

基于成像测井的深层陆相页岩油储层天然裂缝有效性评价

杜晓宇¹,金之钧^{1,2},曾联波^{1,3},刘国平¹,杨森⁴,梁新平¹,陆国青³

[1. 北京大学 能源研究院,北京 100871;2. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室,北京 100083;3. 中国石油大学(北京) 地球科学学院,北京 102249;4. 中国石油 新疆油田公司 勘探开发研究院,新疆 克拉玛依 834000]

摘要:准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组陆相页岩油储层埋深超过4 500 m,天然裂缝作为重要的储集空间和渗流通道,对页岩油的富集和高产至关重要。尽管前人对风城组裂缝进行了表征,但是在裂缝有效性评价方面缺少系统研究,严重制约了玛湖凹陷页岩油下一步的勘探开发。基于微电阻率成像测井资料,对研究区天然裂缝的发育规律和有效性进行了系统研究。研究表明:准噶尔盆地玛湖凹陷风城组陆相页岩油储层天然裂缝有穿层裂缝和层内裂缝两类。穿层裂缝规模较大,裂缝高度通常超过米级,受断层的控制;层内裂缝发育在脆性地层内,裂缝高度受岩层厚度的控制,多小于50 cm。垂向上单井裂缝发育程度与脆性矿物含量呈正相关关系;平面上随距断层距离的增加,裂缝发育程度逐渐降低。不同方位裂缝的充填情况差异较大,北西-南东向裂缝多数未被矿物充填,有效性好。随着埋深增加,裂缝开度整体呈现减小的趋势。评价认为北东东-南西西向裂缝的开度最大,有效性最好。

关键词:有效性;成像测井;天然裂缝;页岩油;风城组;玛湖凹陷;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Evaluation of natural fracture effectiveness in deep lacustrine shale oil reservoirs based on formation microresistivity imaging logs

DU Xiaoyu¹, JIN Zhijun^{1,2}, ZENG Lianbo^{1,3}, LIU Guoping¹, YANG Sen⁴, LIANG Xinping¹, LU Guoqing³

[1. Institute of Energy, Peking University, Beijing 100871, China; 2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China; 3. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China]

Abstract: The lacustrine shale oil reservoirs of the Fengcheng Formation in the Mahu Sag, Junggar Basin have burial depths exceeding 4 500 m. Natural fractures in these reservoirs, serving as important storage spaces and seepage channels, are critical to the enrichment and high yield of shale oil. There is a lack of systematic study on their effectiveness evaluation despite existing characterization of these fractures in previous works, severely restricting the further exploration and exploitation of shale oil in the Mahu Sag. Given this, we conduct a systematic study on the distribution patterns and effectiveness evaluation of natural fractures in the study area using formation microresistivity imaging (FMI) logs. The results indicate that there exist two types of natural fractures in the lacustrine shale oil reservoirs in the study area: cross-layer fractures and intralayer fractures. The cross-layer fractures are characterized by a large scale, with heights generally reaching up to several meters or above, and their distribution is governed by faulting. The intralayer fractures are found within brittle beds, and their heights are limited by the thickness of rock layers, largely less than 50 cm. Vertically, the fracture density in a single well is positively correlated with the brittle mineral content. Laterally, the fracture density gradually decreases with increasing distance from faults. Fractures with different orientations exhibit greatly varying degrees of filling. The NW-SE-trending fractures, among others, are mostly not filled with minerals, thus boasting high effectiveness. As the burial depth increases, fracture apertures generally

收稿日期:2024-02-23;修回日期:2024-05-14。

第一作者简介:杜晓宇(1995—),男,博士研究生,页岩油储层天然裂缝。E-mail: duxiaoyu2016@163.com。

通信作者简介:金之钧(1957—),男,中国科学院院士,石油地质理论和能源战略研究。E-mail: jinzhijun@pku.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42090025,42302148);中国石油科技创新基金项目(2023DQ02-0103)。

trend downward. The evaluation results reveal that the NEE-SWW-trending fractures exhibit the largest aperture and, accordingly, the highest effectiveness.

Key words: effectiveness, formation microresistivity imaging logging, natural fracture, shale oil, Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin

引用格式:杜晓宇,金之钧,曾联波,等. 基于成像测井的深层陆相页岩油储层天然裂缝有效性评价[J]. 石油与天然气地质,2024,45(3):852-865. DOI:10.11743/ogg20240319.

DU Xiaoyu, JIN Zhijun, ZENG Lianbo, et al. Evaluation of natural fracture effectiveness in deep lacustrine shale oil reservoirs based on formation microresistivity imaging logs[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 852-865. DOI: 10.11743/ogg20240319.

近年来,随着非常规油气资源勘探的不断深入,页岩油已经成为全球原油增储上产的主体^[1-3]。中国陆相页岩油资源潜力巨大,主要分布在松辽盆地白垩系、渤海湾盆地古近系、鄂尔多斯盆地三叠系以及准噶尔盆地二叠系等地层^[4-7]。玛湖凹陷二叠系风城组发育一套咸化湖相混积型页岩,与中国中东部陆相页岩油储层相比,风城组埋深超过4 500 m,属于典型的深层页岩油藏^[8-10]。长期埋藏过程中强烈的压实和胶结作用使风城组物性极差,孔隙度和渗透率分别小于5%和 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[11-12]。前期研究表明风城组页岩油储层原生孔隙较少,有利储集空间主要由溶蚀孔等次生孔隙和天然裂缝组成^[8-9]。然而目前玛湖凹陷单井日产油量超过100 t,压力和产量相对稳定^[12-13],因此在页岩油的富集和开发过程中天然裂缝无疑发挥着重要的作用。

前人的研究主要集中在碎屑岩、碳酸盐岩和火山岩等不同类型的储层上,对天然裂缝的发育特征、成因机制和控制因素等方面进行了广泛研究^[14-23],然而针对深层陆相页岩裂缝有效性评价的系统研究却比较少。露头、岩心和薄片资料表明,页岩储层中天然裂缝通常被石英、方解石等矿物不同程度胶结,未充填裂缝的开度变化也比较大,裂缝的有效性差异较大^[5, 15, 24-26]。在实际地层条件下,张开裂缝能够有效提高储层的孔隙度尤其是渗透率,充填裂缝则会起到渗流屏障的作用^[27-29]。因此,研究有效裂缝的发育特征和分布规律对于预测页岩油储层甜点分布非常关键,对研究区未来的勘探和开发具有重要的指导意义。本文基于微电阻率成像测井资料识别和表征了风城组不同类型裂缝,分析了裂缝的发育规律,在此基础上进一步讨论了影响裂缝有效性的控制因素,以期对该区页岩油的开发提供一定的地质依据。

1 地质背景

准噶尔盆地位于西伯利亚板块、欧洲板块和塔里

木板块的交汇处,是中国西部的一个大型叠合含油气盆地(图1a),面积约为 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[30-31]。盆地周缘被北天山造山带、西准噶尔造山带和克拉美丽造山带所围限。玛湖凹陷位于盆地西北缘的中央坳陷区域,北部受克百断裂带和乌夏断裂带控制,西侧与中拐凸起相邻,南临达巴松凸起,东部与石英滩凸起、英西凹陷以及夏盐凸起相接^[32](图1b)。自晚古生代以来,玛湖凹陷经历了海西、印支、燕山和喜马拉雅4期构造运动。在海西期受到强烈挤压应力作用下形成,并在印支期持续活动的大型逆冲断裂,控制了区内主要构造的形成与发育^[33-34]。现今的凹陷呈现出西陡东缓的不对称箕状特征,平面上为北东-南西向展布的椭圆状,面积约为 $5\,000 \text{ km}^2$ ^[9, 11, 34]。

玛湖凹陷在前石炭系基底之上沉积了一套二叠系—白垩系相对完整的地层。二叠系包括佳木河组(P_j)、风城组(P_f)、夏子街组(P_{2x})、下乌尔禾组(P_{2w})和上乌尔禾组(P_{3w})。风城组发育了一套以湖相细粒沉积为主的地层,沉积厚度为800~1 800 m,平面上由西北至东南方向逐渐减薄^[11, 36]。整体为扇三角洲—湖泊沉积体系,局部发育滨浅湖—半深湖沉积亚相^[35-36]。基于沉积和电性特征差异,风城组自下而上可分为风一段(P_{1f}^1)、风二段(P_{1f}^2)和风三段(P_{1f}^3)。风一段沉积早期伴随频繁的火山活动,下部主要由火山碎屑岩组成;风一段沉积晚期到风二段早期湖泊扩张,之后逐渐转变为湖退,主要发育富有机质泥岩和白云质泥岩;风三段沉积时外源输入增加,同时发育大量碎屑岩类^[8, 11, 37-38]。

2 裂缝识别方法

本次研究主要基于微电阻率成像测井仪(FMI)采集的钻孔图像资料,层理缝和缝合线等成岩裂缝规模较小,在成像测井图像上很难识别,因此将构造裂缝作为本次研究的重点。测井仪通过在钻孔中进行全方位连续测量,可以将电导率差异转变为色度明暗

