Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

鄂尔多斯盆地天环坳陷延长组断裂特征、形成期次及油气地质意义

——以洪德地区为例

刘孝锐[1)],肖正录[1,2,3)],路俊刚[1,2,3)],张忠义[4)],张晓磊[4)],侯云超[4)],薛楠[4)]

1)西南石油大学地球科学与技术学院,成都,610500;

2)油气藏地质及开发工程全国重点实验室(西南石油大学),成都,610500;

3)天然气地质四川省重点实验室,成都,610500;

4)中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院,西安,710018

内容提要:鄂尔多斯盆地天环坳陷中—上三叠统延长组油气资源丰富,勘探潜力巨大,但由于地处盆地西缘,构造活动复杂,断裂分布规律及控藏机制不明。基于岩芯、成像测井、裂缝面方解石 C—O 同位素及 U-Pb 同位素定年实验,对洪德地区长 6~长 8 油层组断裂的发育特征、形成期次进行研究,并探讨了断裂对油气成藏的控制作用。研究表明:① 洪德地区裂缝多集中在延长组下组合,以垂直和高角度的剪切缝为主,裂缝部分充填方解石与石英,可见明显过油痕迹;② 裂缝走向以北东东—南西西向占绝对优势,近东西向次之,主要形成于早白垩世中期、早白垩世末期以及晚白垩世早期三期,对应的 O 同位素换算温度分别为 115.39℃、139.83℃和 153.55℃;③ 缝面方解石 U-Pb 同位素年龄表现为 170.6±6.1 Ma、143±12 Ma、104±32 Ma 三期,北东东向主断裂的活动时期为中晚侏罗世—早白垩世,对应于燕山运动期二幕至三幕,与长 8 油藏的成藏期相吻合。综上分析认为,天环坳陷延长组断裂改善了低渗透储层的物性,起到沟通油源和运移通道的作用,促进了油气在远源砂体中运聚成藏。

关键词:U-Pb 同位素定年;断裂形成期次;控藏作用;延长组;洪德地区;鄂尔多斯盆地

近年来,长庆油田按照“跳出成熟区,寻找新领域”的石油勘探思路,向盆地西缘天环坳陷构造复杂区甩开勘探,不断获得新突破,在天环南段形成洪德—山城、演武、彭阳三大目标区(尹帅等,2022;梁正中等,2023;张晓磊等,2023;李明瑞等,2023a;刘显阳等,2023)。洪德油田位于地质条件极为复杂的鄂尔多斯盆地西部天环坳陷腹部,由于构造位置整体偏低,成藏条件复杂,早期勘探一直没有取得重大突破。从 2021 年 6 月开始,长庆油田借助三维地震技术,通过地质—地震相结合,强化古今构造分析,精细刻画断裂展布形态,不断深化油藏主控因素研究,经过两年多的勘探攻坚,在该地区发现地质储量超亿吨级整装大油田,开辟了鄂尔多斯盆地西部石油勘探开发新领域。

鄂尔多斯盆地构造平缓,油气的运移模式以砂体输导为主,裂缝输导为辅(赵振宇等,2012;刘显阳等,2012)。然而随着盆地西缘三维地震勘探的开展,发现西缘大、小断裂较为发育,断裂对油气的运移、聚集具有控制作用(邵晓州等,2022)。前人对盆地西缘断裂的研究主要为断裂的发育特征、空间展布、活动时期、成因及裂缝与油藏分布的关系等(邓虎成等,2009;郭凯等,2013;马海勇等,2016;高金栋等,2018;张园园等,2021;唐大卿等,2023;叶慧等,2023;李明瑞等,2023b;梁承春等,2024;王启超等,2024;何发岐等,2024;尹帅等,2024),也有少数学者对油气成藏期次与裂缝形成期次的关系进行了研究(邵晓州等,2022;郭惠,2022;肖正录等,2023),一致认为是喜马拉雅期构造运动造成了天环坳陷油气的现今分布格局。裂缝形成期次与油气

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:42072185、42002176)的成果。

收稿日期:2024-06-25;改回日期:2024-09-05;网络首发:2024-09-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.09.031

作者简介:刘孝锐,男,1999 年生,硕士,主要从事油气成藏和油气地球化学研究;Email: 2767326029@qq.com。通讯作者:路俊刚,男,1980 年生,教授,博士生导师,主要从事油气地球化学和非常规油气地质研究;Email: lujungang21@sohu.com。

