

鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区三叠系 延长组长 7—长 9 段裂缝特征及油气意义

郭惠^{1,2}, 赵红格^{1,2}, 李莹³, 雷琳琳⁴, 汪建^{1,2}, 李俊^{1,2}, 邵晓州³

1. 西北大学地质学系, 西安 710069;

2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;

3. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 西安 710021;

4. 中国石油集团测井有限公司测井地质研究院, 西安 710077

摘要:天然裂缝对鄂尔多斯盆地三叠系延长组低渗透油藏的勘探开发具有重要的作用。盆地古峰庄地区延长组油气资源丰富, 具有良好的勘探前景, 但有关裂缝研究成果较少, 对其分布规律和活动时期认识不清。通过古峰庄地区延长组长 7—长 9 段岩心、成像测井、碳—氧同位素、流体包裹体、岩石声发射及构造应力和断裂活动分析, 对其天然裂缝的特征、形成期次及成因进行研究, 并探讨了裂缝对油气成藏的作用。古峰庄地区长 7—长 9 段天然裂缝较发育, 尤以长 7 段最发育; 以高角度和垂直裂缝为主, 走向以 NEE 向为主, NE 向次之, 少量 NW 和 NWW 向; 裂缝以未充填和方解石半充填为主, 有效性较好; 裂缝面较平直, 可见油侵、油迹、油斑等明显的油气运移痕迹。长 7、长 8、长 9 段氧同位素均值分别为 -15.8‰, -17.5‰, -18.7‰, 裂缝的形成深度分别为 1 675、2 338、2 785 m; 由流体包裹体均一温度峰值 90~100 °C, 120~130 °C, 换算得裂缝形成深度范围在 1 750~2 000 m, 2 500~2 750 m。该区长 7—长 9 段裂缝活动具有多期性, 可划分为印支期、燕山期和喜马拉雅期, 燕山期和喜马拉雅期为主要活动时期。不同时期发育的有效性裂缝改善了研究区低渗透储层的物性, 为长 7—长 9 段等多层系—深层系油藏的形成提供了重要运移通道和储集空间, 并影响着油井的产能。

关键词:裂缝特征; 形成期次; 油气意义; 延长组; 古峰庄地区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Fracture characteristics and hydrocarbon significance in the Chang 7 to Chang 9 members of Triassic Yanchang Formation of Gufengzhuang area, western Ordos Basin

GUO Hui^{1,2}, ZHAO Hongge^{1,2}, LI Ying³, LEI Linlin⁴, WANG Jian^{1,2}, LI Jun^{1,2}, SHAO Xiaozhou³

1. Department of Geology, Northwestern University, Xi'an, Shannxi 710069, China;

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwestern University, Xi'an, Shannxi 710069, China;

3. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shannxi 710021, China;

4. Logging and Geology Research Institute, CNPC Logging, Xi'an, Shannxi 710077, China

Abstract: Natural fractures play an important role for the exploration and development of low-permeability reservoirs in the Triassic Yanchang Formation of the Ordos Basin. Abundant hydrocarbon resources have been found in the Yanchang Formation of the Gufengzhuang area, showing good exploration prospects. However, only limited research results on fractures have been obtained, and the distribution law and active period are both unclear. Based on the analyses of core, imaging logging, carbon-oxygen isotope, homogenization temperature of fluid inclusion, acoustic emission, tectonic stress and fracture activity, the characteristics, formation stages and causes of natural fractures in the Chang 7 to Chang 9 members of the Yanchang Formation in the Gufengzhuang area were studied, and corresponding indications for petroleum accumulation were discussed. Natural fractures are well-developed in the Chang 7 to Chang 9 members of the Yanchang Formation, especially in the Chang 7

收稿日期: 2022-03-23; 修订日期: 2022-12-05。

作者简介: 郭惠(1996—), 男, 硕士生, 研究方向为裂缝/断裂特征解释。E-mail: 2831639068@qq.com。

通信作者: 赵红格(1975—), 女, 博士, 教授, 从事沉积盆地分析与油气地质研究。E-mail: zhaohg@nwu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072170), 大陆动力学国家重点实验室团队项目(201210132), 陕西省高校青年创新团队(盆地演化与能源矿产)项目和中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院项目(ZY19-XA412-FW1216)联合资助。

member. High-angle and vertical fractures are ubiquitously developed, mainly of NEE orientation, followed by NE, and finally NW and NWW. The fractures are generally unfilled or semi-filled by calcites, providing effective pathways for hydrocarbon migration. The fracture surface is flat, and obvious traces of oil migration such as oil invasion, oil stain and oil spot can be observed. The average values of oxygen isotopes of the Chang 7 to Chang 9 members are -15.8‰ , -17.5‰ and -18.7‰ , indicating that the fractures were formed at depth of 1 675, 2 338 and 2 785 m. According to the homogenization temperature peaks of fluid inclusions of 90–100 °C and 120–130 °C, the formation depth of fractures is 1 750–2 000 m and 2 500–2 750 m. The fractures in the Chang 7 to Chang 9 members were active during multiple stages, including the Indosinian, Yanshanian and Himalayan stages, with the Yanshanian and Himalayan as the main active stages. Effective fractures developed in multiple stages have improved the physical properties of low-permeability reservoirs in the study area. They provided important migration channels and storage spaces for the formation of multi-layer and deep-layer reservoirs such as Chang 7, Chang 8 and Chang 9, and affected the productivity of oil wells.

Key words: fracture characteristics; formation stages; hydrocarbon significance; Yanchang Formation; Gufeng-zhuang area; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地三叠系延长组作为重要含油层系,以致密性储层为特色,油气勘探素有“磨刀石上找油”之称,天然裂缝的广泛发育对油气成藏意义重大^[1-10]。研究表明,裂缝对前期石油勘探评价和后期注水开发、井网部署以及相关技术政策的制定非常重要,尤其是裂缝的分布规律和活动期次一直是油藏勘探开发关注的重点^[5-16]。目前,国内外油气勘探开发中裂缝的研究方法主要有野外观测、岩心描述、成像测井、古地磁、岩石声发射、裂缝充填物碳—氧同位素、流体包裹体等方法^[12-20]。随着勘探程度的加深,三维地震属性、蚂蚁体分析和构造应力场数值模拟等分析方法得到了广泛运用^[21-25],多种方法的综合运用已成为限定裂缝特征、分布规律、期次和成因研究的发展趋势。我国裂缝性油藏分布非常广泛,裂缝对油藏,尤其是对致密油藏储层性能的改善、油藏开发方案的制定和产量的提高具有重要作用。在鄂尔多斯盆地姬塬、陇东、安塞等地区勘探中取得了非常显著的实际应用效果^[2-5,7-12,23];另外,一些裂缝发育的井会出现初产高一降产快、低产、产水,或在油田注水开发中出现油井暴性水淹、部分注水不见效等不理想的情况^[1,5,7,9,15]。由此可见,天然裂缝特征的研究依然是裂缝性油藏开发的关键,仍需继续深入研究。

目前为止,前人已对鄂尔多斯盆地姬塬、陇东、镇泾以及陕北等地区延长组裂缝发育特征做了大量研究^[1-3,7-8,12-15,24-26],认为延长组主要发育 NEE、NE、NW 和 NWW 向 4 组优势裂缝,裂缝活动时期主要为印支期、燕山期和喜马拉雅期 3 期,并指出裂缝的存在是低渗透、致密储层中油气运移重要渗流通道,对储层的连通性和渗透性至关重要,

其发育特征及分布规律对石油的富集和开发具有重要作用,这些认识为盆地裂缝研究和油气勘探奠定了良好的基础。古峰庄地区是近年来鄂尔多斯盆地西缘增储上产的重要区域,属油气勘探新区(图 1),钻井、测井资料揭示延长组天然裂缝较为发育,而前人对该地区裂缝研究的成果较少,对其不同层段裂缝特征、分布规律和活动时期认识不清,进而制约着该区的油气勘探。随着该区油气勘探层系从延长组浅层向长 7、长 8、长 9 段等深层系转移,F2、Y293、F21、F34 等井取得了显著的勘探成效,长 8、长 9 油层组相继获得 20 t/d 以上的高产工业油流,特别是 F21、F34 井长 9 段获 121.72 t/d、56.27 t/d 高产工业油流,表明该区延长组深层系油气资源丰富,勘探潜力巨大,迫切需要对深层系油藏形成的主控因素展开探讨。

本文通过岩心、成像测井、裂缝充填物碳—氧同位素、流体包裹体和岩石声发射实验,并结合构造应力和断裂活动,对该区长 7—长 9 段储层天然构造裂缝特征、分布规律、形成期次及成因展开研究,探讨裂缝与油藏之间的关系,为研究区延长组深层系油气勘探开发提供参考。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地中生代延长期是盆地富烃凹陷的发育阶段,盆地周围水系发育较多,形成了向盆地中心发育的一系列河湖三角洲相,湖盆中沉积物以湖泊体系为主,自下而上依次为河流中—粗砂岩沉积、河流—三角洲及湖泊为主砂泥互层沉积、河流相砂泥岩沉积^[27]。由于长 9、长 8 段发育于湖盆初扩张期,水体较浅,以三角洲前缘沉积为主。长 9