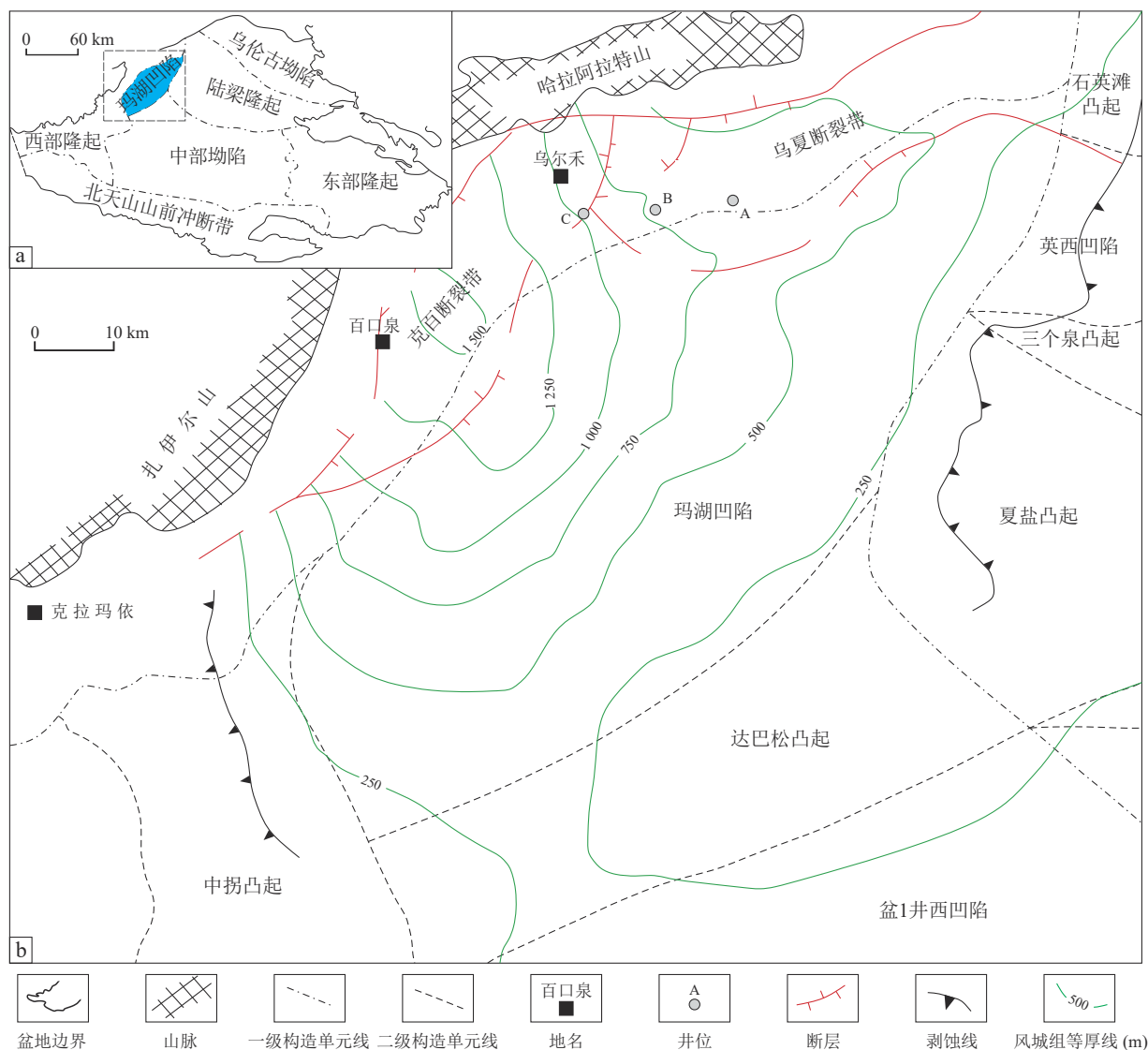


图1 准噶尔盆地位置和玛湖凹陷构造简图(据文献[11,35]修改)

Fig. 1 Sketch maps showing the location of the Junggar Basin and structural units in the Mahu Sag (modified after references [11, 35])

图像,识别出井壁附近的沉积结构、裂缝、层面和孔洞等地质特征^[39-40],具有纵向连续性好、准确度高、分辨率高等优势。在实际地层条件下,裂缝通常与井壁呈一定角度相交(图2a),因此将成像测井图像从0°(正北方向)顺时针展开后,裂缝会呈现为正弦曲线(图2b,c)。

成像测井解释作为目前识别钻井裂缝最有效的方法,可以直接获得裂缝的方位和倾角。因为采集成像测井图像时会定位正北方向,展开图像上正弦曲线最低点的对应方向即为裂缝倾向。正弦曲线振幅与井筒直径的反正切值即为裂缝倾角^[40]。裂缝线密度被定义为沿着测线方向单位长度的裂缝数量^[41],本次研究使用垂直井筒作为测线。裂缝线密度需要通过钻孔采样偏差的角度进行校正^[42]。真实裂缝线密度由原始

裂缝线密度除以 $\cos\alpha$ 得出,其中 α 是井筒与裂缝表面法线方向之间的夹角。需要说明的是,用于校正的最大角度为85°。因为当钻孔接近平行于裂缝时,由于采集的裂缝太少,无法准确测量密度,且 $\cos\alpha$ 接近于0,修正值趋于无穷大。

3 裂缝发育特征

3.1 裂缝类型及特征

研究区成像测井图像上可以观测到大量天然裂缝,基于裂缝的分布特征,结合前人提出的分类方案^[43-44],将风城组页岩油储层的构造成因裂缝分为穿层裂缝和层内裂缝2种类型。穿层裂缝的规模较大,

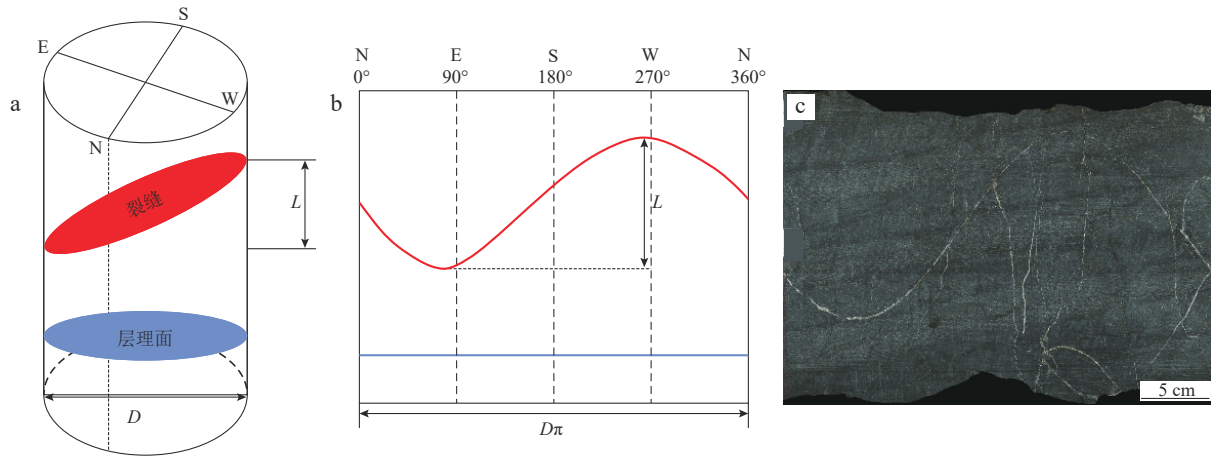


图2 基于成像测井识别裂缝示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing the identification of fractures based on FMI logs

a. 井筒裂缝和层理, 据文献[40]修改; b. 井筒裂缝和层理沿平面展开图, 据文献[40]修改; c. 成像测井对应的岩心裂缝扫描图
(D 为井筒直径, cm; L 为裂缝在井筒上的垂向高度, cm。)

呈高角度在垂向上贯穿多套岩层, 包括不同类型的纹层和岩性层, 裂缝高度通常达到米级(图3a, d)。层内裂缝规模较小, 表现为被限制在单一岩层内或终止于岩层边界的典型特征。成像测井图像上, 层内张开裂缝表现为正弦曲线的一部分, 局限在色度基本一致的岩性层内发育, 裂缝高度多小于50 cm(图3b, e, f)。这

是由于研究区多种岩性频繁互层, 不同类型纹层发育, 因此, 控制层内裂缝形成与分布的岩石力学层厚度较小^[45]。成像图像上可以见到一些规模较小的断层, 其典型特征是断层附近地层的倾角变陡, 并伴随明显的地层错动, 剪切位移可达数十厘米(图3c)。穿层裂缝与断层的区别在于, 穿层裂缝虽然也在纵向上切穿多

