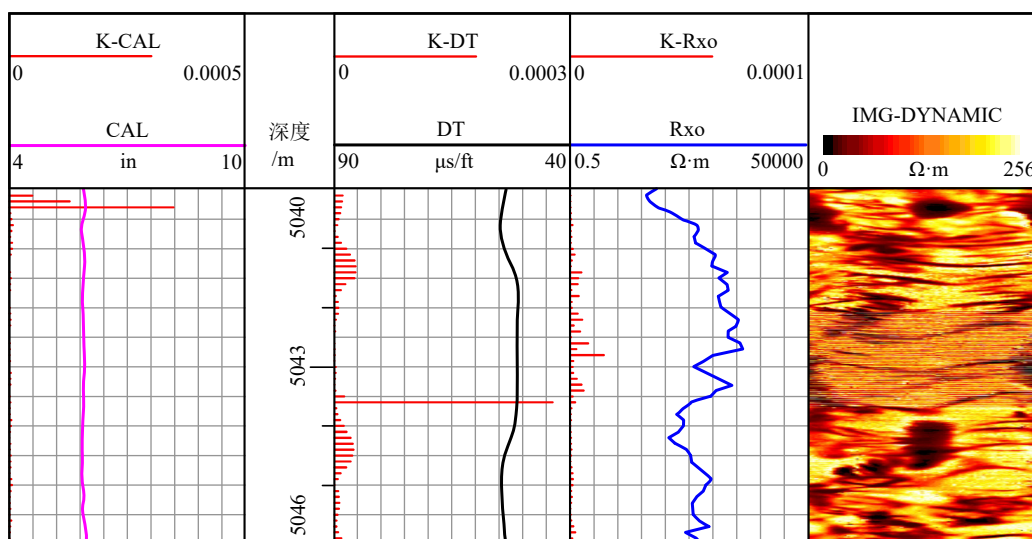


图 11 非花岗片麻岩裂缝发育特征

Fig.11 Fracture development characteristics of non-granitic gneiss

(3) 岩性各向异性和裂缝充填情况影响常规测井曲线 R/S 分析方法识别裂缝的精度。

参考文献 (References)

- [1] 薛永安, 王德英. 渤海湾油型湖盆大型天然气藏形成条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 260-271. [XUE Yong'an, WANG Deying. Formation conditions and exploration direction of large natural gas reservoirs in the oil-prone Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 260-271.]
- [2] 李欣, 李建忠, 杨涛, 等. 渤海湾盆地油气勘探现状与勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(2): 140-144. [LI Xin, LI Jianzhong, YANG Tao, et al. Oil-gas exploration status and future targets in Bohai Bay Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(2): 140-144.]
- [3] 薛永安, 李慧勇. 渤海海域深层太古界变质岩潜山大型凝析气田的发现及其地质意义[J]. 中国海上油气, 2018, 30(3): 1-9. [XUE Yong'an, LI Huiyong. Large condensate gas field in deep Archean metamorphic buried hill in Bohai sea: discovery and geological significance [J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(3): 1-9.]
- [4] 侯明才, 曹海洋, 李慧勇, 等. 渤海海域渤中19-6构造带深层潜山储层特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 33-44. [HOU Mingcai, CAO Haiyang, LI Huiyong, et al. Characteristics and controlling factors of deep buried-hill reservoirs in the BZ19-6 structural belt, Bohai Sea area [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1): 33-44.]
- [5] 徐长贵, 于海波, 王军, 等. 渤海海域渤中19-6大型凝析气田形成条件与成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 25-38. [XU Changgui, YU Haibo, WANG Jun, et al. Formation conditions and accumulation characteristics of Bozhong 19-6 large condensate gas field in offshore Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 25-38.]
- [6] 肖述光, 吕丁友, 侯明才, 等. 渤海海域西南部中生代构造演化过程与潜山形成机制[J]. 天然气工业, 2019, 39(5): 34-44. [XIAO Shuguang, LÜ Dingyou, HOU Mingcai, et al. Mesozoic tectonic evolution and buried hill formation mechanism in the southwestern Bohai Sea [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(5): 34-44.]
- [7] 韩磊, 刘俊州, 刘振峰, 等. 裂缝型储层测井评价方法及应用研究[J]. 国外测井技术, 2017, 38(4): 8-13. [HAN Lei, LIU Junzhou, LIU Zhenfeng, et al. Method of well logging interpretation for fracture reservoirs and its application [J]. World Well Logging Technology, 2017, 38(4): 8-13.]
- [8] Xiao Z K, Ding W L, Liu J S, et al. A fracture identification method for low-permeability sandstone based on R/S analysis and the finite difference method: a case study from the Chang 6 reservoir in Huaqing oil-field, Ordos Basin [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 174: 1169-1178.
- [9] 陈义国, 张丽霞, 赵谦平, 等. 三介质模型常规测井变尺度极差分析裂缝预测技术[J]. 断块油气田, 2012, 19(1): 84-87. [CHEN Yiguo, ZHANG Lixia, ZHAO Qianping, et al. Fracture prediction using rescaled range analysis and based on conventional logging data of triple media model [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2012, 19(1): 84-87.]
- [10] Li A, Ding W L, Luo K P, et al. Application of R/S analysis in fracture identification of shale reservoir of the Lower Cambrian Niutitang Formation in northern Guizhou Province, South China [J]. Geological Journal, 2020, 55(5): 4008-4020.
- [11] Zhang H, Ju W, Yin G Q, et al. Natural fracture prediction in Keshen 2 ultra-deep tight gas reservoir based on R/S analysis, Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Geosciences Journal, 2021, 25(4): 525-536.
- [12] Xiao Z K, Ding W L, Hao S Y, et al. Quantitative analysis of tight sandstone reservoir heterogeneity based on rescaled range analysis and empirical mode decomposition: a case study of the Chang 7 reservoir in the Dingbian oilfield [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 182: 106326.
- [13] Aghli G, Moussavi-Harami R, Tokhmechi B. Integration of sonic and resistivity conventional logs for identification of fracture parameters in