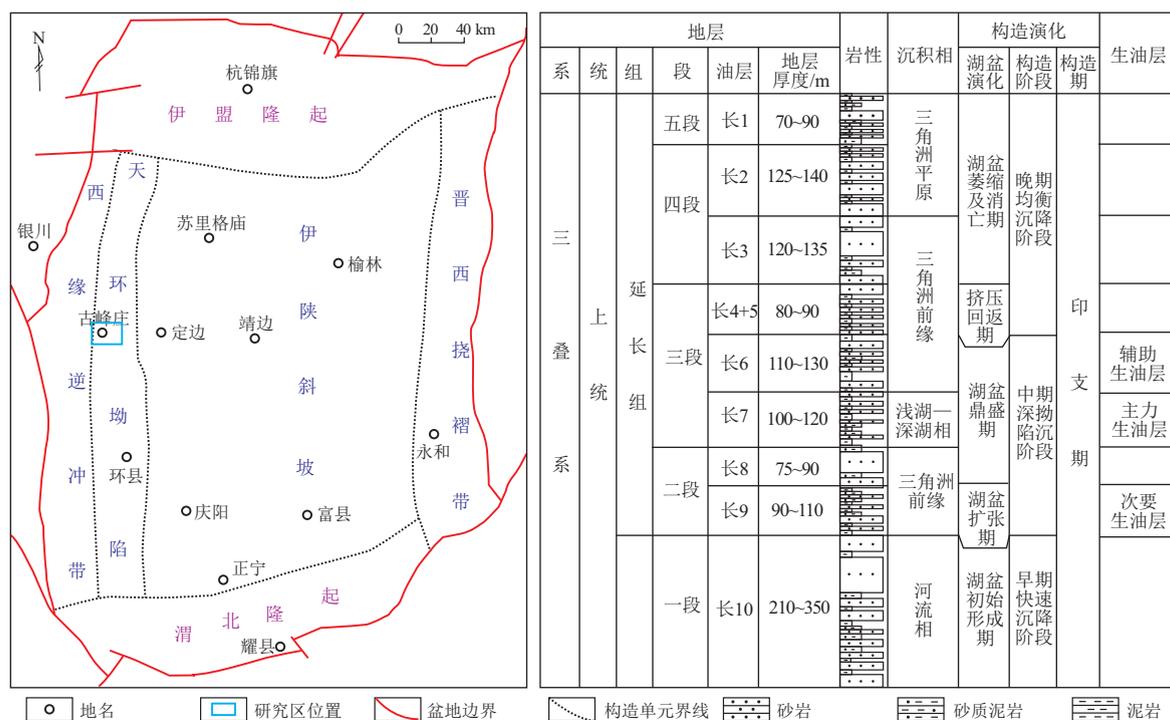


图1 鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区构造位置及其三叠系延长组地层综合柱状图

Fig.1 Structural location of Gufengzhuang area in western Ordos Basin and comprehensive stratigraphic histogram of Triassic Yanchang Formation

段分上下两段,在盆地边缘下段为一套厚层状中细粒长石砂岩夹灰绿色—深灰色泥岩,上段为深灰色泥岩、碳质泥岩夹油页岩夹薄层粉细砂岩。长8段,盆地绝大部分区域由上、下两套巨厚层河流相和三角洲平原亚相浅灰色灰质中砂岩—细砂岩韵律层组成,层理构造发育;主要为灰色中细粒长石英砂岩、泥质砂岩,夹薄层泥岩以及暗色泥岩。长7段,是湖盆发展演化的鼎盛时期,全区湖水伸展范围最大,以浅湖—深湖相沉积为主。中上部为暗色泥岩、油页岩、夹薄层粉—细砂岩,下部为薄层砂岩与暗色泥岩。灰黑色泥页岩和油页岩为延长组的主要生油岩^[7]。

古峰庄地区行政隶属宁夏盐池县青山乡,构造上位于鄂尔多斯盆地天环坳陷西北部,西邻西缘逆冲带,地质条件相对复杂,断层发育。近年来钻井成果表明,该地区延长组油气资源丰富,具有多层次及小而富的成藏特点(图1)。

2 裂缝发育特征

构造裂缝的发育和分布对油气成藏和产能高低具有显著的作用^[24-26]。本文以古峰庄地区延长组13口岩心观察井、18口成像测井资料、13口井碳氧同位素分析、3口井包裹体测试及2口井岩石声发射分析为依据,对天然构造裂缝发育特征、分

布和形成期次展开了深入研究。

2.1 岩心裂缝特征

从13口长7—长9段钻井岩心(图2a-e)中普遍可见特征不同的裂缝。按照力学成因,裂缝类型以剪切裂缝为主,部分为张裂缝。岩心裂缝以垂直裂缝和高角度裂缝为主,裂缝纵向延伸长短不一,最短为3 cm,最大可达90 cm。裂缝部分充填方解石脉体(图2a,e),脉体宽度可达0.5 cm,长度可达1.1 m,部分脉体中可见油迹;裂缝面多平直,可见多条不规则裂缝相互穿插和少量构造擦痕(图2d),表明裂缝具有多期性。扫描电镜观察分析表明,层状有机质、砂质纹层和矿物颗粒内均可形成微裂缝(图2f-g),开度在40 μm内,虽然裂缝面和裂缝之间有少量自生矿物和黏土矿物充填,但裂缝仍以半充填—未充填为主,具有较高有效性。

岩心观察和成像测井统计表明(图3),裂缝充填程度主要为未充填和半充填,占裂缝总数的59%以上,表明裂缝有效性较高。其次为方解石全充填,沥青、泥质充填较少。裂缝面和部分脉体中可见油斑、油迹及油侵等明显油气运移的痕迹,F21井长8段包裹体片荧光照射,微裂缝荧光颜色为棕红色,是油气成熟度和油气沿裂缝运移的重要指证(图2h)。以上现象证明了裂缝不仅仅是油气运移的良好通道,也是油气储集的空间。

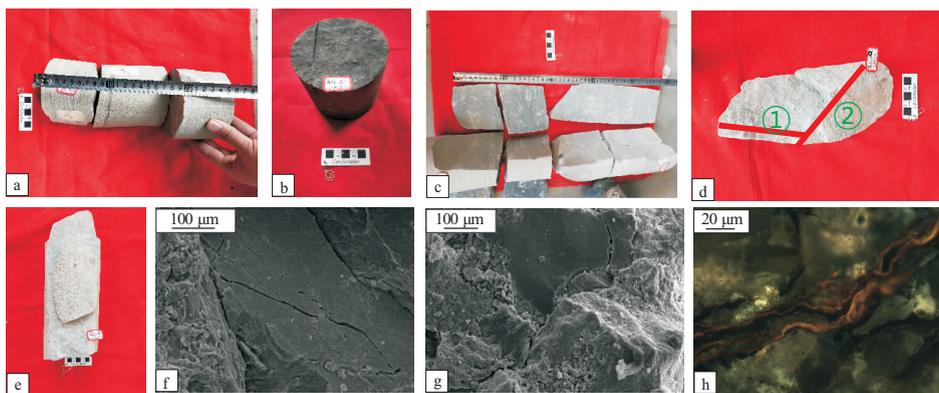


图 2 鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区延长组长 7—长 9 段裂缝特征

a.F34 井,长 7 段,2 321.64 m,裂缝方解石脉体填充,油斑;b.Y156 井,长 7 段,2 200.5 m,裂缝,油迹;c.Y125 井,长 8 段,2 420.1 m,裂缝见明显油气运移痕迹;d.Y120 井,长 9 段,裂缝,无充填;e.Y120 井,长 9 段,1 677.2 m,裂缝方解石脉体半充填;f.F2 井,长 8 段,2 390.4 m,扫描电镜,微裂缝;g.F34 井,长 9 段,2 490 m,扫描电镜,微裂缝;h.F21 井,长 8 段,2 443.47 m,荧光,微裂缝

Fig.2 Characteristics of fractures in Chang 7 to Chang 9 members of Triassic Yanchang Formation, Gufengzhuang area, western Ordos Basin

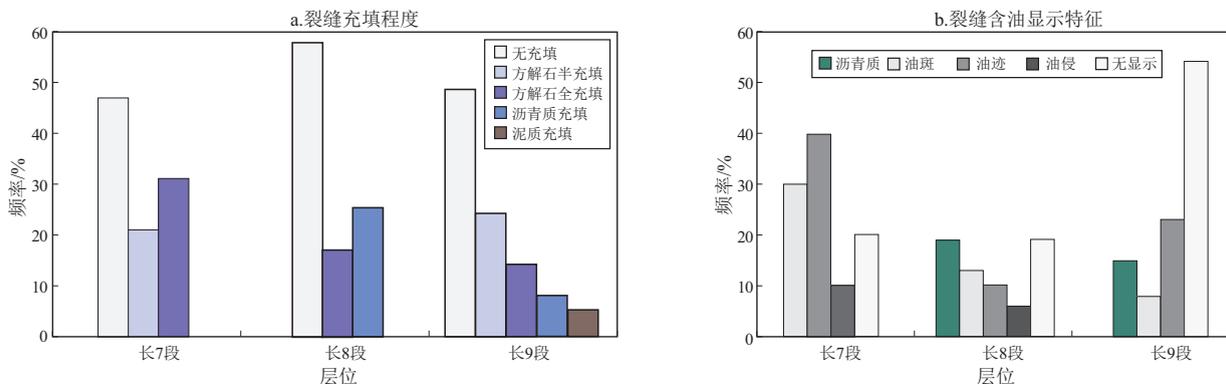


图 3 鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区延长组长 7—长 9 段裂缝充填类型

Fig.3 Filling types of fractures in Chang 7 to Chang 9 members of Triassic Yanchang Formation, Gufengzhuang area, western Ordos Basin