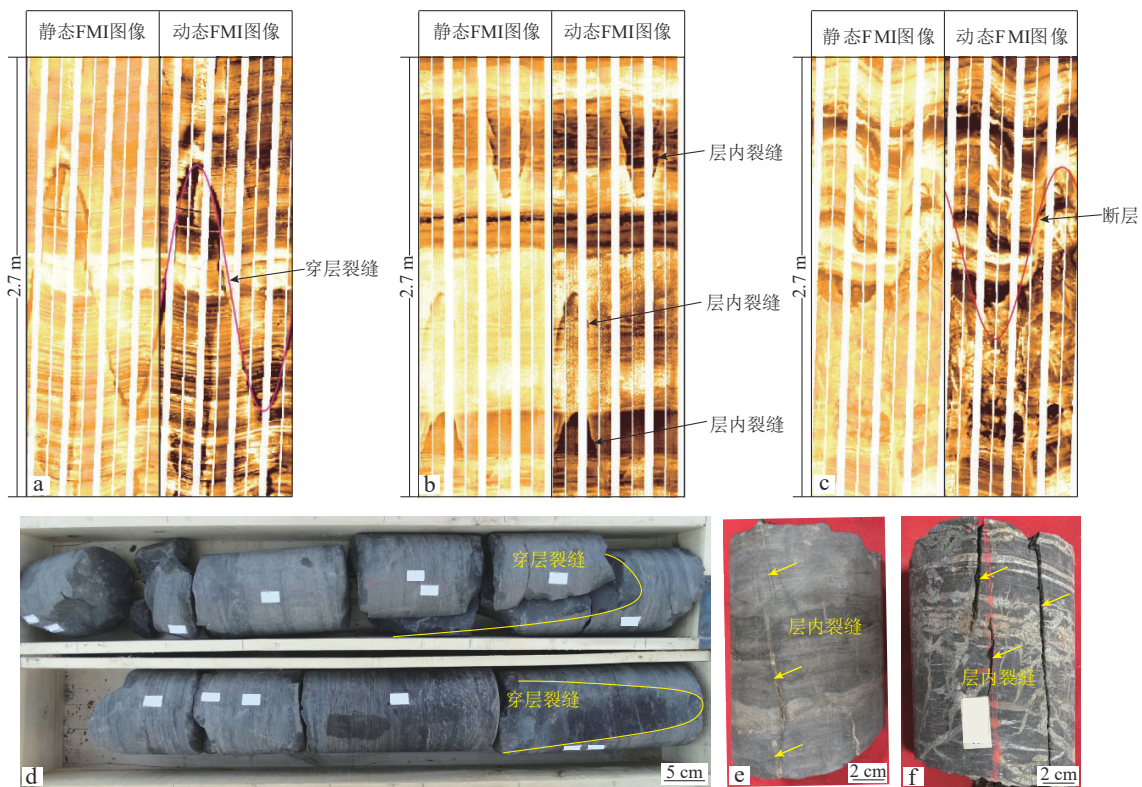


图3 玛湖凹陷成像测井图像(a—c)和岩心照片(d—f)中识别的不同类型天然裂缝

Fig. 3 Various types of natural fractures identified from the FMI images and core photos of the Mahu Sag

a. 穿层裂缝; b. 层内裂缝; c. 断层; d. 岩心中穿层裂缝规模较大; e, f. 岩心中层内裂缝规模较小

套岩层,但地层没有倾斜更不会发生错断。前期研究结果表明,穿层裂缝的形成与断层附近的局部应力场密切相关,在断层附近穿层裂缝的数量和比例会明显增多;层内裂缝则不受断层的影响,主要位于云质岩和云质泥岩等高脆性岩石力学层内,受控于大规模的区域构造活动^[46]。

基于成像测井资料解释,分析了玛湖凹陷风城组页岩油储层中天然裂缝的方位、倾角和开度。结果表明,研究区主要发育北西-南东向、北北西-南南东向、北北东-南南西向以及近东西向4组裂缝,穿层裂缝的走向主要为近东西向(图4a—c),层内裂缝走向复杂,以北西-南东向、北北西-南南东向以及北北东-南南西向为主(图4d—f)。风城组主要发育中、高角度($40^{\circ} \sim 90^{\circ}$)裂缝,A井77%的裂缝大于 60° , $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 的裂缝占比23%(图5a);B井的裂缝倾角主要分布在 $40^{\circ} \sim 90^{\circ}$,占比90%, $0^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 的裂缝仅占10%(图5b)。这2口井的裂缝倾角变化是地层的产状差异所致,A井距离断层较远,地层接近水平,裂缝表现为真实产状;B井距离断层相对较近,地层发生倾斜,导致原本与地层接近垂直的高角度裂缝发生了 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 的偏转。

3.2 裂缝发育规律

玛湖凹陷风城组页岩油储层富含脆性矿物,石英、长石以及碳酸盐矿物的总含量为34%~95%,平均含量达到了80%,脆性矿物含量大于70%的样品占比83%(图6a)。在脆性矿物中,碳酸盐矿物含量最高,平均为31%,石英和长石次之,平均含量分别为30%和18%。A井裂缝分布结果表明,脆性矿物含量明显影响了天然裂缝的发育,裂缝密度与脆性矿物含量之间存在明显的正相关关系(图6b)。这是因为石英、长石和碳酸盐矿物具有高杨氏模量、低泊松比、高硬度以及强抗应力变形等特点,在相同的构造应力作用下,它们在发生破裂之前承受的应变更小,因此更有利于岩石形成天然裂缝^[2, 47]。前人的研究也证实,在硅质泥岩、云质泥岩和灰质泥岩中裂缝往往更加发育,相比之下,富含黏土矿物的泥岩裂缝的发育程度普遍较低^[48]。

研究区存在不同走向的断裂系统,尤其是近东西向分布的大型边界断裂,影响了平面上不同井裂缝的发育情况。多口井的裂缝统计结果显示,随着距断层距离的增加,穿层裂缝的密度逐渐减小(图7)。例如,

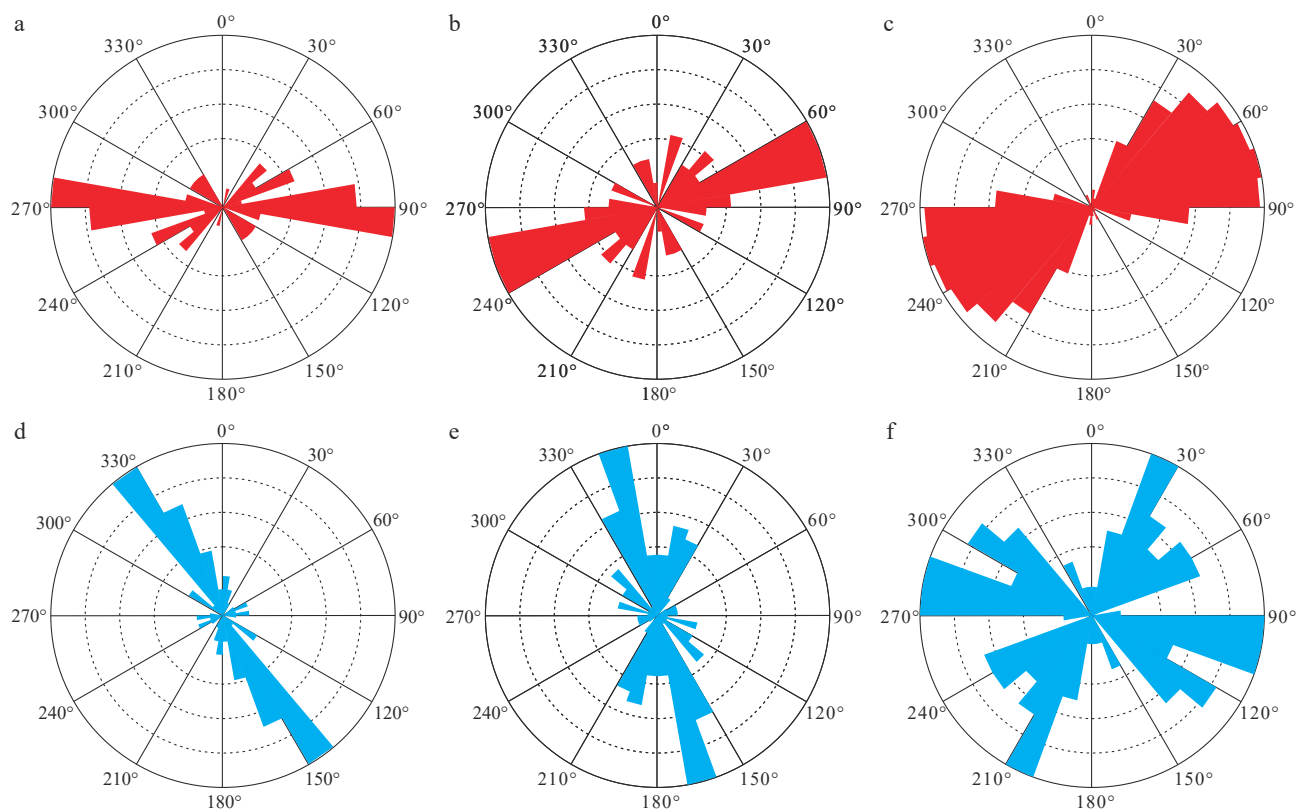


图4 玛湖凹陷不同井穿层裂缝和层内裂缝走向玫瑰花图

Fig. 4 Rose diagrams illustrating the strikes of cross-layer and intralayer fractures in different wells in the Mahu Sag

a. A井穿层裂缝;b. B井穿层裂缝;c. C井穿层裂缝;d. A井层内裂缝;e. B井层内裂缝;f. C井层内裂缝

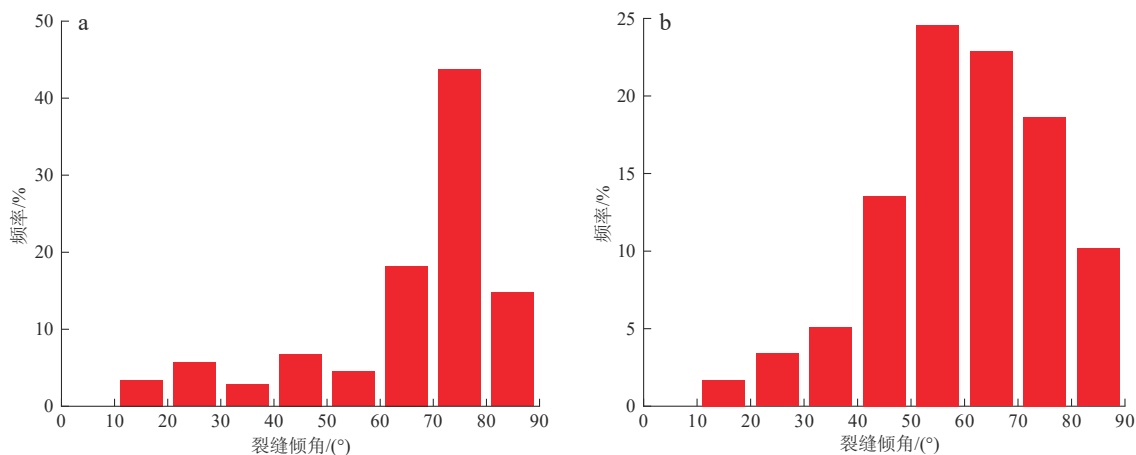


图5 玛湖凹陷不同井裂缝倾角分布频率直方图

Fig. 5 Histograms illustrating the frequency distribution of the dip angles of fractures in different wells in the Mahu Sag