成藏期次的对应关系,决定了油藏的充注程度和展布范围(肖正录等,2023),前期研究虽具有一定的指示意义,但是对于盆地发育的各走向断层的形成时间存在分歧,特别是对于盆地西缘发育的北东东—南西西向断层的形成时间。部分学者认为盆地西缘发育的北东东—南西西向断层与盆地其他地区一样皆形成于喜马拉雅期,即与烃源岩生排烃期不一致,而是对油气的次生调整起作用,如:王启宇等(2011)研究了姬塬地区延长组裂缝发育特征及成因,认为喜马拉雅期形成北东向裂缝;曾联波等(2007)根据露头、岩芯以及实验资料,分析了盆地西南部陇东地区中—上三叠统延长组北东—南西向裂缝特征及成因,认为其主要在白垩纪末期—古近纪形成;邵晓州等(2021,2022)利用岩芯、成像测井、碳氧同位素、岩石声发射以及方解石 U-Pb 同位素测年等资料,分析了盆地西北部盐池地区中生界断裂特征及形成其次,认为盐池地区北东东向断裂形成于喜马拉雅期。但也有学者认为北东东—南西西向断层形成于燕山期,如:梁晓伟等(2009)研究了姬塬地区延长组构造裂缝特征,认为该地区北东—南西向构造裂缝主要形成于燕山运动期主幕;邓虎成等(2009)对麻黄山西区块延长组裂缝成因及期次进行研究,认为该区裂缝形成期次为两期,分别对应于燕山运动二幕和三幕。肖正录等(2023)以上畛子—转角地区延长组裂缝为研究对象,分析了裂缝形成期次与油藏分布关系,认为北东东—南西西向裂缝主要形成于燕山运动期二幕与三幕。因此,天环坳陷西缘油气的来源和富集规模还难以确定。天环坳陷西缘紧邻物源区,砂体规模较盆地中部大,侧向输导能力较强;靠近西缘隆起带断裂发育,断裂与叠置砂体可以构成原油的有效运移通道,原油被垂向调整的可能性较大(肖正录等,2023)。因此,确定断裂的形成时间与油气充注时间的匹配关系对天环坳陷西缘油气勘探显得格外重要。

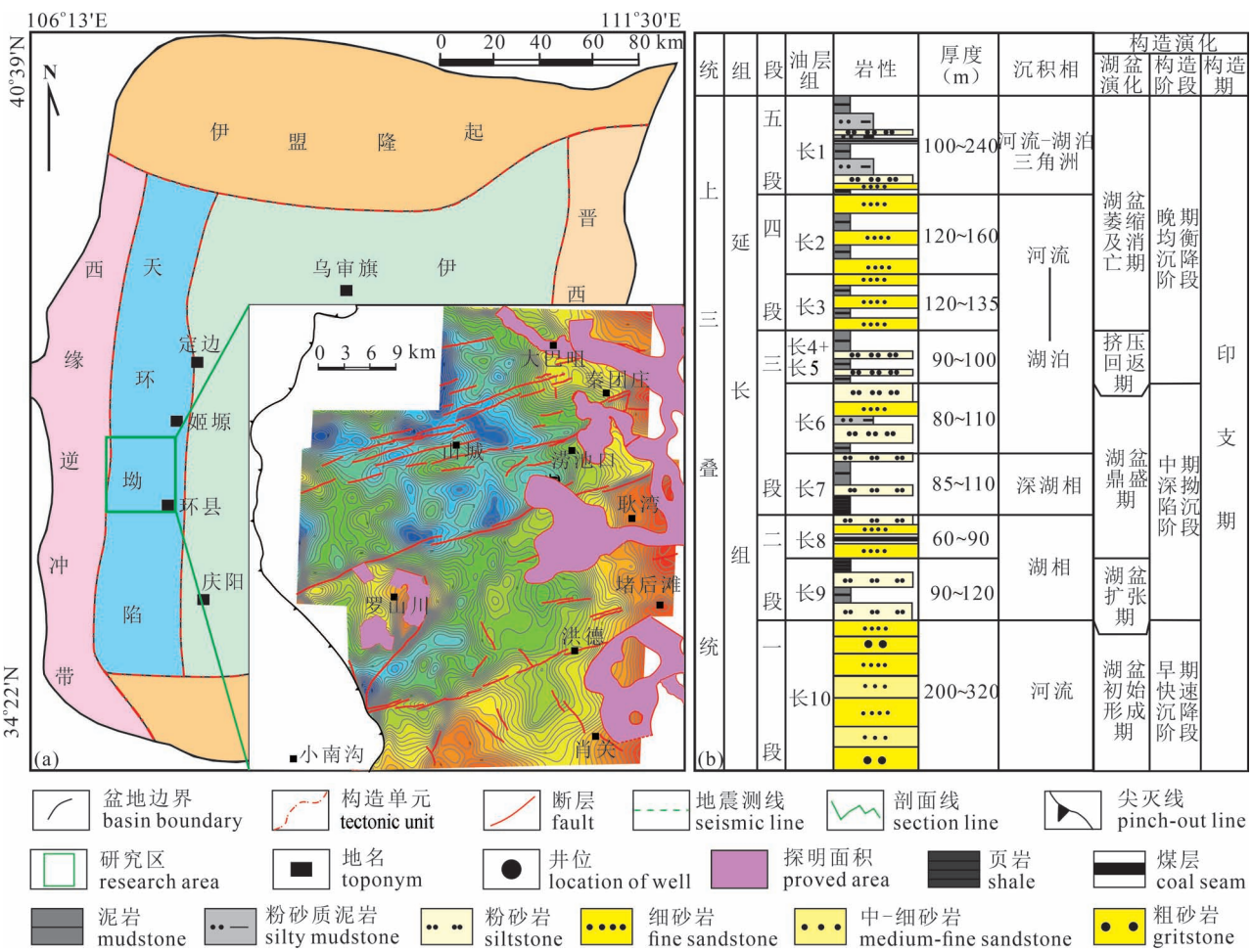


图 1 鄂尔多斯盆地西部洪德地区构造位置(a)及其中—上三叠统延长组地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Structural location (a) of Hongde area in western Ordos Basin and its comprehensive column of Middle—Upper Triassic Yanchang Formation (b)