2.2 裂缝分布特征

2.2.1 成像测井裂缝表征

通过对研究区 18 口成像测井长 7—长 9 段天然裂缝的特征分析和统计(图 4),筛选出长 9 段 206 条、长 8 段 407 条、长 7 段 574 条,共计 1 187 条天然裂缝(图 5)。裂缝以长 7 段最发育,其次为长 8 段、长 9 段,充填程度以开启(未充填)裂缝为主,占 80%以上。闭合(充填)裂缝图像上呈亮色高阻正(余)弦曲线,如 F34 井长 7 段 2 334.2 m、F21 井长 9 段 2 485.9 m 处各发育一条 NEE 向高角度闭合裂缝。开启(未充填)裂缝图像上呈暗色高导正(余)弦曲线,如 F34 井长 7 段、F21 井长 8 段、长 9 段以 NEE、NE 向高角度开启裂缝。以统计学方法统计钻井岩心和成像测井中不同岩性、岩层厚度中裂缝发育程度,表明裂缝在细砂岩和泥质粉砂岩中大量发育,岩层厚度越薄,裂缝越发育。

2.2.2 裂缝纵向分布特征

根据成像测井分析结果绘制研究区长 7—长 9 段相应的走向玫瑰花图和倾角直方图(图 5)。长 7—长 9 段各层天然裂缝平均走向为 73.47°~72.05°,走向主体为 NEE 向,其次为 NE 向,少量的 NWW、NW 向。自下而上不同段裂缝走向分布稍有差异,长 9 段除了 NEE 优势方向之外,还发育 NWW、NE 向裂缝,长 7 段、长 8 段优势裂缝分布特征相似,都以 NEE 为主,NE 向次之,此外,长 7 段 NWW 向较长 8 段发育。研究区天然裂缝走向整体以 NEE 向为优势方位。

根据王允诚^[28]裂缝倾角分类,对研究区长 7—长 9 段各层裂缝进行了分类,绘制裂缝倾角直方图(图 5)。裂缝倾角主要有 45°~75°和 75°~90°两个峰值,表明裂缝以高角度裂缝(42.6%)和垂直裂缝(53.6%)为主,低角度裂缝欠发育(3.8%),水平裂缝基本不发育。长 7 段与长 9 段

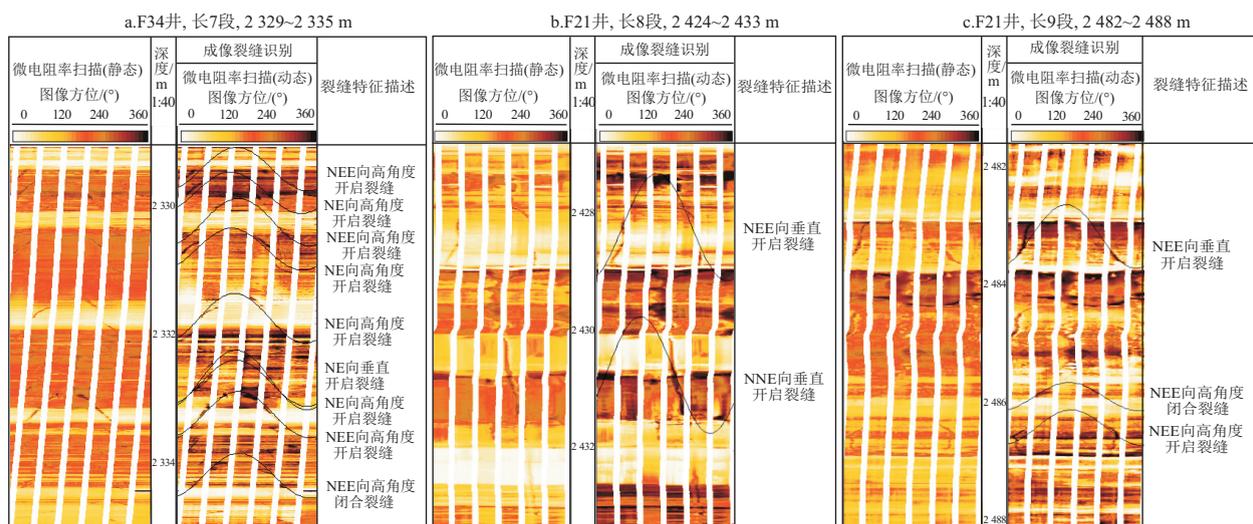


图 4 鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区长 7 段—长 9 段成像测井天然裂缝特征

Fig.4 Image logging showing characteristics of natural fractures in Chang 7 to Chang 9 members of Triassic Yanchang Formation, Gufengzhuang area, western Ordos Basin

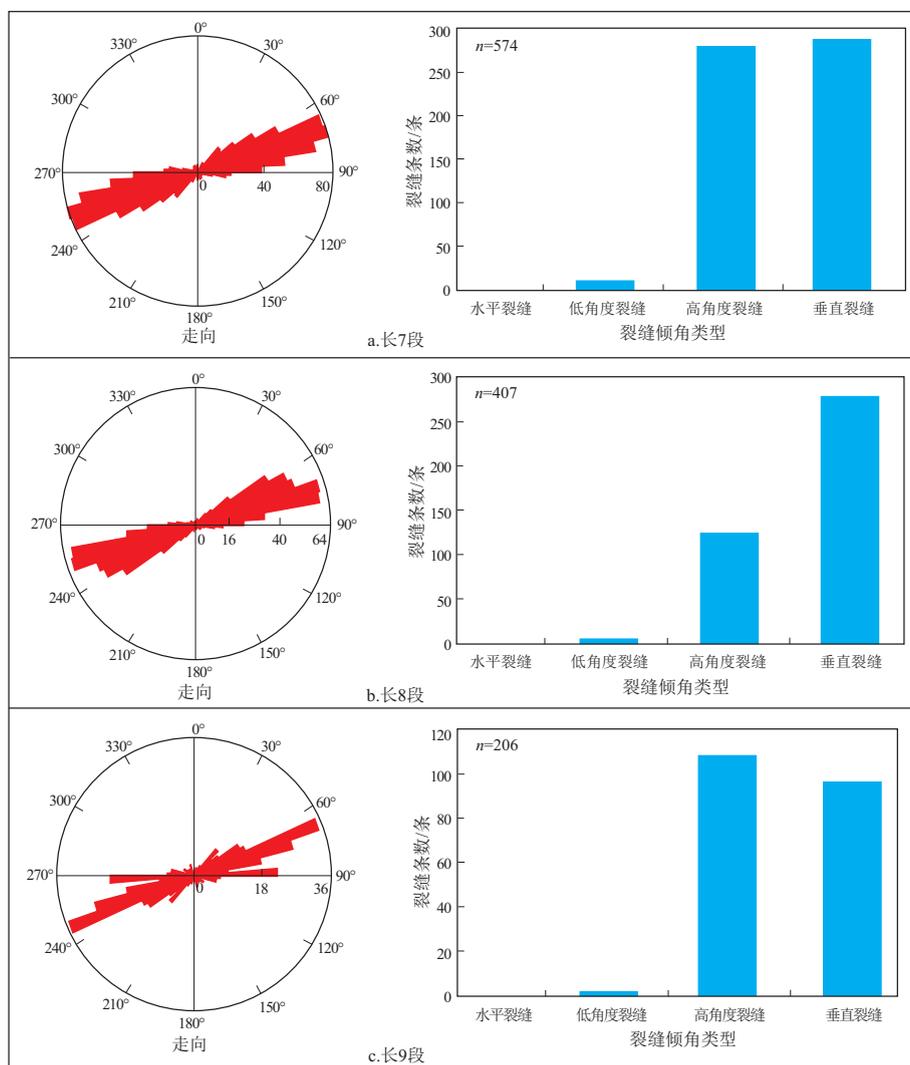


图 5 鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区延长组长 7—长 9 段裂缝产状特征

Fig.5 Occurrence of fractures in Chang 7 to Chang 9 members of Triassic Yanchang Formation, Gufengzhuang area, western Ordos Basin

裂缝倾角特征相似,以垂直裂缝和高角度裂缝为主;长 8 段以垂直裂缝为主。

2.2.3 裂缝平面分布特征

裂缝平面分布特征是确定裂缝活动时期和成因的重要依据。通过对不同钻井长 7—长 9 段裂缝走向进行统计,编制单井裂缝走向平面分布图,可直观分析裂缝平面特征(图 6a-c),古峰庄地区长 7—长 9 段天然裂缝平面走向与其纵向分布特征基本吻合,主体以 NEE 为主,NE 向次之,少量 NW、NWW 向。Y156 井以近 SN 向为主。长 9 段裂缝与长 8 段相似,以 NEE、NE 向为主,NWW、NW 次之,局部近 SN 向;长 7 段裂缝方向较长 8、长 9 段方向变化大,呈现出多方向趋势,以 NEE、NE 向为主,NWW、NNE 次之外,NNW、NW 以及近 SN 向裂缝增多。裂缝走向由南部向北部逐渐由 NEE 向 NNE 偏移,这可能受到 38° 南北构造带的影响。综合分析表明,该区裂缝发育具有多期性。