a. A井; b. B井

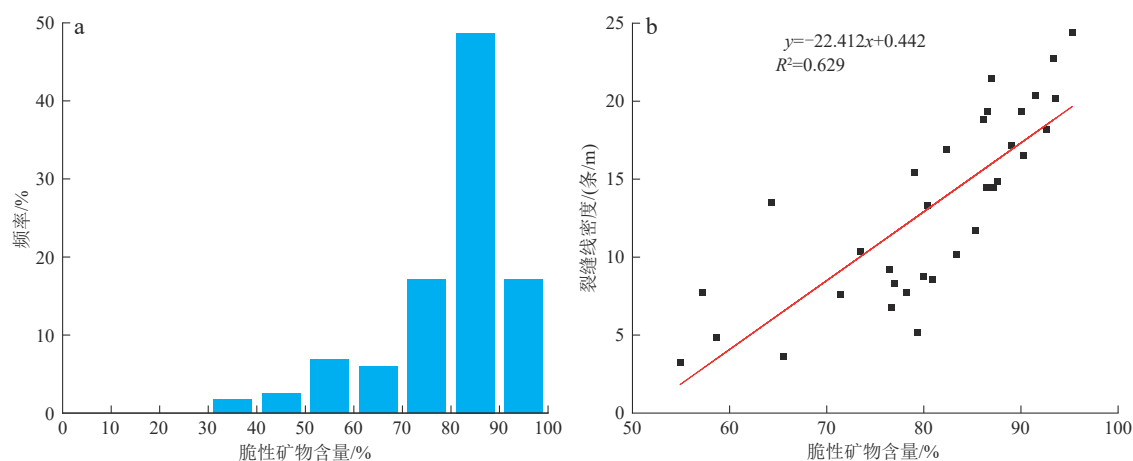


图6 玛湖凹陷A井脆性矿物含量分布频率直方图(a)和脆性矿物含量与裂缝线密度关系(b)

Fig. 6 Histogram illustrating the frequency distribution of the brittle mineral content (a) and the relationship between the brittle mineral content and linear fracture density (b) in well A in the Mahu Sag

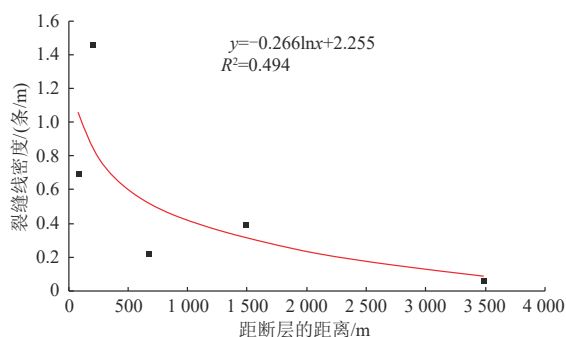


图7 玛湖凹陷不同井裂缝线密度与距断层距离关系

Fig. 7 Relationship between the linear fracture density and the distance from faults in different wells in the Mahu Sag

C井距离断层较近,风城组的穿层裂缝发育程度最高,裂缝线密度为1.46条/m,而A井和B井距离断层较远,穿层裂缝线密度分别为0.39条/m和0.22条/m。

这是因为断层附近存在断裂损伤带,天然裂缝的发育受到断层周围局部应力场的影响^[47, 49],因此,距离断层越近,穿层裂缝发育程度越高。这3口井都发育了近东西走向的穿层裂缝(图4a—c),与区内大型边界断裂的走向一致,表明这些裂缝是受断层附近局部应力场的影响形成。

4 裂缝有效性评价

4.1 裂缝有效性评价方法

天然裂缝在地层条件下处于开启状态或仍保留一定的空间,能够起到流体储集空间和渗流通道作用为有效裂缝,反之则为无效裂缝^[14, 16, 22, 50]。裂缝的充填性和开度是最体现裂缝有效性最直观的2个参数^[27],

借助斯伦贝谢公司的 Techlog 软件,可以识别裂缝的充填程度并计算裂缝开度。当裂缝被高阻性矿物(方解石、石英和硬石膏等)充填时,成像测井图像上会表现为明亮曲线。反之,张开裂缝则会被钻井泥浆滤液渗入,当钻井采用导电泥浆时,在成像测井图像上会显示为暗色曲线。根据 Luthi 和 Souhaité^[51]在 1990 年提出的公式(1),裂缝开度 $W(\text{mm})$ 和通过裂缝的导电介质流入基质的过量电流 $A(\mu\text{A}\cdot\text{mm}/\text{V})$ 存在以下关系:

$$W = cR_m^b R_{xo}^{1-b} \quad (1)$$

式中: R_m 是泥浆电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$; R_{xo} 是冲洗带电阻率, $\Omega\cdot\text{m}$; 系数 c 和指数 b 为常数,与采集工具和环境有关,无量纲。

计算的裂缝开度虽然可能无法直接与岩心测量开度进行比较^[52],但它们提供了内部一致的相对数据集,可以作为评价裂缝有效性的参数。本次研究利用成像测井资料获取了风城组页岩油储层裂缝的充填性和开度,在此基础上,讨论了现今地应力和埋深对裂缝有效性的影响,系统地评价了天然裂缝的有效性。

4.2 裂缝充填性和开度

根据裂缝中胶结矿物的充填情况,天然裂缝可分为未充填裂缝(张开裂缝)、局部充填裂缝和完全充填裂缝(图 8)。未充填裂缝在地下是完全张开的,局部充填裂缝也保持了一定的开度,这两类裂缝属于有效裂缝;而被矿物完全充填的裂缝为无效裂缝,会起到渗

流屏障的作用。随着充填程度的增加,裂缝的有效性依次降低^[53]。图 8a 中可见 3 条裂缝,顶部裂缝虽然未被矿物充填,但较窄的暗色条带反映出其开度较小,中间和底部位置的裂缝开度较大,但底部裂缝局部显示为亮色条带反映其被矿物部分充填。因此,这 3 条裂缝的有效性不同,没有被完全充填的裂缝可以充当流体的运输通道和储存空间,对于页岩油的富集意义重大。

裂缝的方位不同,其充填情况和有效性通常也会明显不同。图 8b 中也发育两条不同充填情况的裂缝,上部为暗色曲线的裂缝则是完全张开的,下部裂缝显示为被充填的亮色正弦曲线。统计结果显示,研究区内北西-南东向裂缝多数没有被充填,其有效性最高;北北西-南南东向和北北东-南南西向裂缝中有一部分数量裂缝被充填,有效性次之;而近东西向裂缝绝大多数被矿物充填,有效性最低(图 9)。这是因为近东西走向的裂缝主要是穿层裂缝,其形成主要受控于区内大型断裂的活动,二者的形成时间接近。前人研究表明,玛湖凹陷大型断裂的形成与海西期强烈挤压应力作用有关^[34]。因此,近东西向裂缝的形成时间也比较早,早期形成的裂缝在长时间的地质历史过程中会经历复杂的流体化学过程,因此更容易被矿物胶结导致失效。

A 井的裂缝开度分布范围较小,集中分布在 $100\ \mu\text{m}$ 以下,平均为 $32\ \mu\text{m}$,开度小于 $60\ \mu\text{m}$ 的裂缝占比 86 %