笔者等以天环坳陷中段的洪德地区延长组为研究对象,借助岩芯观察、成像测井、裂缝充填物碳—氧同位素以及 U-Pb 同位素定年,并结合区域构造应力和断裂活动背景,对该区延长组构造裂缝特征、断裂形成期次展开研究,并探讨断裂对长 8 油层组(延长组长 8 油层组,图 1)原油富集的控制作用,以期深化该地区油气成藏规律认识,为接下来的勘探部署提供指导依据。

1　区域地质背景

鄂尔多斯盆地为大型多旋回克拉通盆地,整体稳定沉降、坳陷迁移、构造相对简单,可划分为伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、伊陕斜坡、天环坳陷及西缘冲断带 6 个一级构造单元(杨俊杰,2002;邵晓州等,2022)(图 1a)。盆地中生界有中—上三叠统延长组和侏罗系延安组两套主力含油层系(惠潇等,2019)。洪德地区位于盆地西缘,构造位于天环坳陷腹部,紧邻西缘逆冲带,主要发育北东东—南西西向走滑断裂带,北西—南东向断裂发育较少,构造复杂,整体表现出东部以及南部构造位置相对较高,

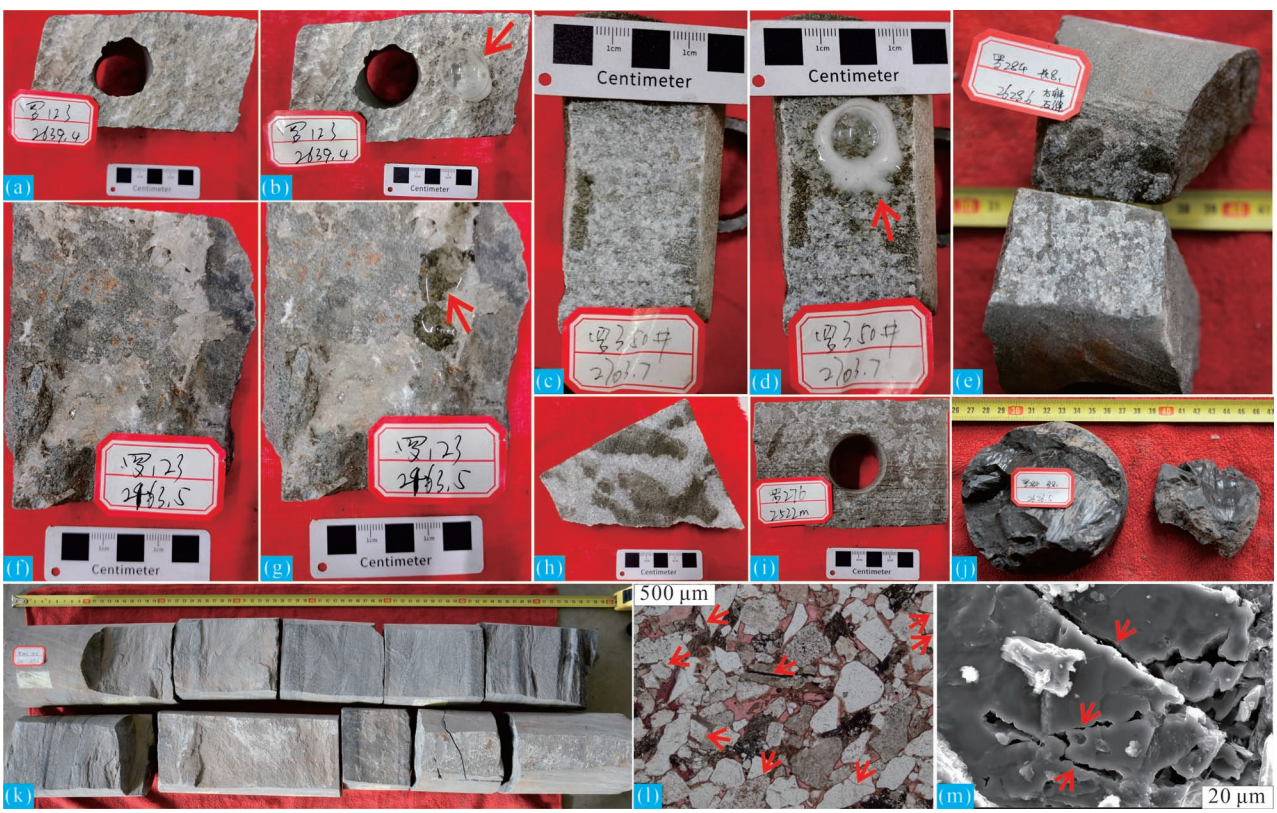


图 2 鄂尔多斯盆地西部洪德地区延长组长 6 油层组—长 8 油层组岩芯裂缝特征

Fig. 2 Core fracture characteristics of the Chang-6 Oil Layer—Chang-8 Oil Layer, Yanchang Formation, in Hongde area, western Ordos Basin