通过长 7—长 9 段裂缝与断裂叠合图分析(图 6d),裂缝在断裂附近和断裂交会处最发育。如 F23 井、Y226 井距离断裂最近,裂缝发育密度最高;Y226 井、Y373 井、F53 井距离断裂近且靠近 NEE 向断裂,裂缝不仅发育,其展布方向的变化也

增多;裂缝走向与断裂的方向整体有较好的一致性,如 NEE、NE 向裂缝与 NEE 向断裂方向一致;NW(Y76 井长 7 段)、NWW 向裂缝与 NW 向断裂方向一致;Y156 井位于西缘近 SN 向断裂带,裂缝发育 NNW 向与近 SN 向断裂方向一致。裂缝主体走向与 NEE 向断裂方向一致或微角度斜交,NEE 向裂缝与 NEE 向断裂可能具有同期性。

由长 7—长 9 段裂缝线密度分布(图 6d)可知,裂缝发育程度高的区域都集中在古峰庄中部及北部,向南部裂缝发育程度减弱,裂缝平面发育区与断裂分布区较吻合。总体裂缝高密度区沿 NEE 向断裂展布,NEE 向断裂对裂缝的影响可能更强,可能是断裂通过控制其附近的局部构造应力的分布影响着裂缝的分布。Y156、Y189 井位于 NEE 向断裂和近 SN 向断裂交会处,紧邻西缘逆冲断裂带,由于西缘逆冲带变形强度大,裂缝发育处于裂缝欠发育和裂缝极发育破碎带的状态,造成 Y156、Y189 井裂缝发育程度较低。

3 裂缝形成期次划分与成因分析

钻井岩心和成像测井资料分析表明裂缝具有多期性,结合裂缝充填物碳—氧同位素分析、裂缝

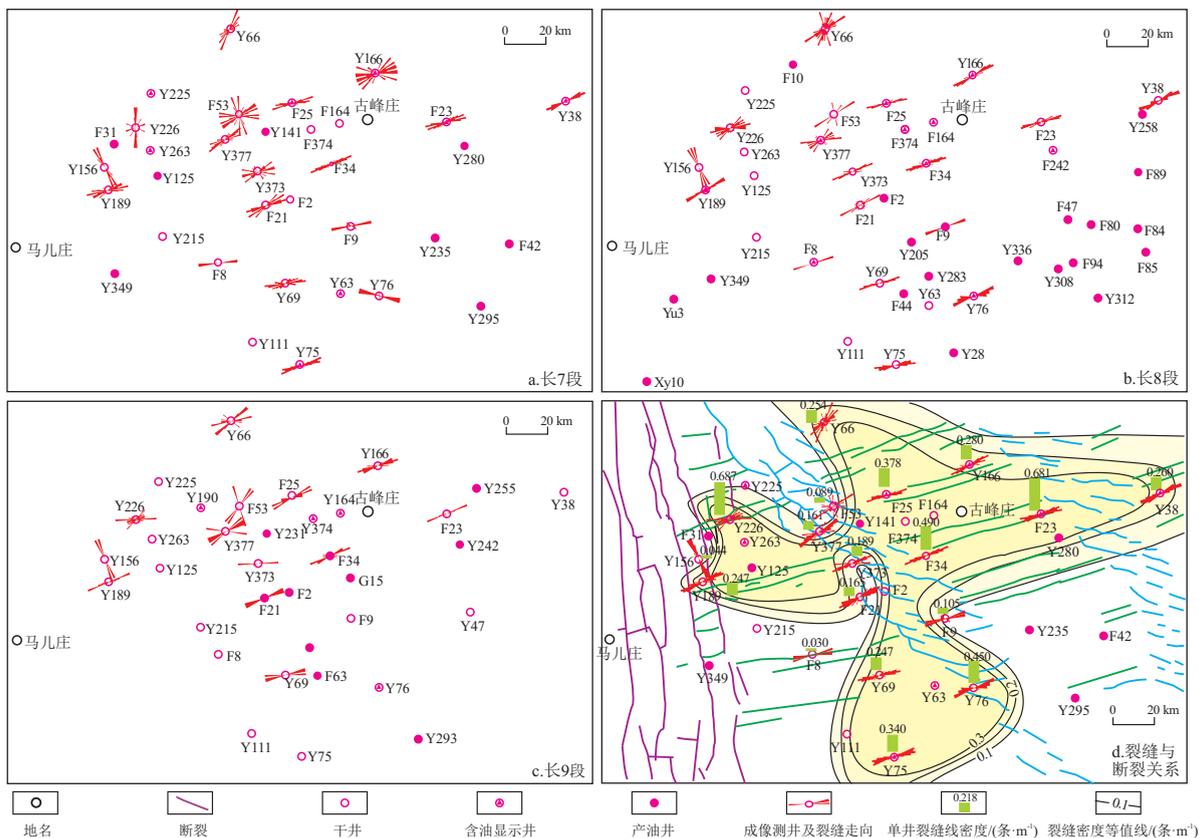


图 6 鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区延长组长 7—长 9 段裂缝平面展布(a-c)及其与断裂关系(d)
Fig.6 Plane distribution (a-c) and their relationship with faults (d) of fractures in Chang 7 to Chang 9 members of Triassic Yanchang Formation, Gufengzhuang area, western Ordos Basin

充填流体包裹体分析、岩石声发射实验对裂缝形成期次进行划分,并结合区域构造应力和断裂活动开展裂缝成因探讨。

3.1 裂缝期次划分

3.1.1 裂缝切割关系

从岩心观察分析,裂缝为多期形成。依据为:(1)早期形成的裂缝会限制晚期裂缝发育,(2)晚期形成的裂缝会错断早期裂缝,(3)裂缝充填与不充填,未充填的裂缝形成时间较晚^[15,30]。如图 2d 中,Y120 井长 9 段裂缝①被裂缝②错断,裂缝①早于裂缝②;Y156 井长 7 段(图 2b)、Y125 井长 8 段(图 2c)、Y120 井长 9 段(图 2e)裂缝未充填,F34 井长 7 段(图 2a)、Y120 井长 9 段(图 2d)裂缝充填方解石脉体,未充填裂缝形成时间晚于充填裂缝。由此可得古峰庄地区裂缝至少存在 3 个形成期次。

3.1.2 裂缝充填物碳—氧同位素分析

裂缝中方解石充填物形成时期是判断裂缝期次的常用方法^[15-18,30]。选取研究区 21 件岩心裂缝方解石脉体充填物样品,对其进行碳—氧稳定同位素测试分析。据氧同位素值分布可将样品分为 4 个区,所对应的氧同位素平均值分别是 -15.75‰, -17.5‰, -18.73‰, -21.65‰(图 7a)。根据 EPSTEIN^[29] 提出的氧测温方程式,可计算出裂缝的形成温度,再将形成温度与埋藏深度公式^[16]折算,估算出裂缝形成的埋藏深度,然后结合该区埋藏—热演化史,就可探讨裂缝的形成期次。

氧测温方程式:

$$t = 31.9 - 5.55(\delta^{18}O - \delta^{18}O_w) + 0.7(\delta^{18}O - \delta^{18}O_w)^2 \quad (1)$$

式中: t 为裂缝充填脉体的形成温度,℃; $\delta^{18}O$ 为测定样品的氧同位素值,‰; $\delta^{18}O_w$ 为地层水介质的氧同位素值,‰。

古峰庄地区延长组属于湖相—河流沉积体系的湖水环境,一般地层水介质的氧同位素值为 -10‰^[15]。根据测温方程式计算裂缝的形成温度分别为 87, 113, 131, 161 ℃。161 ℃ 为非正常地层埋藏温度,可能记录的是早白垩世发生的异常热事件和基底热液活动^[31-34],故忽略不计。取古地表平均温度 20 ℃,古地温梯度平均值 4.0 ℃/km^[31],进行裂缝形成时的埋深折算,得裂缝形成时的埋藏深度分别为 1 675, 2 338, 2 785 m。结合该区埋藏—热演化史(图 7c),裂缝形成时期分别为晚侏罗世晚期、早白垩世早期和早白垩世晚期。

3.1.3 裂缝充填物包裹体分析

裂缝充填流体包裹体是研究裂缝形成时间的有效手段^[14-16,35]。通过测定裂缝充填流体包裹体的均一温度,将均一温度与埋藏深度公式^[16]折算,结合埋藏史,可推断出裂缝的形成时期。

本次对研究区 F34、Y155 井长 7 段和 Y120 井长 9 段岩心样品展开裂缝充填包裹体分析,测得 38 个与油包裹体伴生的盐水包裹体均一温度值,并绘制了包裹体均一温度柱状图(图 7b),得 90~100 ℃、120~130 ℃ 两个峰值。将均一温度峰值 90~