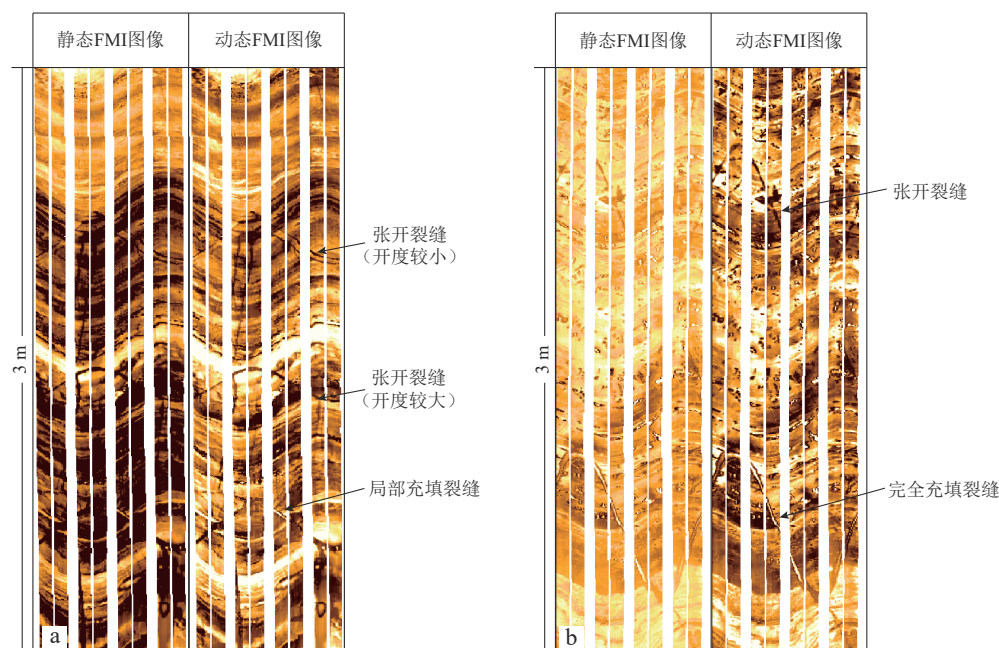


图 8 玛湖凹陷 C 井不同类型裂缝成像测井图像

Fig. 8 FMI images of various types of fractures in well C in the Mahu Sag

a. 同一方位裂缝的充填程度和开度均不相同;b. 不同方位裂缝的充填性不同

(图10a)。相比之下,B井的裂缝开度较大,分布在0~240 μm ,平均为89 μm ,其中开度在0~150 μm 的裂缝

占比85%(图10b)。此外,A井的裂缝开度服从幂律分布的特点,也就是说,天然裂缝的规模越小,其数量

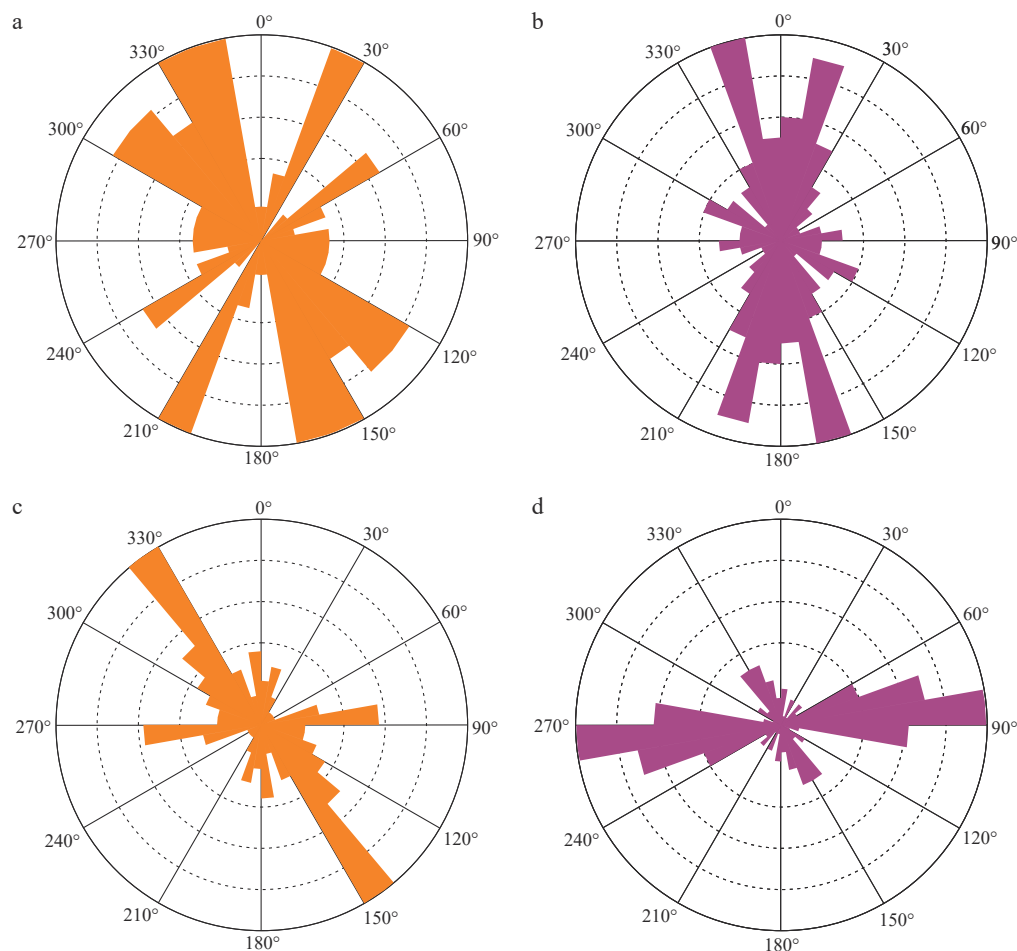


图9 玛湖凹陷不同井张开裂缝和充填裂缝走向玫瑰花图

Fig. 9 Rose diagrams illustrating the strikes of open and filled fractures in different wells in the Mahu Sag

a. A井张开裂缝;b. A井充填裂缝;c. B井张开裂缝;d. B井充填裂缝

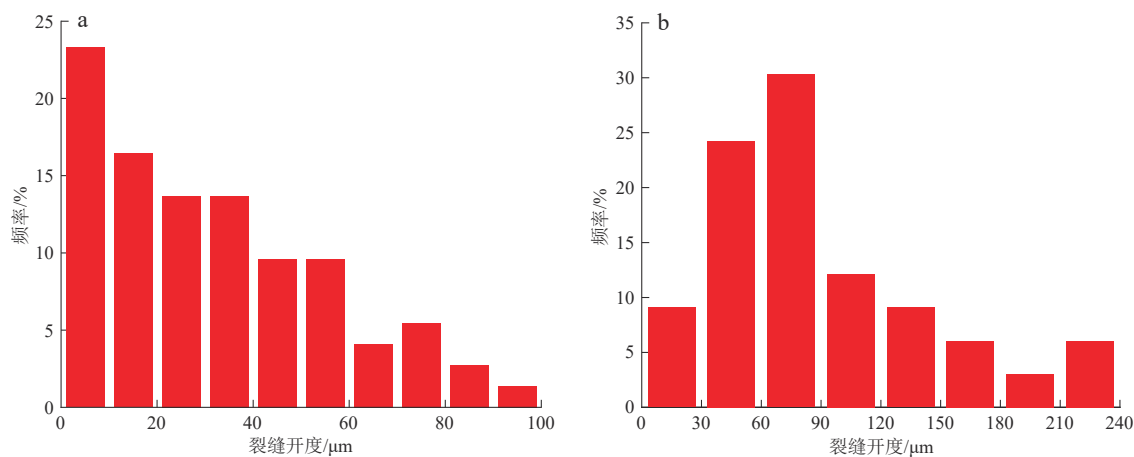


图10 玛湖凹陷不同井裂缝开度分布频率直方图

Fig. 10 Histograms illustrating the distribution of fracture apertures in different wells in the Mahu Sag

a. A井,引自文献[46];b. B井,引自文献[56]

越多,反之,则数量越少,这一现象与前人的研究成果相吻合^[54-55]。而B井的裂缝开度不服从幂律分布规律,可能是由于数据点较少导致的。

4.3 裂缝有效性控制因素

4.3.1 现今地应力

现今地应力是影响裂缝有效性的关键因素,张开裂缝方位与现今最大水平主应力方向之间的夹角决定了裂缝的开度^[18, 22, 27-28, 57]。当裂缝走向与现今最大水平主应力方向平行或小角度相交时,裂缝面会受到相对拉张作用,有利于裂缝开度的保持,有效性好。而当裂缝走向与现今主应力方向垂直时,就会受到垂直于裂缝面挤压应力的影响,从而导致裂缝开度减小,有效性降低^[50, 58]。

在实际的钻井过程中,由于施工过程中井筒原位地应力的作用,会在局部形成一些诱导裂缝。根据诱导裂缝的走向,可以确定该点的现今最大水平主应力方

向^[49, 59]。成像解释结果显示,A井4 876.5~4 879.5 m深度段存在诱导裂缝,倾向主要集中在北北西向($330^{\circ} \sim 340^{\circ}$)和南南东向($140^{\circ} \sim 160^{\circ}$),反映A井的现今最大水平主应力方向为北东东-南西西向($50^{\circ} \sim 70^{\circ}$)(图11a,c)。B井4 046~4 049 m深度段发育典型的羽状诱导裂缝,其倾向集中在正南方向($160^{\circ} \sim 190^{\circ}$),反映B井的现今最大水平主应力方向为近东西向($60^{\circ} \sim 100^{\circ}$)(图11b,d)。正是因为两口井在平面上相距一定距离,它们的现今最大水平主应力方向才会存在轻微差异。

地应力分布的不同,导致不同部位有效裂缝分布存在明显的差异。例如,A井不同方位张开裂缝开度的统计结果显示,北东东-南西西向的裂缝开度最大,有效性最好,平均开度为 $55 \mu\text{m}$;其次是北北东-南南南向和北西西-南东东向的裂缝,平均开度分别为 $50 \mu\text{m}$ 和 $38 \mu\text{m}$;而北北西-南南东向的裂缝平均开度最小,有效性最差(图12a)。统计结果表明,随着裂缝走向与现今最大水平主应力方向之间夹角增加,平均