(a)(b)罗 123 井,长 7 油层组,2639.4 m,裂缝方解石全充填,滴稀盐酸剧烈起泡,油斑;(c)(d)罗 350 井,长 8 油层组,2703.7 m,裂缝方解石全充填,滴稀盐酸剧烈起泡,油斑;(e)罗 284 井,长 8 油层组,2628.6 m,裂缝方解石全充填,油迹;(f)(g)罗 123 井,长 6 油层组,2463.5 m,裂缝石英半充填,滴稀盐酸不起泡,油迹;(h)巴 203 井,长 8 油层组,2813 m,裂缝方解石半充填,见明显油气运移痕迹;(i)罗 276 井,长 6 油层组,2522 m,裂缝方解石半充填,油浸;(j)罗 284 井,长 8 油层组,2626.5 m,泥岩摩擦镜面;(k)罗 343 井,长 8 油层组,2718.1~2719.6 m,裂缝未充填;(l)虎 6 井,长 8 油层组,3006.98 m,铸体薄片,微裂缝切穿石英颗粒;(m)巴 108 井,长 8 油层组,2735.91 m,扫描电镜,微裂缝

(a) (b) The Well Luo-123, Chang-7 Oil Layer, 2639.4 m, fracture full calcite filling, drops of diluted hydrochloric acid severe blistering, oil spots; (c) (d) the Well Luo-350, Chang-8 Oil Layer, 2703.7 m, fracture full calcite filling, dripping hydrochloric acid severe blistering, oil spots; (e) the Well Luo-284, Chang-8 Oil Layer, 2628.6 m, full calcite filling fracture, oil stain; (f) (g) the Well Luo-123, Chang-6 Oil Layer, 2463.5 m, cracked quartz half-filled, dripping hydrochloric acid without foaming, oil stains; (h) the Well Ba-203, Chang-8 Oil Layer, 2813 m, fracture half-filled with calcite, showing obvious traces of oil and gas migration; (i) the Well Luo 276, Chang-6 Oil Layer, 2522 m, fracture half-filled with calcite and oil immersed; (j) the Well Luo-284, Chang-8 Oil Layer, 2626.5 m, mudstone friction mirror; (k) the Well Luo-343, Chang-8 Oil Layer, 2718.1~2719.6 m, fracture not filled; (l) the Well Hu-6, Chang-8 Oil Layer, 3006.98 m, thin slices of cast body, micro-cracks cut through quartz particles; (m) the Well Ba-108, Chang-8 Oil Layer, 2735.91 m, SEM, microfracture

西部构造位置较低,但是西部罗山川地区处于构造隆起状态(图 1a)。研究范围北至大巴咀,南至肖关,西到罗山川,东达堵后滩,勘探面积约为 1800 km^2。鄂尔多斯盆地三叠系延长组自下而上划分为 10 个油层组,研究区地层普遍受到不同程度剥蚀,靠近西缘逆冲带部分井甚至缺失长 8—长 1 油层组(图 1b)。相较于湖盆中部,研究区具有烃源岩生烃能力差、构造活动更为频繁、断裂与裂缝较发育、砂体连通性强和储层物性较好的特征。洪德地区长 7 烃源岩厚度较小,小于 20 m,平均 *TOC* 为 2.74%,长 8 油层组油层组孔隙度主要分布范围为 10%~20%,渗透率分布范围较大,长 8_1 油层亚组介于(0.1~10)×10^{-3}μm^2,长 8_2 油层亚组介于(1~200)×10^{-3}μm^2。目前研究区的勘探成果显示(图 1a),研究区东部的秦团庄—耿湾—肖关一带油藏大面积连片分布,研究区西部的罗山川地区油藏小面积点状分布,勘探潜力不明。

2 裂缝发育特征

构造裂缝的发育特征对油气分布和产能的高低具有控制作用(曾联波等,2007;周新桂等,2007)。笔者等以洪德地区延长组 32 口岩芯观察井(图 2),并结合收集的 11 口井成像测井资料为依据,对构造裂缝特征、产状以及平面分布特征展开研究。

2.1 岩芯裂缝特征

岩芯观察是对宏观裂缝进行观测与描述的第一手资料(赵希等,2021)。从 32 口取芯井的岩芯中普遍可见不同特征的裂缝。裂缝主要在泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩(含钙质)中较发育,在泥岩中裂缝较少,泥岩多表现出摩擦镜面,在中—粗砂岩中多表现出破碎带,裂缝集中在延长组下组合,上组合裂缝较少(图 2a—k)。构造裂缝根据应力背景分为剪性裂缝和张性裂缝(邵晓州等,2021),研究区以剪切裂缝为主,成组出现,雁列状分布,延伸较远,裂缝面平直光滑。岩芯裂缝主要发育垂直裂缝和高角度裂缝,低角度、水平裂缝不发育。裂缝延伸长度不一,最短为 2 cm,最长可达 1.5 m(图 2k)。裂缝部分充填方解石脉体,少部分充填石英(图 2a—k),脉体宽度可达 5 cm,长度可达 1 m。裂缝面和部分脉体中可见油迹、油斑及油浸等明显过油痕迹,表明裂缝曾经是石油的运移通道。微观裂缝指只能用显微镜观察到的裂缝,微观裂缝可以在颗粒内部、相邻颗粒之间和多个颗粒之间形成,即粒内缝、粒缘缝以及穿粒缝 3 类(吕文雅等,2020)。通过对研究区延长组镜下微观特征观察(图 2l,m),研究区微裂缝较发育,以穿粒缝为主。