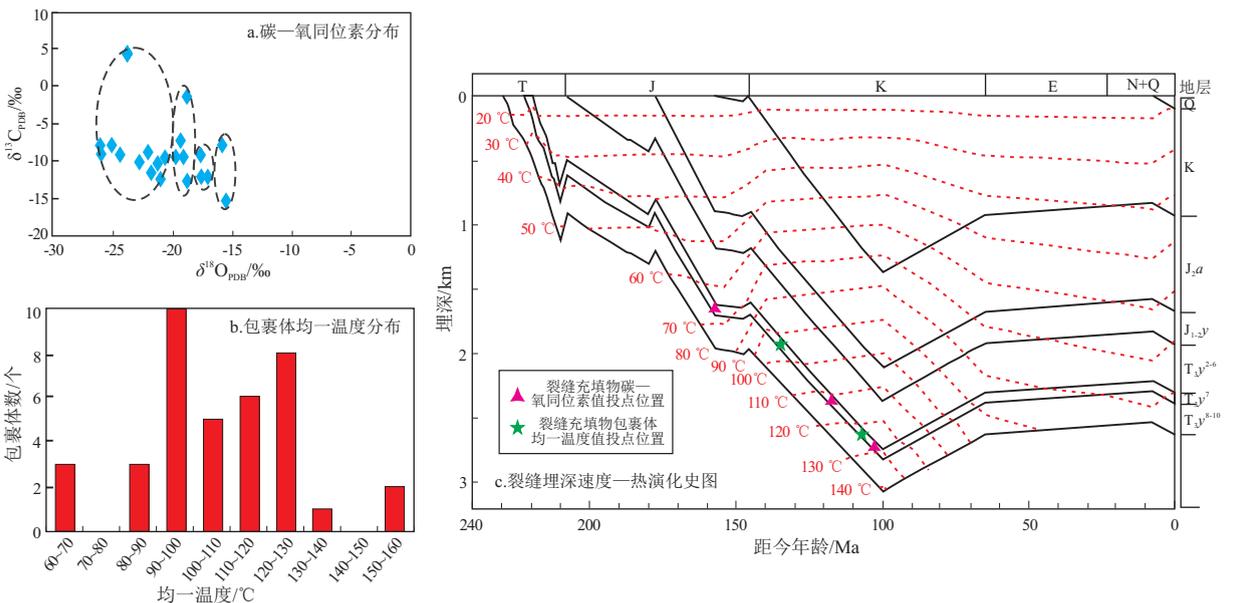


图 7 鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区延长组长 7—长 9 段裂缝充填物形成时期

Fig.7 Formation period of fillings in fractures in Chang 7 to Chang 9 members of Triassic Yanchang Formation, Gufengzhuang area, western Ordos Basin

100 °C、120~130 °C 与埋藏深度换算公式折算,取古地表平均温度 20 °C,古地温梯度 4.0 °C/hm^[31],计算得捕获流体包裹体深度分别为 1 750~2 000 m、2 500~2 750 m,结合埋藏—热演化史(图 7c),可知 90~100 °C 峰值对应 140~132 Ma,为早白垩世早期;120~130 °C 峰值对应 112~104 Ma,为早白垩世晚期,即裂缝活动时期具有早白垩世早期和早白垩世晚期两期。流体包裹体均一温度与埋藏深度换算公式为:

$$H=(T-T_0)/G\times 100 \quad (2)$$

式中: H 为捕获包裹体时的深度, m; T 为测定的包裹体均一温度, °C; T_0 为包裹体形成时的地表温度, °C; G 为古地温梯度, °C/hm。

3.1.4 岩石声发射实验

地层中的岩石对所受的古地应力具有记忆,当再次受到应力或受到的应力值超过历史古应力值时,岩石会产生 Kaiser 效应点,这些点与地质历史时期时岩石破裂的期次相对应,此时 Kaiser 效应点便是岩石当时的破裂期次^[16-19]。邵晓州等^[15]通过对古峰庄地区 Yu3、F34 井长 8 段岩心样品进行岩石声发射实验,分析了岩石的破裂期次。根据测

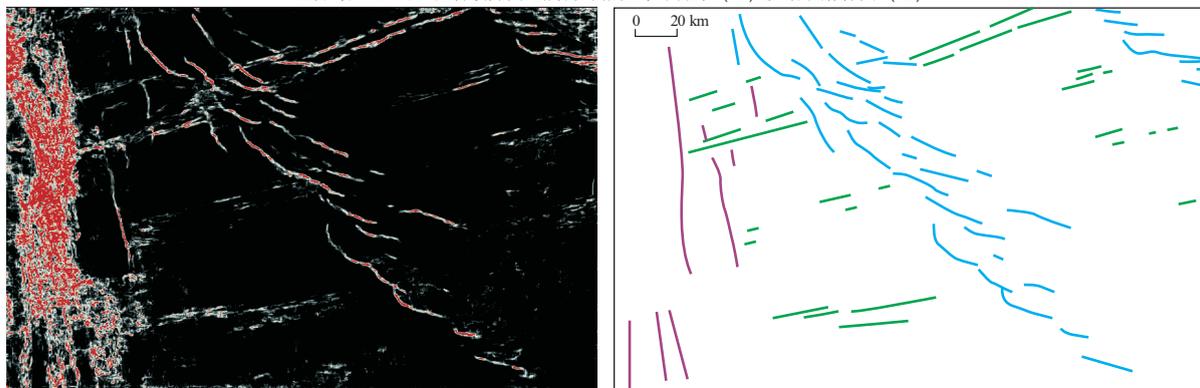
试实验数据,建立的加载时间和声发射特征参数关系分析(图 8),声发射曲线有 3~4 个 Kaiser 效应点。由此推断古峰庄地区裂缝发育期次至少存在 3 期。

3.2 裂缝成因探讨

裂缝的形成与断裂和构造活动密切相关^[34-36]。依据前人研究^[37-44],研究区中、新生代主要受到印支期近 SN 向、燕山期近 EW 向、喜马拉雅期 NE-SW 向 3 期构造应力影响。同时根据地震切片(图 8a)和地震剖面(图 8b)分析,认为古峰庄地区断裂活动具有多期性,NW 向、近 SN 向和 NEE 向断裂主要形成时期分别为晚三叠世、晚侏罗世、早白垩世以来,分别对应印支期、燕山期和喜马拉雅期三期构造运动。

印支期(晚三叠世)在扬子板块与华北板块自东向西碰撞下,研究区区域主应力方向为近 SN 向,导致 NW 向基底断裂重新活动,发生左旋走滑,形成 NW 向雁列式张剪断裂,并伴生了少量 NW 向裂缝(图 10)。燕山期(晚侏罗世)受特提斯域洋闭合、拉萨块体向西北的挤压和古太平洋构造域板块俯冲共同作用,研究区整体处于近东西向构造挤压应力背景之下。研究区西缘逆冲推覆构造

a. 古峰庄地区长7泥岩顶界面地震瞬时相位等时切片(左)及断裂解释图(右)



b. 古峰庄地区不同时期断裂在地震剖面上的特征

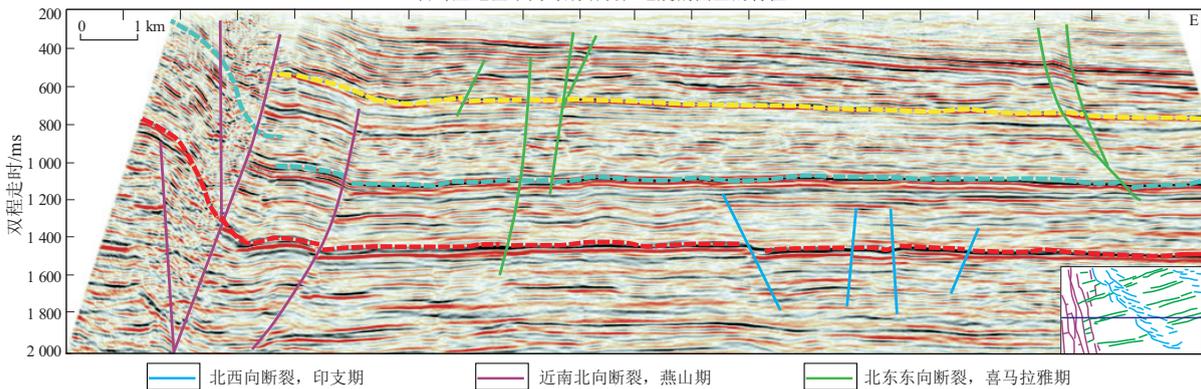


图 8 鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区不同时期断裂活动特征解释结果

Fig.8 Interpretation of fault activities in different periods in Gufengzhuang area, western Ordos Basin

带强烈活动,产生了近 SN 向逆冲断裂(图 9),并形成近 SN 向、NWW 向及部分 NEE 向裂缝。喜马拉雅期在印度—欧亚板块碰撞和青藏高原快速隆升的远程效应强烈影响下,研究区处于 NE—SW 向挤压应力环境,且 NEE、NE 向裂缝是研究区最主要的裂缝,与研究区 NEE 向断裂活动相关,在构造应力作用下,形成 NEE、NE 向裂缝(图 9)。

综合岩心、成像测井、裂缝充填物碳—氧同位素和包裹体、岩石声发射以及构造应力和断裂活动分析,认为古峰庄地区长 7—长 9 段裂缝活动期次具有印支期、燕山期和喜马拉雅期 3 个期次,主要活动时期为燕山期和喜马拉雅期。