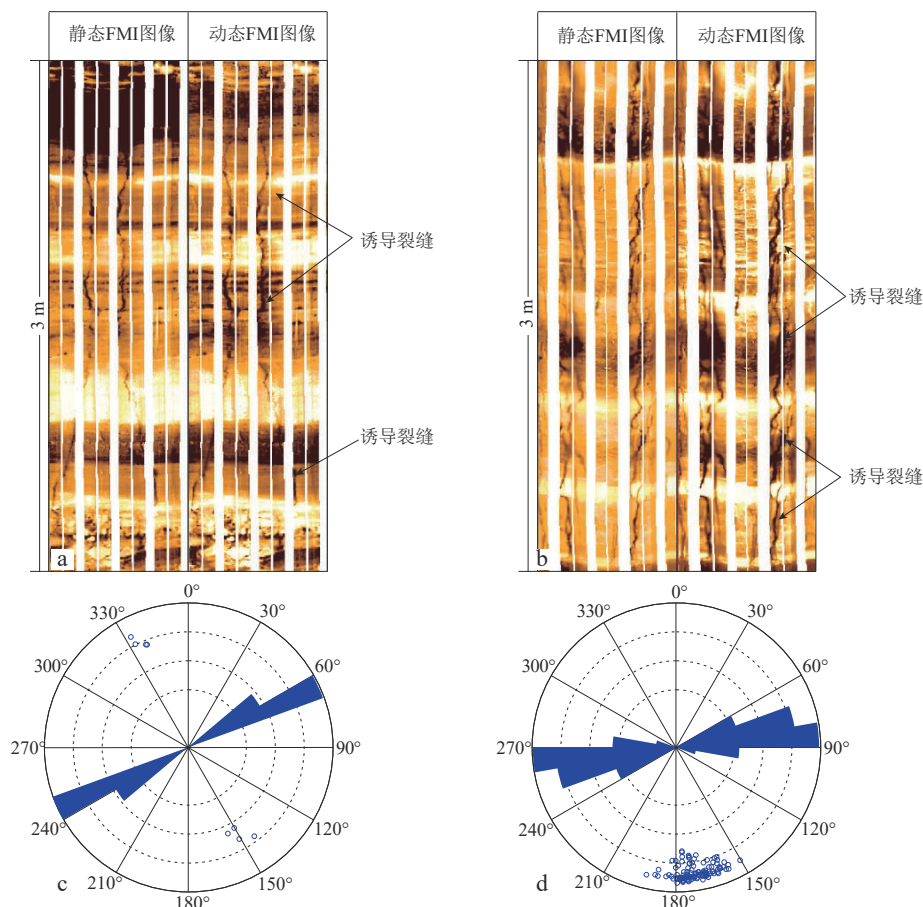


图11 玛湖凹陷不同井诱导裂缝成像测井图像和走向玫瑰花图

Fig. 11 FMI images showing induced fractures in different wells in the Mahu Sag and rose diagrams illustrating their strikes

a. A井诱导裂缝成像测井图像;b. B井诱导裂缝成像测井图像;c. A井诱导裂缝走向玫瑰花图;d. B井诱导裂缝走向玫瑰花图

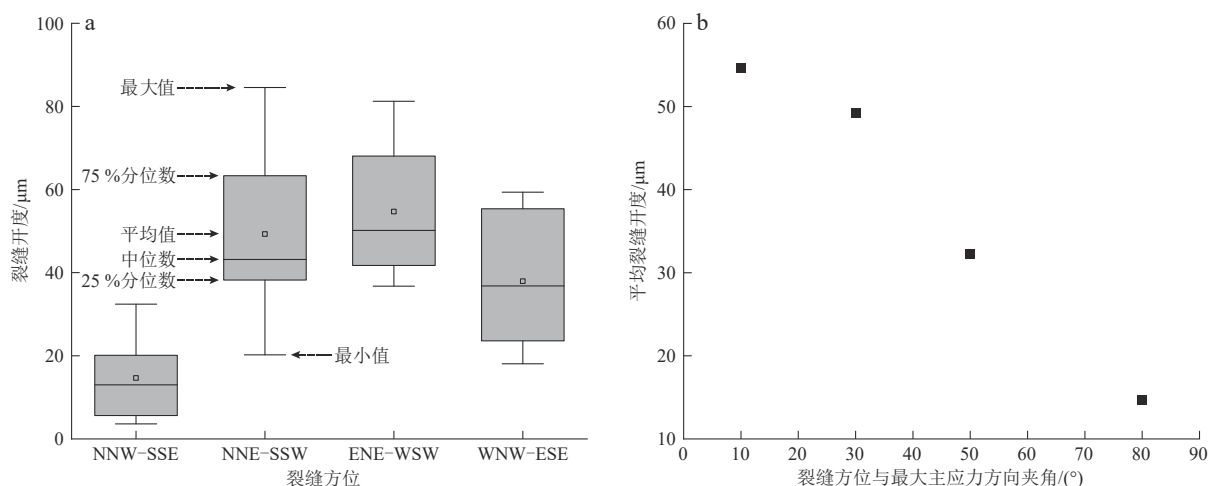


图12 玛湖凹陷A井不同方位的张开裂缝开度分布箱形图(a)及裂缝方位与最大水平主应力方向间夹角和平均裂缝开度关系(b)

Fig. 12 Box plot illustrating the aperture distribution of open fractures with different orientations (a) and the relationship of the average fracture aperture with the included angle between the fracture orientations and the direction of the maximum horizontal principal stress (b) in well A in the Mahu Sag

裂缝开度逐渐减小,有效性逐渐降低(图12b)。综合考虑认为在现今应力场机制下,与现今应力场最大主应力方向近平行的北东东-南西西向裂缝的有效性最好。

4.3.2 埋藏深度

埋藏深度也影响裂缝的有效性。从裂缝开度与埋深关系图可以看出,风二段和风三段张开裂缝的开度随着埋深的增加整体呈现减小的趋势(图13a)。这是

因为随着地层埋深的增加,上覆地层的压力逐渐增大,从而导致作用在裂缝面上的正应力增加,进而使裂缝的开度降低,有效性下降。值得注意的是,与风二段和风三段相比,风一段的裂缝开度反而增加,但在该段内随着埋深的增加,开度也有下降的趋势。这可能是由于风一段与上部地层的岩性差异导致。风二段和风三段的岩性主要包括云质泥岩和云质粉砂岩,而风一段主要发育凝灰质岩等火山岩类。前人研究表明,与云质岩类相比,凝灰质岩类具有更高的单轴抗压强度和

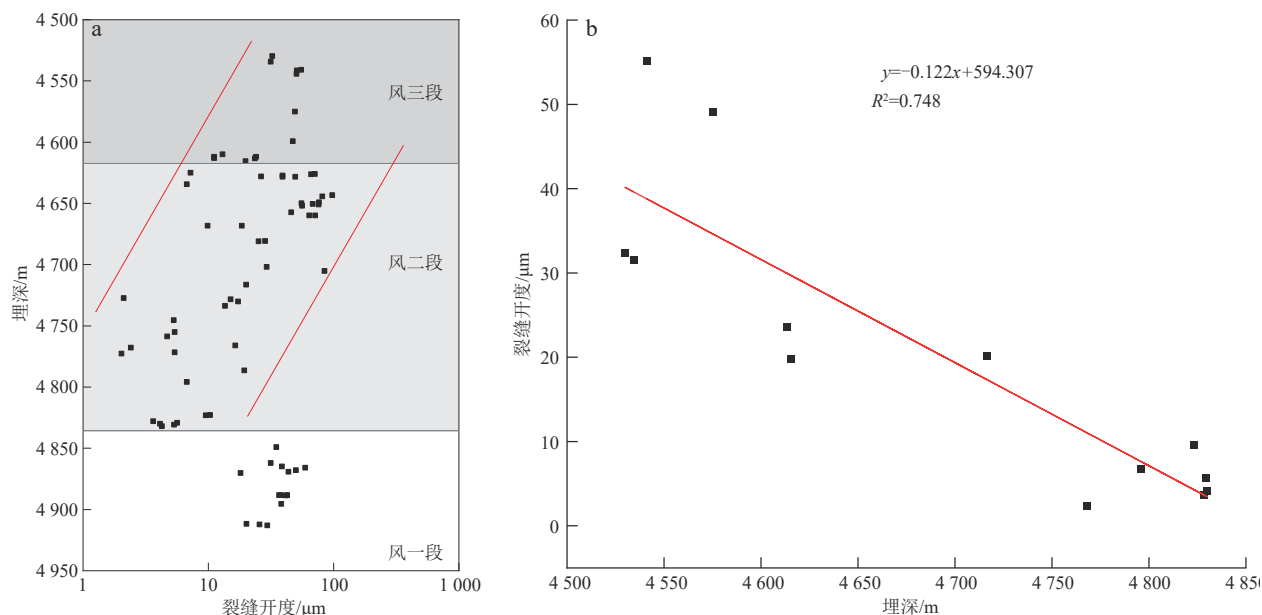


图13 玛湖凹陷A井裂缝开度与埋深关系

Fig. 13 Relationships between the fracture aperture and burial depth in well A in the Mahu Sag

a. 风城组,据文献[46]修改;b. 风二段和风三段(只考虑倾角 $<60^\circ$ 的裂缝)

更低的弹性模量^[60]。因此风三段更能够抵抗上覆地层压力,裂缝开度降低程度较小。当仅考虑风二段和风三段中倾角小于 60° 的裂缝时,裂缝的开度与埋深之间存在良好的线性降低关系(图13b)。这是因为低倾角裂缝在上覆地层的压力作用下,作用于裂缝面上的正应力更大,导致裂缝开度降低的趋势更加明显。对比A井和B井的裂缝开度也可以发现,A井风城组埋藏较深,开度较小,平均为 $32\text{ }\mu\text{m}$;而B井埋藏较浅,裂缝开度相对较大,平均为 $89\text{ }\mu\text{m}$ 。