2.2 裂缝产状

成像测井可有效揭示裂缝类型、产状以及充填程度等相关信息(陈翠雀等,2009;吕文雅等,2021)。由于泥浆侵入未充填裂缝中,导致裂缝的电阻率较围岩明显偏小,在成像图上表现为暗色的条纹,因此利用电成像资料对裂缝进行识别是较有效的方法。有的裂缝被高电阻率矿物部分或全部充填,图像上表现为不连续的亮色正弦曲线,以亮色为主(邵晓州等,2021)。根据研究区 11 口成像测井资料解释对裂缝产状分析,研究区共发育 3 组裂缝,包括北东东—南西西向、近东西向以及北西—南东向,其中裂缝走向以北东东—南西西向占绝对优势

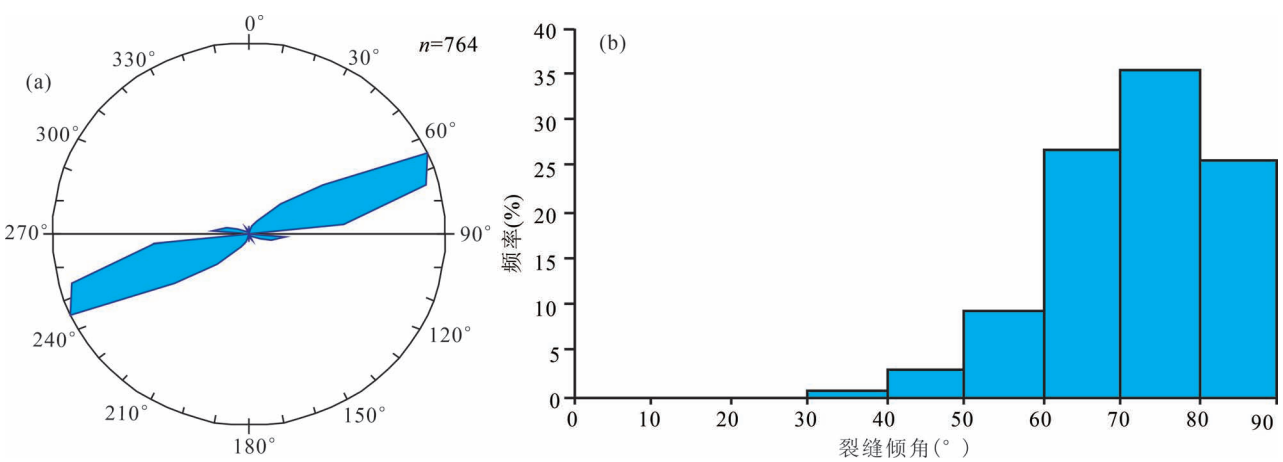


图 3 鄂尔多斯盆地西部洪德地区延长组长 6—长 8 油层组裂缝走向玫瑰花图(a)及倾角分布(b)

Fig. 3 Rose chart (a) and dip distribution (b) of fracture strike of the Chang-6 Oil Layer—Chang-8 Oil Layer, Yanchang Formation in Hongde area, western Ordos Basin

(图 3a、图 4)。对钻井岩芯裂缝产状的测量及成像测井资料裂缝倾角的解释表明,研究区延长组长 6—长 8 油层组裂缝倾角分布范围主要为 60°~90°,根据王允诚的裂缝倾角分类方案(王允诚等,1992),认为研究区裂缝以垂直裂缝(60%)和高角度斜交裂缝(39%)为主,低角度斜交缝和水平裂缝基本不发育(图 3b)。

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(郭惠等,2023)。通过对 11 口单井长 6—长 8 油层组裂缝走向以及裂缝线密度进行统计,并绘制单井裂缝走向、裂缝线密度与断裂叠合图(图 4)。裂缝走向与断裂的方向整体上表现出较好的一致性,特别是在研究区的东部,如 NEE、NE 向裂缝与 NE 向断裂方向一致(罗 86 井、罗 74 井、罗 78 井、罗 233 井、罗 85 井、木 120 井、虎 251 井);NW 向裂缝与 NW 向断裂方向一致(虎 258 井);虎 28 单井裂缝走向受控于附近的 NE、NW 向两条断裂影响,其裂缝走向不存在单一走向的绝对优势,这也同样表明裂缝与断裂存在多期性。裂缝主体走向与 NE 向断裂方向一致或微角度斜交,NEE、NE 向裂缝与 NE 向断裂可能具有同期性,这是由于断裂通过控制其附近局部构造应力的分布来影响裂缝的分布(曾联波等,1999;邓虎成等,2009)。

由长 6—长 8 油层组裂缝密度分布(图 4)可知,裂缝发育程度较高的区域都集中在研究区东部,即天环坳陷轴部以东地区,天环坳陷轴部以西地区(研究区西部)裂缝发育程度明显减弱,研究区北部地区裂缝发育程度整体高于南部地区。整体上裂缝高密度区沿 NE 向断裂展布,NE 向断裂对裂缝的影响可能更强。天环坳陷轴部以西地区裂缝发育程度较低原因可能是位于 NE 向断裂和近 SN 向断裂交会处,且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(郭惠等,2023),从而导致虎 251 井、虎 256 井、虎 258 井裂缝发育程度较低。