4 裂缝与油藏的关系

4.1 裂缝改善了储层性能

古峰庄地区油藏分布于整个延长组,平面上呈多油层叠合发育,纵向上呈串珠状,储层孔隙结构差、渗透率相对较低,砂体整体致密,属典型的低渗透储层^[45-46]。前文研究表明研究区长 7—长 9 段

裂缝发育,且未充填的垂直裂缝和高角度裂缝广泛发育,有效性高;通过大量储层物性数据统计分析表明,裂缝发育段储层孔隙度、渗透率比裂缝不发育段明显提高(表 1)。以长 9 段为例,F21 井裂缝不发育段(2 450~2 454 m)平均孔隙度为 12.45%,平均渗透率为 $1.68 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,2 456~2 460 m 裂缝发育密度为 0.5 条/m,平均孔隙度为 15.55%,平均渗透率为 $6.59 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;Y373 井 2 501~2 509 m 裂缝不发育,平均孔隙度为 9.34%,平均渗透率为 $0.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;2 518~2 533 m 段裂缝发育密度为 0.26 条/m,平均孔隙度为 13.98%,平均渗透率为 $1.40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。可见有效性裂缝的发育对改善低渗透储层物性具有一定的作用。

4.2 裂缝活动对石油成藏的作用

前文研究表明,研究区长 7—长 9 段裂缝发育,岩心裂缝见油侵、油迹、油斑等不同级别石油运移后保留的明显痕迹;裂缝充填物包裹体测试表明,裂缝内存在油气包裹体,特别是方解石脉体中可见烃类包裹体,证实了裂缝沟通源储,是石油运

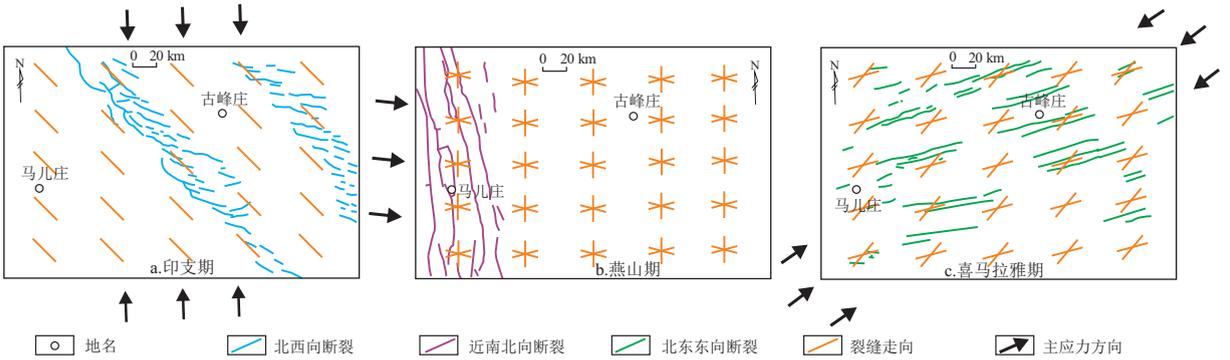


图 9 鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区断裂/裂缝形成示意

Fig.9 Formation of faults and fractures in Gufengzhuang area, western Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区裂缝与储层物性、单井产量关系

Table 1 Physical properties of fractures and reservoirs vs. single well productions, Gufengzhuang area, western Ordos Basin

井位	层位	无裂缝发育段		裂缝发育段		裂缝发育密度/ (条·m ⁻¹)	裂缝产状		产量/ (t·d ⁻¹)
		平均孔隙度/%	平均渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	平均孔隙度/%	平均渗透率/ 10 ⁻³ μm ²		走向	裂缝角度	
F21	长 9	8.95	0.36	15.55	6.59	0.50	1 条 NE、 1 条 NEE	皆为垂直开启裂缝	121.72
F34	长 9	12.03	0.72	15.43	1.97	0.43	1 条 NW、 2 条 NEE	NW 向为高角度闭合裂缝、 NEE 为垂直开启裂缝	56.27
Y65	长 7	4.42	0.03	10.09	0.15	0.57	3 条 NEE、 1 条 NWW	皆为垂直开启裂缝	6.46
Y155	长 8	10.07	0.37	15.10	0.80	0.08	1 条 NEE	高角度开启裂缝	4.42
Y373	长 9	9.34	0.24	13.98	1.40	0.26	4 条 NEE	3 条为垂直开启裂缝、 1 条为高角度开启裂缝	产水
Y377	长 9	9.85	0.30	11.69	0.64	0.25	2 条 NE、 1 条 NEE	NE 向为垂直开启裂缝、 NEE 为高角度开启裂缝	产水

移的重要通道;裂缝活动时期与石油大规模排烃、运移—成藏期密切相关^[3,7,46]。

通过钻井裂缝与油气显示分析(图 6,表 1),裂缝对改善储层物性和油气成藏具有重要作用,但不同井裂缝发育段油气显示变化较大,可能与裂缝的活动时期和有效性相关。研究区延长组裂缝长度主要分布在 0.20 m 以内,占 88.1%^[15],这类裂缝主要起到改善储层物性和为油气聚集成藏提供储集空间的作用;大于 0.20 m 的裂缝占 11.9%,最长裂缝达 1.71 m^[15],这类裂缝延伸长度较大,在垂向上能沟通上下地层,有利于延长组油气垂向上向更远的储层运移成藏;或使已经形成的油气沿着裂缝/断裂向上逸散,或在延长组上部层位和延安组再次成藏;或造成穿层,沟通底水,底水快速突进,造成水淹。以 F34、Y377 井长 9 段为例,F34 井产油层上部 2 469~2 476 m 段依次发育长为 0.2 m 的 NEE 向垂直开启裂缝、0.35 m 的 NW 向高角度开启裂缝和 0.55 m 的 NEE 向垂直开启裂缝,裂缝发育密度为 0.43 条/m。根据前述裂缝期次和成因分析,其形成于印支期和燕山期,改善了储层性能并有助于成藏,在该位置测试求产获 56.27 t/d 的高产工业油流(图 10a);Y377 井测井解释 2 514~2 518 m 为油水同层,在其上部 2 502~2 504 m 处依次发育长为 0.5 m 的 NE 向垂直开启裂缝、0.35 m

的 NEE 向垂直开启裂缝和 1.2 m 的 NE 向垂直开启裂缝,裂缝发育密度为 0.25 条/m,平均孔隙度为 11.69%,平均渗透率 $0.64 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,但试油结果为产水。根据裂缝期次和成因分析,裂缝主要形成于喜马拉雅期,不利于油气保存导致油气逸散(图 10b)。

由此可见,印支期、燕山期和喜马拉雅期 3 期有效性裂缝对油藏的控制作用不尽相同。印支期裂缝发育早、数量少,在一定程度上改善了储层性能。燕山期裂缝大量发育,与长 7 段烃源岩大规模排烃期一致,促进了生成的油气沿裂缝垂向运移至长 7 段和下部储层合适位置聚集成藏,同时裂缝使其物性进一步变好,形成长 7、长 8、长 9 段等多层系油藏。喜马拉雅期裂缝活动对已形成的油藏具有后期调整或破坏作用,使得已经形成的油气沿着裂缝/断裂向上逸散,或在延长组上部层位和延安组再次成藏。可见,裂缝发育特征和活动时期对油气运移、聚集成藏和改造具有重要作用。

需要注意的是,研究区邻近西缘逆冲带,构造复杂,断层发育,砂体、构造位置、断层也是控制油气运移和聚集的重要因素,裂缝并不是唯一的成藏控制因素。因此,在今后的勘探开发中,应综合考虑岩性、构造位置、断裂、裂缝等因素,不断深化它们对油气成藏的作用研究,才能实现深层系油气勘