- the carbonate reservoirs (A case study, Carbonate Asmari Formation, Zagros Basin, SW Iran) [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 186: 106728.
- [14] Ge X M, Fan Y R, Zhu X J, et al. A method to differentiate degree of volcanic reservoir fracture development using conventional well logging data—an application of kernel principal component analysis (KPCA) and multifractal detrended fluctuation analysis (MFDFA) [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(12): 4972-4978.
- [15] 倪金龙, 夏斌. 断块运动与潜山油气藏的形成: 以渤海湾盆地为例 [J]. 天然气工业, 2006, 26(2): 32-35. [NI Jinlong, XIA Bin. Fault block movement and formation of buried hill hydrocarbon reservoir: taking Bohai Bay Basin as an example [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(2): 32-35.]
- [16] 薛永安, 柴永波, 周园园. 近期渤海海域油气勘探的新突破 [J]. 中国海上油气, 2015, 27(1): 1-9. [XUE Yong'an, CHAI Yongbo, ZHOU Yuanyuan. Recent new breakthroughs in hydrocarbon exploration in Bohai sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(1): 1-9.]
- [17] 龚再升. 中国近海含油气盆地新构造运动与油气成藏 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2004, 29(5): 513-517. [GONG Zaisheng. Neotectonics and petroleum accumulation in offshore Chinese basins [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(5): 513-517.]
- [18] 宋国民, 张艳, 李慧勇, 等. 渤中凹陷19-6区太古界潜山变质岩岩石类型及鉴别特征 [J]. 世界地质, 2020, 39(2): 344-352. [SONG Guomin, ZHANG Yan, LI Huiyong, et al. Types and identification characteristics of Archean metamorphic rocks of Buried Hill in 19-6 area of Bozhong sag [J]. *Global Geology*, 2020, 39(2): 344-352.]
- [19] 付晓飞, 宋宪强, 王海学, 等. 裂陷盆地断层圈闭含油气有效性综合评价: 以渤海湾盆地歧口凹陷为例 [J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(4): 677-686. [FU Xiaofei, SONG Xianqiang, WANG Haixue, et al. Comprehensive evaluation on hydrocarbon-bearing availability of fault traps in a rift basin: a case study of the Qikou Sag in the Bohai Bay Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(4): 677-686.]
- [20] 施和生, 王清斌, 王军, 等. 渤中凹陷深层渤中19-6构造大型凝析气田的发现及勘探意义 [J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 36-45. [SHI Hesheng, WANG Qingbin, WANG Jun, et al. Discovery and exploration significance of large condensate gas fields in BZ19-6 structure in deep Bozhong sag [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(1): 36-45.]
- [21] 童凯军, 赵春明, 吕坐彬, 等. 渤海变质岩潜山油藏储集层综合评价与裂缝表征 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 56-63. [TONG Kaijun, ZHAO Chunming, LÜ Zuobin, et al. Reservoir evaluation and fracture characterization of the metamorphic buried hill reservoir in Bohai Bay [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 56-63.]
- [22] Nelson R A. *Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs* [M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2001.
- [23] 牛虎林, 胡欣, 徐志强, 等. 基岩油气藏裂缝性储层的成像测井评价及裂缝预测 [J]. 石油学报, 2010, 31(2): 264-269. [NIU Hulin, HU Xin, XU Zhiqiang, et al. Evaluation of imaging logging and fracture prediction in fractured basement reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(2): 264-269.]
- [24] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1951, 116(1): 770-799.
- [25] Mandelbrot B B, Wallis J R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence [J]. *Water Resources Research*, 1969, 5(5): 967-988.
- [26] Miranda J G V, Andrade R F S. Rescaled range analysis of pluviometric records in Northeast Brazil [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 1999, 63(1): 79-88.
- [27] Beretta A, Roman H E, Raicich F, et al. Long-time correlations of sea-level and local atmospheric pressure fluctuations at Trieste [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2005, 347: 695-703.
- [28] Pang J, North C P. Fractals and their applicability in geological wireline log analysis [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1996, 19(3): 339-350.