3　裂缝形成期次

明确储层中构造裂缝的形成期次与时间,对于研究油气的形成和聚集成藏有重要意义(唐永等,

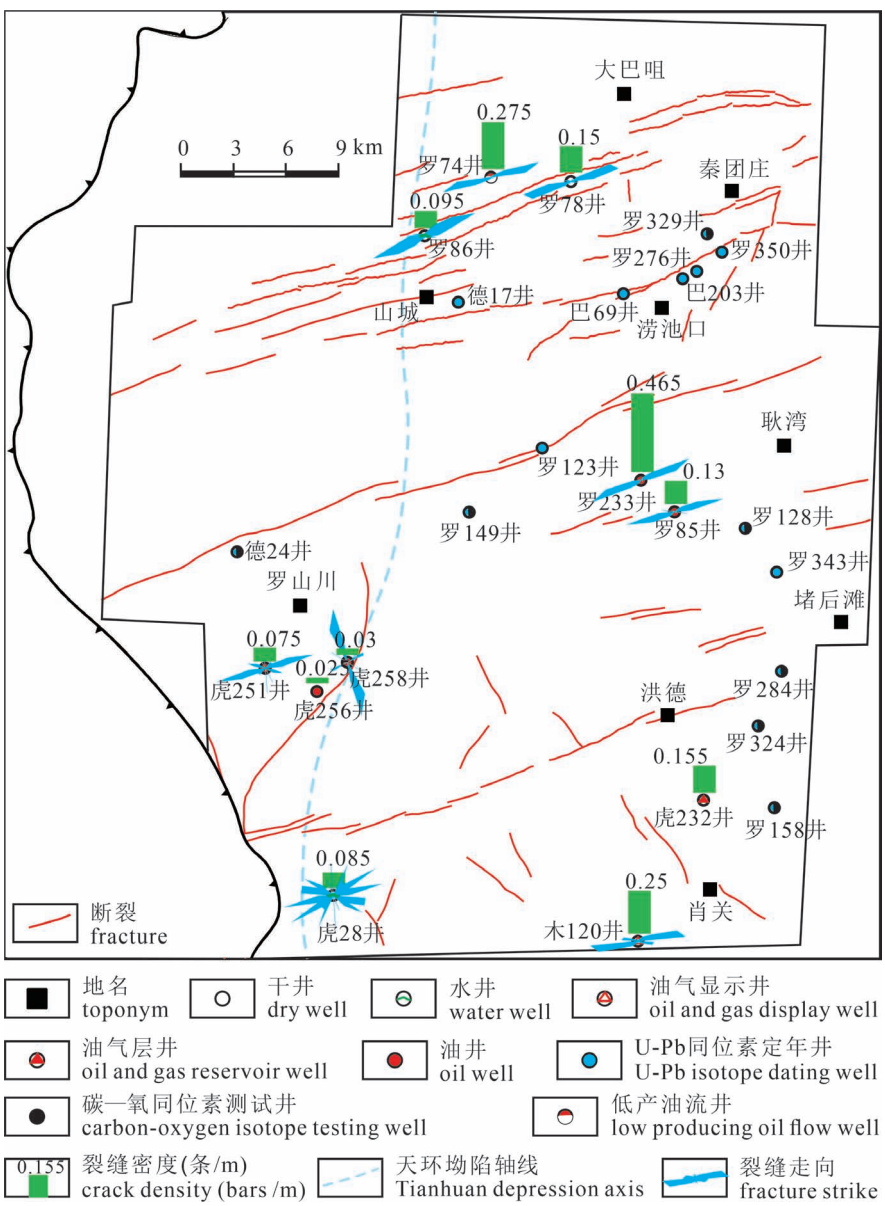


图 4 鄂尔多斯盆地西部洪德地区延长组长 6 油层组—长 8 油层组裂缝平面展布及其与断裂关系

Fig. 4 Fracture plane distribution of the Chang-6~Chang-8 Oil Layer, Yanchang Formation, and its relationship with the fault in Hongde area, western Ordos Basin

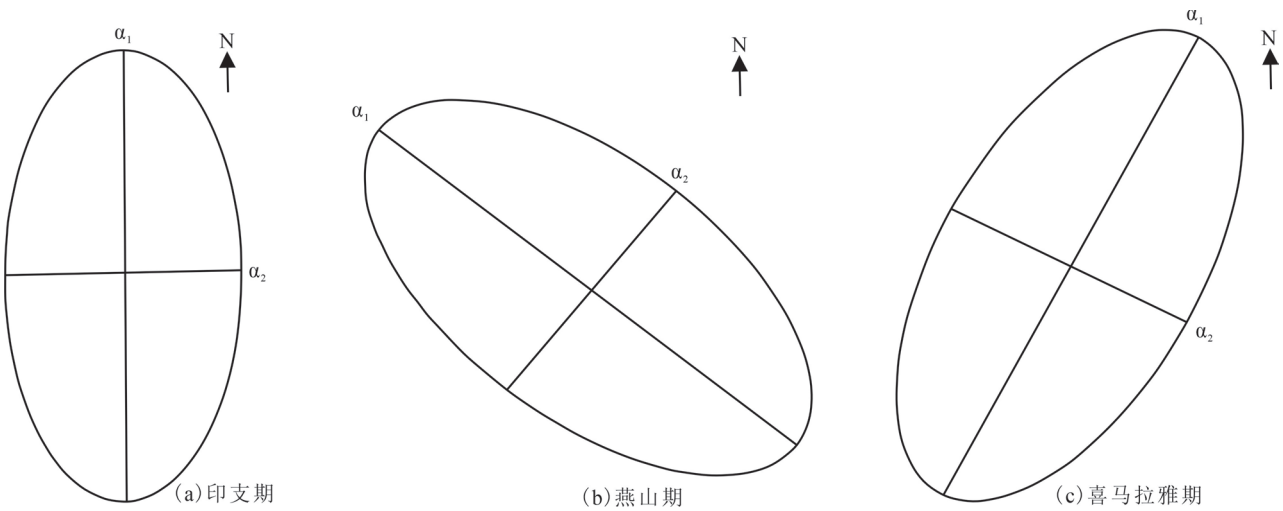


图 5 鄂尔多斯盆地不同构造运动时期应力分布(据邵晓州等,2021 修改)