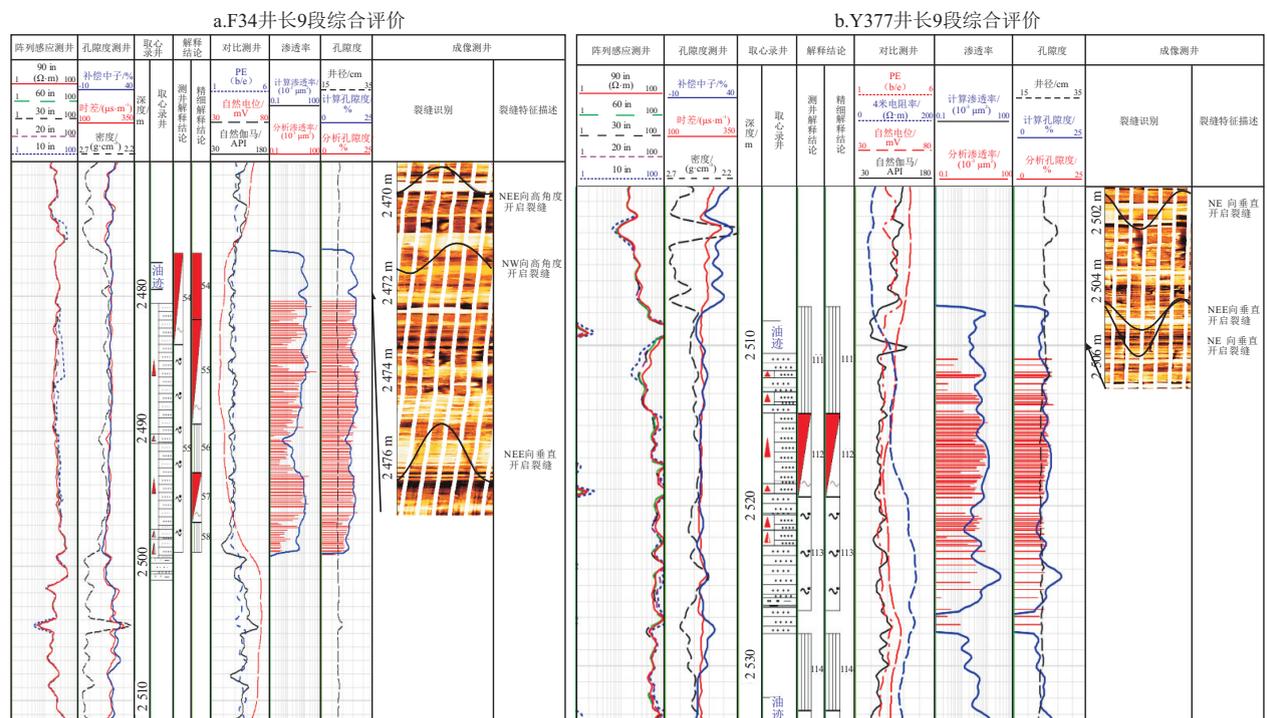


图 10 鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区典型井三叠系延长组长 9 段综合评价
 Fig.10 Comprehensive evaluation of Chang 9 member of Triassic Yanchang Formation in typical wells, Gufengzhuang area, western Ordos Basin

探在复杂构造区获得更大突破。

此外,岩心裂缝、裂缝充填物碳—氧同位素和流体包裹体分析裂缝期次中,由于样品在成像测井段无该样品裂缝信息以及在采样过程中未测量该裂缝走向,成为本文裂缝期次研究的遗憾和不足,希望在今后的研究工作中各位研究者们能够重视该方面的研究。

5 结论

(1)古峰庄地区三叠系延长组长 7—长 9 段天然裂缝发育,以长 7 段最发育,长 9 段较少;裂缝以高角度和垂直缝为主,走向以 NEE 向为主,NE 向次之,少量 NW 和 NWW 向;裂缝面较平直,可见明显过油痕迹;裂缝以未充填和半充填为主,有效性高。

(2)根据钻井岩心观察、成像测井、裂缝充填物碳—氧同位素、流体包裹体及岩石声发射实验,并综合研究区构造背景、断裂活动期次分析,古峰庄地区裂缝形成具有多期性,至少具有印支期、燕山期和喜马拉雅期 3 个期次,主要活动时期为燕山期和喜马拉雅期。印支期近 SN 向构造应力产生了少量 NW 向裂缝;燕山期 EW 向构造应力,形成近 SN、NWW 及部分 NEE 向裂缝;喜马拉雅期 NE 向构造应力产生了 NEE、NE 向裂缝。

(3)不同时期形成的有效裂缝改善了储层物性,为石油运移形成长 7、长 8、长 9 段等多个层系油藏提供重要通道。

参考文献:

[1] DENG Ben, ZHAO Hong, QU Mengmeng, et al. Distribution characteristics, genesis analyses, and research significance of Triassic regional structural fractures in the Ordos Basin, central China[J]. *Geological Journal*, 2018, 53(S1): 212-224.

[2] 夏东领,伍岳,夏冬冬,等.鄂尔多斯盆地南缘红河油田长 8 致密油藏非均质性表征方法[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(4): 704-712.

XIA Dongling, WU Yue, XIA Dongdong, et al. Characterization method of heterogeneity for Chang 8 tight reservoir in Honghe oil field, southern margin of Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(4): 704-712.

[3] 王启宇,郑荣才,梁晓伟,等.鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组裂缝特征及成因[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(2): 220-228.

WANG Qiyu, ZHENG Rongcai, LIANG Xiaowei, et al. Feature and genesis of the reservoir fractures of Upper Triassic Yanchang Formation in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2011, 38(2): 220-228.

[4] FAN Jianming, QU Xuefeng, WANG Chong, et al. Natural fracture distribution and a new method predicting effective fractures in tight oil reservoirs in Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(5): 806-814.

[5] 刘行军,杨双定,谢刚,等.鄂尔多斯盆地合水地区长 8 段裂缝发育特征及其对产油量的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(6): 57-60.

LIU Xingjun, YANG Shuangding, XIE Gang, et al. The study of relationship between fracture characteristic and yield of Chang8 section in Heshui area, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(6): 57-60.

[6] 曾联波.低渗透砂岩油气储层裂缝及其渗流特征[J]. *地质科学*, 2004, 39(1): 11-17.

ZENG Lianbo. Fissure and its seepage Characteristics in low-permeable sandstone reservoir[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2004, 39(1): 11-17.

[7] 付金华.科学出版社·地质分社图书推荐《鄂尔多斯盆地致密油勘探理论与技术》[J]. *中国科学:地球科学*, 2018, 48(6): 811.

FU Jinhua. Exploration theory and technology of tight oil in Ordos Basin[J]. *Chinese Science: Earth Science*, 2018, 48(6): 811.

[8] 马海勇,周立发,张雪峰,等.陕西省定边—吴起地区延长组长 8 地层裂缝形成因素分析[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(2): 106-110.

MA Haiyong, ZHOU Lifa, ZHANG Xuefeng, et al. Analysis of factors affecting fractures of Chang-8 subsection based on Dingbian-Wuqi area of Shaanxi Province[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(2): 106-110.

[9] 赵向原,曾联波,王晓东,等.鄂尔多斯盆地宁县—合水地区长 6、长 7、长 8 储层裂缝差异性及其开发意义[J]. *地质科学*, 2015, 50(1): 274-285.

ZHAO Xiangyuan, ZENG Lianbo, WANG Xiaodong, et al. Differences of natural fracture characteristics and their development significance in Chang 6, Chang 7 and Chang 8 reservoir, Ningxian-Heshui area, Ordos Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50(1): 274-285.

[10] 肖承钰,尹伟,张颖,等.鄂尔多斯镇泾地区延长组成藏体系与油气富集模式[J]. *石油实验地质*, 2015, 37(3): 347-353.

XIAO Chengyu, YIN Wei, ZHANG Ying, et al. Petroleum accumulation systems and oil enrichment patterns of Yanchang Formation in Zhenjing area, southern Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(3): 347-353.

[11] 邓虎成,周文,彭军,等.鄂尔多斯麻黄山地区裂缝与油气成藏关系[J]. *新疆地质*, 2010, 28(1): 81-85.

DENG Hucheng, ZHOU Wen, PENG Jun, et al. Relationship between fracture and hydrocarbon accumulation of Mahuangshan area in Ordos Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 2010, 28(1): 81-85.

[12] 梁晓伟,韩永林,王海红,等.鄂尔多斯盆地姬塬地区上三叠统延长组裂缝特征及其地质意义[J]. *岩性油气藏*, 2009, 21(2): 49-53.

LIANG Xiaowei, HAN Yonglin, WANG Haihong, et al. Fracture characteristics and geological significance of Upper Triassic Yanchang Formation in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. *Lithologic*