5 结论

1) 基于成像测井资料在风城组识别出穿层裂缝和层内裂缝2类构造裂缝。穿层裂缝的规模较大,其裂缝高度达到米级;层内裂缝受层厚限制,裂缝高度通常小于 50 cm 。区内主要发育北西-南东向、北北西-南南东向、北北东-南南西向以及近东西向4个走向裂缝,裂缝以中、高角度($40^\circ\sim 90^\circ$)为主,裂缝开度集中分布在 $0\sim 120\text{ }\mu\text{m}$ 范围内。

2) 研究区天然裂缝的发育主要受脆性矿物和断层2个因素控制。一方面,风城组页岩脆性矿物含量较高,平均可达 80% ,单井上裂缝发育程度与脆性矿物含量之间存在明显的正相关关系。另一方面,区内发育的大型边界断裂影响了裂缝的平面发育,距离断层越近,裂缝发育程度越高。

3) 不同方位裂缝的有效性存在差异。北西-南东向的裂缝大多数未被充填,有效性好;在考虑现今应力场时,与现今最大水平主应力方向平行的北东东-南西西向裂缝开度最大,随着二者之间夹角增加,裂缝开度逐渐减小,有效性降低;裂缝开度随埋深增加整体呈现下降趋势,倾角小于 60° 裂缝的开度与埋深存在良好的线性关系。

致谢:感谢中国石油新疆油田公司提供成像测井资料等数据;感谢张亚雄副主编在投稿过程中提供的帮助;感谢3位匿名审稿专家对文章提出的建设性意见。

参 考 文 献

- [1] CURTIS J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] GHOSH S, GALVIS-PORTILLA H A, KLOCKOW C M, et al. An application of outcrop analogues to understanding the origin and abundance of natural fractures in the Woodford Shale [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 164: 623-639.
- [3] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [4] 金之钧, 张谦, 朱如凯, 等. 中国陆相页岩油分类及其意义 [J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 801-819.
JIN Zhijun, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Classification of lacustrine shale oil reservoirs in China and its significance [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 801-819.
- [5] 杜晓宇, 金之钧, 曾联波, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7页岩油储层天然裂缝发育特征与控制因素 [J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2589-2600.
DU Xiaoyu, JIN Zhijun, ZENG Lianbo, et al. Development characteristics and controlling factors of natural fractures in Chang 7 shale oil reservoir, Longdong area, Ordos Basin [J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2589-2600.
- [6] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
ZOU Caineng, YANG Zhi, CUI Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [7] 金之钧, 朱如凯, 梁新平, 等. 当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题 [J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1276-1287.
JIN Zhijun, ZHU Rukai, LIANG Xinping, et al. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1276-1287.
- [8] 支东明, 唐勇, 郑孟林, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油藏地质特征与成藏控制因素 [J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 615-623.
ZHI Dongming, TANG Yong, ZHENG Menglin, et al. Geological characteristics and accumulation controlling factors of shale reservoirs in Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 615-623.
- [9] 许琳, 常秋生, 冯玲丽, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩油储层特征及控制因素 [J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 649-660.
XU Lin, CHANG Qiusheng, FENG Lingli, et al. The reservoir characteristics and control factors of shale oil in Permian Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 649-660.
- [10] 郑孟林, 樊向东, 何文军, 等. 准噶尔盆地深层地质结构叠加演变与油气赋存 [J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 22-32.
ZHENG Menglin, FAN Xiangdong, HE Wenjun, et al. Superposition of deep geological structural evolution and hydrocarbon accumulation in the Junggar Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 22-32.
- [11] 支东明, 唐勇, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组常规-非常规油气有序共生与全油气系统集成藏模式 [J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 38-51.

- ZHI Dongming, TANG Yong, HE Wenjun, et al. Orderly coexistence and accumulation models of conventional and unconventional hydrocarbons in Lower Permian Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 38-51.
- [12] 唐勇, 何文军, 姜懿洋, 等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相页岩油气富集条件与勘探方向[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 125-143.
- TANG Yong, HE Wenjun, JIANG Yiyang, et al. Enrichment conditions and exploration direction of Permian saline lacustrine shale oil and gas in Junggar Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 125-143.
- [13] 唐勇, 曹剑, 何文军, 等. 从玛湖大油区发现看全油气系统地质理论发展趋势[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(1): 1-9.
- TANG Yong, CAO Jian, HE Wenjun, et al. Development tendency of geological theory of total petroleum system: Insights from the discovery of Mahu large oil province [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(1): 1-9.
- [14] 曾联波, 巩磊, 祖克威, 等. 柴达木盆地西部古近系储层裂缝有效性的影响因素[J]. *地质学报*, 2012, 86(11): 1809-1814.
- ZENG Lianbo, GONG Lei, ZU Kewei, et al. Influence factors on fracture validity of the Paleogene reservoir, western Qaidam Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(11): 1809-1814.
- [15] 曾维特, 丁文龙, 张金川, 等. 渝东南-黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝有效性研究[J]. *地学前缘*, 2016, 23(1): 96-106.
- ZENG Weite, DING Wenlong, ZHANG Jinchuan, et al. Research on the fracture effectiveness of the Lower Cambrian Niutitang shale in the southeastern Chongqing and northern Guizhou areas [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 96-106.
- [16] 邓虎成, 周文, 周秋媚, 等. 新场气田须二气藏天然裂缝有效性定量表征方法及应用[J]. *岩石学报*, 2013, 29(3): 1087-1097.
- DENG Hucheng, ZHOU Wen, ZHOU Qiumei, et al. Quantification characterization of the valid natural fractures in the 2nd Xu Member, Xinchang gas field [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(3): 1087-1097.
- [17] 巩磊, 曾联波, 杜宜静, 等. 构造成岩作用对裂缝有效性的影响——以库车前陆盆地白垩系致密砂岩储层为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(3): 514-519.
- GONG Lei, ZENG Lianbo, DU Yijing, et al. Influences of structural diagenesis on fracture effectiveness: A case study of the Cretaceous tight sandstone reservoirs of Kuqa foreland basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(3): 514-519.
- [18] 王珂, 杨海军, 张惠良, 等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝特征与有效性——以塔里木盆地库车坳陷克深8气藏为例[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 719-729.
- WANG Ke, YANG Haijun, ZHANG Huiliang, et al. Characteristics and effectiveness of structural fractures in ultra-deep tight sandstone reservoir: A case study of Keshen-8 gas pool in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(4): 719-729.
- [19] 毛哲, 曾联波, 刘国平, 等. 准噶尔盆地南缘侏罗系深层致密砂岩储层裂缝及其有效性[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(6): 1212-1221.
- MAO Zhe, ZENG Lianbo, LIU Guoping, et al. Characterization and effectiveness of natural fractures in deep tight sandstones at the South margin of the Junggar Basin, northwestern China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(6): 1212-1221.
- [20] LIU Guoping, ZENG Lianbo, ZHU Rukai, et al. Effective fractures and their contribution to the reservoirs in deep tight sandstones in the Kuqa Depression, Tarim Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 124: 104824.
- [21] 张鹏, 侯贵廷, 潘文庆, 等. 塔里木盆地震旦寒武系白云岩储层构造裂缝有效性研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(6): 993-1001.
- ZHANG Peng, HOU Guiting, PAN Wenqing, et al. Research on the effectiveness of fractures in Sinian-Cambrian dolomite reservoir in Tarim Basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(6): 993-1001.
- [22] 赵向原, 胡向阳, 曾联波, 等. 四川盆地元坝地区长兴组礁滩相储层天然裂缝有效性评价[J]. *天然气工业*, 2017, 37(2): 52-61.
- ZHAO Xiangyuan, HU Xiangyang, ZENG Lianbo, et al. Evaluation on the effectiveness of natural fractures in reef-flat facies reservoirs of Changxing Fm in Yuanba area, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(2): 52-61.
- [23] 巩磊, 程宇琪, 高帅, 等. 库车前陆盆地东部下侏罗统致密砂岩储层裂缝连通性表征及其主控因素[J]. *地球科学*, 2023, 48(7): 2475-2488.
- GONG Lei, CHENG Yuqi, GAO Shuai, et al. Fracture connectivity characterization and its controlling factors in Lower Jurassic tight sandstone reservoirs of eastern Kuqa foreland basin [J]. *Earth Science*, 2023, 48(7): 2475-2488.
- [24] 黄玉越, 王贵文, 宋连腾, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩储集层裂缝测井识别与有效性分析[J]. *古地理学报*, 2022, 24(3): 540-555.
- HUANG Yuyue, WANG Guiwen, SONG Lianteng, et al. Fracture logging identification and effectiveness analysis of shale reservoir of the Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(3): 540-555.
- [25] 王濡岳, 丁文龙, 龚大建, 等. 渝东南-黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝发育特征与主控因素[J]. *石油学报*, 2016, 37(7): 832-845, 877.
- WANG Ruyue, DING Wenlong, GONG Dajian, et al. Development characteristics and major controlling factors of shale fractures in the Lower Cambrian Niutitang Formation, southeastern Chongqing-northern Guizhou area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(7): 832-845, 877.
- [26] 刘国平, 金之钧, 曾联波, 等. 玛湖凹陷二叠系风城组深层陆相页岩储层天然裂缝及其有效性[J/OL]. *地球科学*: 1-20. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20240123.1756.005.html>.