Fig. 5 Stress distribution in different tectonic periods in the Ordos Basin (modified from Shao Xiaozhou et al., 2021&)

2018;邵晓州等,2021)。本文结合区域地质构造应力、裂缝面方解石碳—氧同位素分析以及方解石 U-Pb 同位素定年确定研究区裂缝形成时间。

3.1 裂缝走向与构造应力场、储层非均质性的关系

前人研究认为,盆地西部中、新生代主要存在三期构造应力(图 5):印支运动期为近南北向;燕山运动期为北西—南东向(西北缘)和南西—北东(研究区);喜马拉雅运动期为北东—南西向(徐黎明等,2006;赵红格等,2007;郭惠等,2024)。但裂缝走向不仅仅只受控于区域构造应力场,也与储层非均质性和沉积相有关(王瑞飞等,2009;马海勇等,2016)。前人对邻区(姬塬地区、樊学油区、定边—吴起地区)延长组裂缝形成期次分析认为姬塬地区存在两组裂缝,走向分别为 NW—SE 向以及 NE—SW 向,形成时间为燕山期构造运动主幕(梁晓伟等,2009);樊学油区燕山运动晚期使得 NE 向基底断裂被激活,延长组大量发育 NEE 和 NS 向裂缝,喜山运动导致 NS 向基底断裂重新活动,形成 NNW 和 NE 向裂缝(赵希等,2021);定边—吴起地区主要发育近东西向和北东—南西两组裂缝,受控于区域构造应力场与储层非均质性的影响,定边—吴起地区受西北和东北两套物源控制,西北向展布砂体的非均质性抑制了北西—南东、南—北向裂缝发育程度,东北向展布砂体的非均质性抑制了北西—南东向裂缝,认为燕山期发育近东西向和北东—南西向剪切

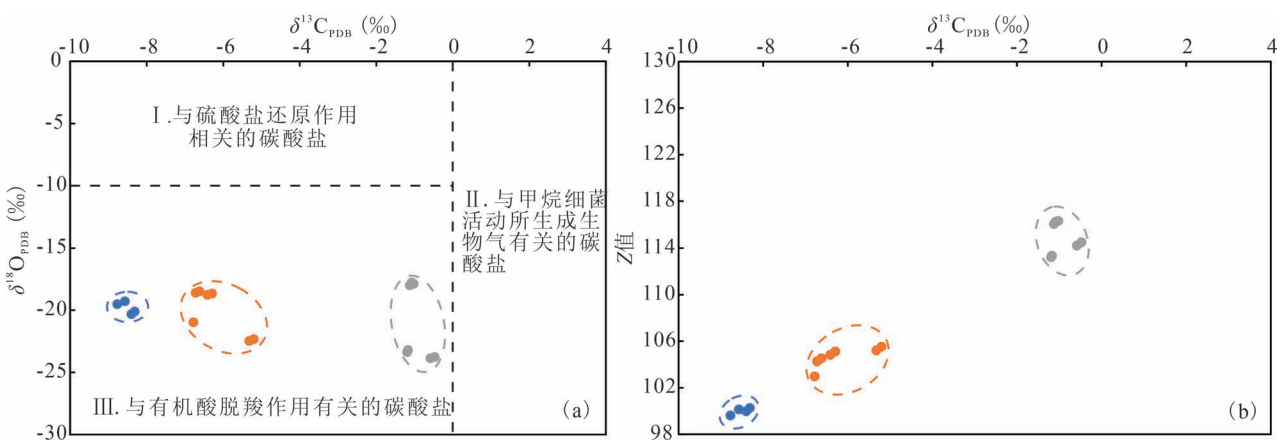


图 6 鄂尔多斯盆地洪德地区裂缝充填方解石脉碳—氧同位素分布图(a)以及 Z 值分布图(b)(底图据郭凯等,2013;郭惠,2022)

Fig. 6 Carbon—oxygen isotope distribution map (a) and Z-value distribution map (b) of fracture-filled calcite veins in Hongde area, Ordos Basin (base map based on Guo Kai et al., 2013&; Guo Hui, 2022&)

裂缝,喜山期发育北西—南东、南—北向剪切裂缝(马海勇等,2016)。声电成像测井资料解释显示研究区延长组共发育三组裂缝,分别为北东东—南西西向、近东西向以及北西—南东向(图 3a、图 4)。研究区主要发育西北和西南向两套沉积物源。综合前人研究认识与研究区裂缝走向,认为洪德地区延长组裂缝主要形成于燕山运动期。