- Reservoirs, 2009, 21(2): 49-53.
- [13] 高金栋. 鄂尔多斯盆地姬塬油田三叠系延长组长 7 油层组致密砂岩天然裂缝识别与建模[D]. 西安: 西北大学, 2018.
GAO Jindong. Identification and modeling of tight sandstone natural fractures in Chang 7 section of Triassic Yanchang Formation in Jiyuan Oilfield, Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- [14] 李士祥, 邓秀芹, 庞锦莲, 等. 鄂尔多斯盆地中生界油气成藏与构造运动的关系[J]. 沉积学报, 2010, 28(4): 798-807.
LI Shixiang, DENG Xiuqin, PANG Jinlian, et al. Relationship between petroleum accumulation of Mesozoic and tectonic movement in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(4): 798-807.
- [15] 邵晓州, 王苗苗, 惠潇, 等. 鄂尔多斯盆地盐池地区裂缝特征、形成期次及发育模式[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(10): 1501-1513.
SHAO Xiaozhou, WANG Miaomiao, HUI Xiao, et al. Characteristics, formation stages and development model of fractures in Yanchi area, Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(10): 1501-1513.
- [16] 姜琳, 邱振, 郭玉森, 等. 鄂尔多斯盆地延长组次生矿物与裂缝形成时限分析[J]. 地质科学, 2017, 52(3): 915-930.
JIANG Lin, QIU Zhen, GUO Yusen, et al. The analysis of secondary minerals and fracture formation time in Yanchang Formation of Ordos Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2017, 52(3): 915-930.
- [17] 邓虎成, 周文, 姜文利, 等. 鄂尔多斯盆地麻黄山西区块延长、延安组裂缝成因及期次[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(5): 811-817.
DENG Hucheng, ZHOU Wen, JIANG Wenli, et al. Genetic mechanism and development periods of fracture in Yanchang and Yan'an formation of western Mahuangshan block in Ordos Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(5): 811-817.
- [18] 王翠丽, 周文, 李红波, 等. 镇泾地区延长组多期次裂缝发育特征及分布[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(5): 596-603.
WANG Cuili, ZHOU Wen, LI Hongbo, et al. Characteristics and distribution of multiphase fractures in Yanchang Formation of Zhenjing block in Ordos Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(5): 596-603.
- [19] 郑荣才. 储层裂缝研究的新方法—声发射实验[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 186-189.
ZHENG Rongcai. A new method of studying reservoir fractures: acoustic emission experiment [J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(3): 186-189.
- [20] DONG Shaoqun, ZENG Lianbo, LYU Wenya, et al. Fracture identification by semi-supervised learning using conventional logs in tight sandstones of Ordos Basin, China [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 76: 103131.
- [21] LOHR T, KRAWCZYK C M, TANNER D C, et al. Strain partitioning due to salt: insights from interpretation of a 3D seismic data set in the NW German Basin [J]. Basin Research, 2007, 19(4): 579-597.
- [22] 朱兰, 李素华, 余洋, 等. 川西新场地区中三叠统雷口坡组顶部风化壳裂缝分布特征及预测[J]. 石油实验地质, 2022, 44(3): 448-455.
ZHU Lan, LI Suhua, YU Yang, et al. Fracture distribution and prediction of weathering crust reservoirs on the top of Leikoupo Formation, Xinchang area, western Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(3): 448-455.
- [23] 付金华, 李士祥, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬大油田多层系复合成藏机理及勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(5): 1-9.
FU Jinhua, LI Shixiang, LIU Xianyang, et al. Multi-layer composite accumulation mechanism and exploration significance of Jiyuan Oilfield, Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(5): 1-9.
- [24] 曾联波, 李忠兴, 史成恩, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 174-180.
ZENG Lianbo, LI Zhongxing, SHI Cheng'en, et al. Characteristics and origin of fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 174-180.
- [25] 周新桂, 张林炎, 范昆. 含油气盆地低渗透储层构造裂缝定量预测方法和实例[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3): 328-333.
ZHOU Xingui, ZHANG Linyan, FAN Kun. Methods for quantitative prediction of tectonic fractures in compact reservoirs in petroliferous basins and a case study [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(3): 328-333.
- [26] 张莉. 陕甘宁盆地储层裂缝特征及形成的构造应力场分析[J]. 地质科技情报, 2003, 22(2): 21-24.
ZHANG Li. Characteristics of reservoir fracture and the analysis of stress field in Shaanxi-Gansu-Ningxia Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(2): 21-24.
- [27] 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 617-638.
LIU Chiyang, ZHAO Hongge, GUI Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 617-638.
- [28] 王允诚. 裂缝性致密油气储集层[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
WANG Yuncheng. Fractured tight oil and gas reservoir [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- [29] EPSTEIN S, BUCHSBAUM R, LOWENSTAM H A, et al. Revised carbonate-water isotopic temperature scale [J]. GSA Bulletin, 1953, 64(11): 1315-1325.
- [30] 郭凯, 曾辉泽, 李元昊, 等. 陇东地区延长组构造裂缝方解石脉特征及其与烃类流体活动的关系[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(2): 36-42.
GUO Kai, ZENG Jianhui, LI Yuanhao, et al. Geochemical characteristics of tectonic fracture-filling calcite in Yanchang Formation of Longdong area and its relationship with hydrocarbon fluid flow [J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(2): 36-42.

- [31] 任战利,于强,崔军平等.鄂尔多斯盆地热演化史及其对油气的控制作用[J].地学前缘,2017,24(3):137-148.
REN Zhanli, YU Qiang, CUI Junping, et al. Thermal history and its controls on oil and gas of the Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 137-148.
- [32] 时保宏,张艳,张雷,等.鄂尔多斯盆地延长组长7致密储层流体包裹体特征与成藏期次[J].石油实验地质,2012,34(6):599-603.
SHI Baohong, ZHANG Yan, ZHANG Lei, et al. Hydrocarbon accumulation dating by fluid inclusion characteristics in Chang7 tight sandstone reservoirs of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Petroleum Experimental Geology, 2012, 34(6): 599-603.
- [33] 陈瑞银,罗晓容,赵文智,等.鄂尔多斯盆地中生代热异常及烃源岩热演化特征[J].石油勘探与开发,2007,34(6):658-663.
CHEN Ruiyin, LUO Xiaorong, ZHAO Wenzhi, et al. Thermal anomaly and thermal evolution of source rocks in Mesozoic, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(6): 658-663.
- [34] 谷阳,徐晟,张炜,等.黔北地区龙马溪组页岩裂缝发育特征及地质意义[J].断块油气田,2021,28(6):733-738.
GU Yang, XU Sheng, ZHANG Wei, et al. Fracture development characteristics and geological significance of Longmaxi Formation shale in northern Guizhou[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, 28(6): 733-738.
- [35] 彭先锋,邓虎成,何建华,等.鄂尔多斯盆地大牛地气田中奥陶统马家沟组裂缝特征及成因[J].石油实验地质,2022,44(1):41-50.
PENG Xianfeng, DENG Hucheng, HE Jianhua, et al. Characteristics and genesis of fractures in Middle Ordovician Majiagou Formation, Daniudi Gas Field, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(1): 41-50.
- [36] 尚墨翰,赵向原,胡向阳,等.川东北元坝地区陆相储层天然裂缝发育特征及分布模式[J].断块油气田,2022,29(1):8-13.
SHANG Mohan, ZHAO Xiangyuan, HU Xiangyang, et al. Development characteristics and distribution patterns of natural fractures of continental reservoir in Yuanba area, northeastern Sichuan Basin[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(1): 8-13.
- [37] 赵文智,胡素云,汪泽成,等.鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集的控制作用[J].石油勘探与开发,2003,30(5):1-5.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, WANG Zecheng, et al. Key role of basement fault control on oil accumulation of Yanchang Formation, Upper Triassic, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(5): 1-5.
- [38] 吴忠锐,何生,何希鹏,等.涟源凹陷上二叠统大隆组泥页岩裂缝方解石脉体流体包裹体特征及其启示[J].地质科技情报,2019,38(4):70-81.
WU Zhongrui, HE Sheng, HE Xipeng, et al. Characteristics of fluid inclusions in fracture calcite veins and implications of Upper Permian Dalong Formation shale at the Lianyuan Depression[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(4): 70-81.
- [39] 何自新.鄂尔多斯盆地演化与油气[M].北京:石油工业出版社,2003.
HE Zixin. The evolution and petroleum of Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [40] 祖克威,曾联波,巩磊.断层相关褶皱概念模型中的裂缝域[J].地质科学,2013,48(4):1140-1147.
ZU Kewei, ZENG Lianbo, GONG Lei. Fractures domains in conceptual models of fault-related folds[J]. Chinese Journal of Geology, 2013, 48(4): 1140-1147.
- [41] 刘永涛,刘池洋,赵俊峰,等.鄂尔多斯盆地西缘中部微小断层的成因机制与控藏特征[J].地质科学,2018,53(3):922-940.
LIU Yongtao, LIU Chiyang, ZHAO Junfeng, et al. Forming mechanism of small-scale faults and their control for the reservoir formation in the middle of western margin of the Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2018, 53(3): 922-940.
- [42] 徐黎明,周立发,张义楷,等.鄂尔多斯盆地构造应力场特征及其构造背景[J].大地构造与成矿学,2006,30(4):455-462.
XU Liming, ZHOU Lifa, ZHANG Yikai, et al. Characteristics and tectonic setting of tectono-stress field of Ordos Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2006, 30(4): 455-462.
- [43] 刘亢,曹代勇,徐浩,等.鄂尔多斯煤盆地西缘古构造应力场演化分析[J].中国煤炭地质,2014,26(8):87-90.
LIU Kang, CAO Daiyong, XU Hao, et al. Paleotectonic stress field evolutionary analysis in west margin of Ordos coal basin[J]. Coal Geology of China, 2014, 26(8): 87-90.
- [44] 赵红格,刘池洋,王建强,等.鄂尔多斯盆地西部晚三叠世构造属性探讨[J].中国地质,2007,34(3):384-391.
ZHAO Hongge, LIU Chiyang, WANG Jianqiang, et al. Tectonic attribute of the western Ordos Basin during the Late Triassic[J]. Geology in China, 2007, 34(3): 384-391.
- [45] 周新平,惠潇,邓秀芹,等.鄂尔多斯盆地盐池地区中生界油藏分布规律及成藏主控因素[J].西北大学学报(自然科学版),2019,49(2):268-279.
ZHOU Xinpeng, HUI Xiao, DENG Xiuqin, et al. Distribution and main controlling factors of Mesozoic reservoir in Yanchi area of Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2019, 49(2): 268-279.
- [46] 屈雪峰,温德顺,张龙,等.鄂尔多斯盆地延长组超低渗透油藏形成过程分析:以古峰庄—麻黄山地区为例[J].沉积学报,2017,35(2):383-392.
QU Xuefeng, WEN Deshun, ZHANG Long, et al. Accumulation process of ultra-low permeability reservoirs in Yanchang Formation Ordos Basin: a case from Gufengzhuang—Mahuangshan area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(2): 383-392.