- LIU Guoping, JIN Zhijun, ZENG Lianbo, et al. Natural fractures and their effectiveness in deep continental shale reservoirs of the Permian Fengcheng Formation in the Mahu Sag [J/OL]. *Earth Science*: 1–20. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20240123.1756.005.html>.
- [27] 史今雄, 曾联波, 谭青松, 等. 沁水盆地南部煤岩储层天然裂缝有效性及对煤层气开发的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 617–626.
- SHI Jinxiong, ZENG Lianbo, TAN Qingsong, et al. Effectiveness of natural fractures in CBM reservoirs and its influence on CBM development in the southern Qinshui Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 617–626.
- [28] 鞠玮, 牛小兵, 冯胜斌, 等. 页岩油储层现今地应力场与裂缝有效性评价——以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(5): 931–940.
- JU Wei, NIU Xiaobing, FENG Shengbin, et al. The present-day in-situ stress state and fracture effectiveness evaluation in shale oil reservoir: A case study of the Yanchang Formation Chang 7 oil-bearing layer in the Ordos Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(5): 931–940.
- [29] GONG Lei, WANG Jie, GAO Shuai, et al. Characterization, controlling factors and evolution of fracture effectiveness in shale oil reservoirs [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 203: 108655.
- [30] CAO Jian, XIA Liuwen, WANG Tingting, et al. An alkaline lake in the Late Paleozoic Ice Age (LPIA): A review and new insights into paleoenvironment and petroleum geology [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 202: 103091.
- [31] XIAO Wenjiao, HAN Chunming, YUAN Chao, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(2/4): 102–117.
- [32] TAO Keyu, CAO Jian, HU Wenxuan, et al. Petroleum system for the continuous oil play in the lacustrine Lower Triassic, Junggar Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2021, 105(12): 2349–2380.
- [33] 陈永波, 程晓敢, 张寒, 等. 玛湖凹陷斜坡区中浅层断裂特征及其控藏作用[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 985–994.
- CHEN Yongbo, CHENG Xiaogan, ZHANG Han, et al. Fault characteristics and control on hydrocarbon accumulation of middle-shallow layers in the slope zone of Mahu Sag, Junggar Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 985–994.
- [34] 周路, 朱江坤, 宋永, 等. 玛湖凹陷玛中—玛东地区三叠系百口泉组断裂特征及控藏作用分析[J]. *地质前缘*, 2019, 26(1): 248–261.
- ZHOU Lu, ZHU Jiangkun, SONG Yong, et al. Analysis of fault characteristics and reservoir control in Triassic Baikouquan Formation in central and eastern Mahu Depression [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 248–261.
- [35] 夏刘文, 曹剑, 边立曾, 等. 准噶尔盆地玛湖大油区二叠纪碱湖生物—环境协同演化及油源差异性[J]. *中国科学(地球科学)*, 2022, 52(4): 732–746.
- XIA Liuwen, CAO Jian, BIAN Lizeng, et al. Co-evolution of paleo-environment and bio-precursors in a Permian alkaline lake, Mahu mega-oil province, Junggar Basin: Implications for oil sources [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 52(4): 732–746.
- [36] 宋永, 杨智峰, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组碱湖型页岩油勘探进展[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(1): 60–72.
- SONG Yong, YANG Zhifeng, HE Wenjun, et al. Exploration progress of alkaline lake type shale oil of the Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(1): 60–72.
- [37] 曹剑, 雷德文, 李玉文, 等. 古老碱湖优质烃源岩: 准噶尔盆地二叠统风城组[J]. *石油学报*, 2015, 36(7): 781–790.
- CAO Jian, LEI Dewen, LI Yuwen, et al. Ancient high-quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(7): 781–790.
- [38] XIA Liuwen, CAO Jian, STÜEKEN E E, et al. Unsynchronized evolution of salinity and pH of a Permian alkaline lake influenced by hydrothermal fluids: A multi-proxy geochemical study [J]. *Chemical Geology*, 2020, 541: 119581.
- [39] 苟启洋, 徐尚, 郝芳, 等. 基于成像测井的泥页岩裂缝研究: 以焦石坝区块为例[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(6): 193–200.
- GOU Qiyang, XU Shang, HAO Fang, et al. Research on mud shale fractures based on image logging: A case study of Jiaoshiba area [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(6): 193–200.
- [40] YUAN Rui, HAN Denglin, TANG Yangang, et al. Fracture characterization in oil-based mud boreholes using image logs: Example from tight sandstones of Lower Cretaceous Bashijiqike Formation of KS5 Well area, Kuqa Depression, Tarim Basin, China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(6): 435.
- [41] ORTEGA O J, MARRETT R A, LAUBACH S E. A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(2): 193–208.
- [42] TERZAGHI R D. Sources of error in joint surveys [J]. *Géotechnique*, 1965, 15(3): 287–304.
- [43] HOOKER J N, LAUBACH S E, MARRETT R. Fracture-aperture size—frequency, spatial distribution, and growth processes in strata-bounded and non-strata-bounded fractures, Cambrian Mesón Group, NW Argentina [J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 54: 54–71.
- [44] LAUBACH S E, OLSON J E, GROSS M R. Mechanical and fracture stratigraphy [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(11): 1413–1426.
- [45] 马诗杰, 曾联波, 石学文, 等. 四川盆地泸州地区海相页岩天然裂缝特征及主控因素[J]. *地球科学*, 2023, 48(7): 2630–2642.
- MA Shijie, ZENG Lianbo, SHI Xuwen, et al. Characteristics and main controlling factors of natural fractures in marine shale in

- Luzhou area, Sichuan Basin[J]. *Earth Science*, 2023, 48(7): 2630–2642.
- [46] DU Xiaoyu, JIN Zhijun, ZENG Lianbo, et al. Characteristics and controlling factors of natural fractures in deep lacustrine shale oil reservoirs of the Permian Fengcheng Formation in the Mahu Sag, Junggar Basin, China[J]. *Journal of Structural Geology*, 2023, 175: 104923.
- [47] 曾联波, 马诗杰, 田鹤, 等. 富有机质页岩天然裂缝研究进展[J]. *地球科学*, 2023, 48(7): 2427–2442.
- ZENG Lianbo, MA Shijie, TIAN He, et al. Research progress of natural fractures in organic rich shale[J]. *Earth Science*, 2023, 48(7): 2427–2442.
- [48] GALE J F W, LAUBACH S E, OLSON J E, et al. Natural fractures in shale: A review and new observations[J]. *AAPG Bulletin*, 2014, 98(11): 2165–2216.
- [49] LYU Wenya, ZENG Lianbo, ZHOU Sibin, et al. Natural fractures in tight-oil sandstones: A case study of the Upper Triassic Yanchang Formation in the southwestern Ordos Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(10): 2343–2367.
- [50] 曾联波, 巩磊, 宿晓岑, 等. 深层-超深层致密储层天然裂缝分布特征及发育规律[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(1): 1–14.
- ZENG Lianbo, GONG Lei, SU Xiaocen, et al. Natural fractures in deep to ultra-deep tight reservoirs: Distribution and development[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 1–14.
- [51] LUTHI S M, SOUHAITE P. Fracture apertures from electrical borehole scans[J]. *Geophysics*, 1990, 55(7): 821–833.
- [52] KHOSHBAKHT F, AZIZADEH M, MEMARIAN H, et al. Comparison of electrical image log with core in a fractured carbonate reservoir[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, 86/87: 289–296.
- [53] ZENG Lianbo, TANG Xiaomei, WANG Tiecheng, et al. The influence of fracture cements in tight Paleogene saline lacustrine carbonate reservoirs, western Qaidam Basin, northwest China[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(11): 2003–2017.
- [54] BERTRAND L, GÉRAUD Y, LE GARZIC E, et al. A multiscale analysis of a fracture pattern in granite: A case study of the Tamariu granite, Catalunya, Spain[J]. *Journal of Structural Geology*, 2015, 78: 52–66.
- [55] 曾联波, 吕鹏, 屈雪峰, 等. 致密低渗透储层多尺度裂缝及其形成地质条件[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 449–454.
- ZENG Lianbo, LYU Peng, QU Xuefeng, et al. Multi-scale fractures in tight sandstone reservoirs with low permeability and geological conditions of their development[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 449–454.
- [56] DU Xiaoyu, JIN Zhijun, ZENG Lianbo, et al. Formation of natural fractures and their impact on shale oil accumulation in the Mahu Sag, Junggar Basin, NW China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2023, 279: 104385.
- [57] 史今雄, 赵向原, 潘仁芳, 等. 川中地区震旦系灯影组碳酸盐岩天然裂缝特征及其对气井产能影响[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 393–405.
- SHI Jinxiong, ZHAO Xiangyuan, PAN Renfang, et al. Characteristics of natural fractures in carbonate reservoirs and their impacts on well productivity in the Sinian Dengying Formation, central Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 393–405.
- [58] 王俊鹏, 曾联波, 周露, 等. 塔里木盆地克拉苏构造带超深层储层裂缝发育模式及开发意义[J]. *地球科学*, 2023, 48(7): 2520–2534.
- WANG Junpeng, ZENG Lianbo, ZHOU Lu, et al. Development model of natural fractures in ultra-deep sandstone reservoirs with low porosity in Kelasu tectonic belt, Tarim Basin[J]. *Earth Science*, 2023, 48(7): 2520–2534.
- [59] 赖锦, 白天宇, 肖露, 等. 地应力测井评价方法及其地质与工程意义[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(4): 1033–1043.
- LAI Jin, BAI Tianyu, XIAO Lu, et al. Well-logging evaluation of in-situ stress fields and its geological and engineering significances[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(4): 1033–1043.
- [60] 李鹏, 熊健, 晏奇, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组岩性对岩石力学特性的影响[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(4): 569–578.
- LI Peng, XIONG Jian, YAN Qi, et al. Lithological influences to rock mechanical properties of Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2022, 44(4): 569–578.

(编辑 董奕含)