3.2　裂缝面方解石碳—氧同位素与裂缝形成时间

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(邓虎成等,2009;郭凯等,2013;王翠丽等,2014;姜琳等,2017;邵晓州等,2021)。选取研究区 18 个岩芯裂缝面充填的方解石,进行碳—氧稳定同位素测试分析。根据碳、氧同位素值的大小和分布情况,可将样品分为 3 个区(图 6a),反映出裂缝形成时期主要有 3 期。根据 Shackleton 等(2004)提出的较为成熟的氧测温方程式(公式 1),可计算出裂缝形成温度 T 值,再利用温度与埋深公式折算(姜琳等,2017),计算出裂缝形成时的埋深,然后结合研究区埋藏史与热演化史,探讨裂缝形成期次。同时,根据 Keith 等提出的碳—氧同位素区分海相和淡水相碳酸盐岩经验公式(公式 2)计算缝面方解石形成时的古盐度 Z 值,从而划分胶结物类型(Keith et al., 1964)。

$$t/℃ = 16.9 - 4.38\ (\delta^{18}O/‰ - \delta^{18}O_w/‰) + 0.1\ (\delta^{18}O/‰ - \delta^{18}O_w/‰)^2 \quad (1)$$

$$Z = 2.048\ (\delta^{13}C/‰ + 50) + 0.498\ (\delta^{18}O/‰ + 50) \quad (2)$$

式中:$\delta^{18}O$ 为所测样品的氧同位素;$\delta^{13}C$ 为所测样品的碳同位素;$\delta^{18}O_w$ 为地层水介质的氧同位素值。

古盐度值,能够大致判断碳酸盐岩胶结物形成时的孔隙水性质。当 Z>120 时,反映成岩水介质为海水来源;当 Z<120 时,反映成岩水介质为淡水来源(李阳等,2018)。根据 Z 值计算结果和 Z 值分布图可以看出(图 6b),所有样品的 Z 值均小于 120,表现出 3 期裂缝特征。其中有一期裂缝 Z 值接近于 120,说明该期裂缝胶结物形成于淡水—微咸水环境。

洪德地区延长组属于湖泊—河流相沉积体系,属于淡水环境,地层水介质的氧同位素值一般为-2.5‰(李阳等,2018)。根据氧测温方程式计算出 3 期裂缝的形成温度分别为 115.39℃、139.83℃ 和 153.55℃。取古地表平均温度 25℃,古地温梯度平均值 4.3℃/hm(任战利等,2017),对裂缝形成时的埋深进行折算,得到 3 期裂缝形成时的埋深分别为 2102.09 m、2670.47 m、2989.53 m。结合研究区典型井埋藏史与热演化史(图 7),判断 3 期裂缝形成时期分别为早白垩世中期、早白垩世末期以及晚白垩世早期,构造运动时期处于燕山运动期二幕末以及燕山运动期三幕。

表 1 鄂尔多斯盆地洪德地区延长组裂缝面方解石碳—氧同位素数据

Table 1 Carbon and oxygen isotope data of calcite on fracture surface of Yanchang Formation in Hongde area, Ordos Basin

序号	井名	深度(m)	层位	$\delta^{13}C_{PDB}$ (‰)	$\delta^{18}O_{PDB}$ (‰)
1	德 24	2773.6	长 8_1	-18.67	-6.29
2	德 24	2773.6	长 8_1	-18.61	-6.72
3	德 24	2773.6	长 8_1	-18.77	-6.41
4	罗 329	2785	长 8_2	-20.98	-6.78
5	罗 329	2785	长 8_2	-18.49	-6.62
6	罗 324	2708.05	长 8_1	-18.00	-1.12
7	罗 324	2708.05	长 8_1	-17.77	-1.07
8	罗 324	2708.05	长 8_1	-17.89	-1.02
9	罗 149	2671	长 8_2	-20.32	-8.4
10	罗 149	2671	长 8_2	-20.11	-8.31
11	罗 149	2667	长 8_2	-19.53	-8.77
12	罗 149	2667	长 8_2	-19.30	-8.57
13	罗 158	2607	长 8_1	-22.48	-5.32
14	罗 158	2607	长 8_1	-22.34	-5.2
15	罗 128	2665	长 8_1	-23.88	-0.58
16	罗 128	2665	长 8_1	-23.77	-0.47
17	罗 284	2628.6	长 8_1	-23.39	-1.19
18	罗 284	2628.6	长 8_1	-23.22	-1.17

3.3　裂缝面方解石 U-Pb 同位素定年

断层、裂缝的活动期次的划分和年龄的确定一直都是诸多地质学家争论的热点之一。由于与断层活动伴有的热液流体经过冷却,沿断层、裂缝会生长一些石英脉和方解石脉,并相对完整地记录了断层、裂缝的活动发育史(贾丽,2007;郭惠,2022)。因此,通过测得石英脉或方解石脉的形成年龄,并结合地质年代,就能确定断层活动的时期。石英脉或方解石脉的形成年龄可通过 ESR 或 U-Pb 同位素定年测定(杨帆等,2014;鲁雪松等,2023)。

本次笔者等采集到岩芯裂缝面方解石脉体(18 件)和石英脉体(1 件)(图 4),但由于实验条件限制,只展开方解石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年。经过 LA-ICP-MS 预扫描,有 16 个样品 U 含量非常低,最终有两个样品达到测试分析要求(图 2c、i),对每个样品分别测试激光剥蚀点 70 个。分析结果表明:罗 276 井样品位于研究区北东东向断裂(图

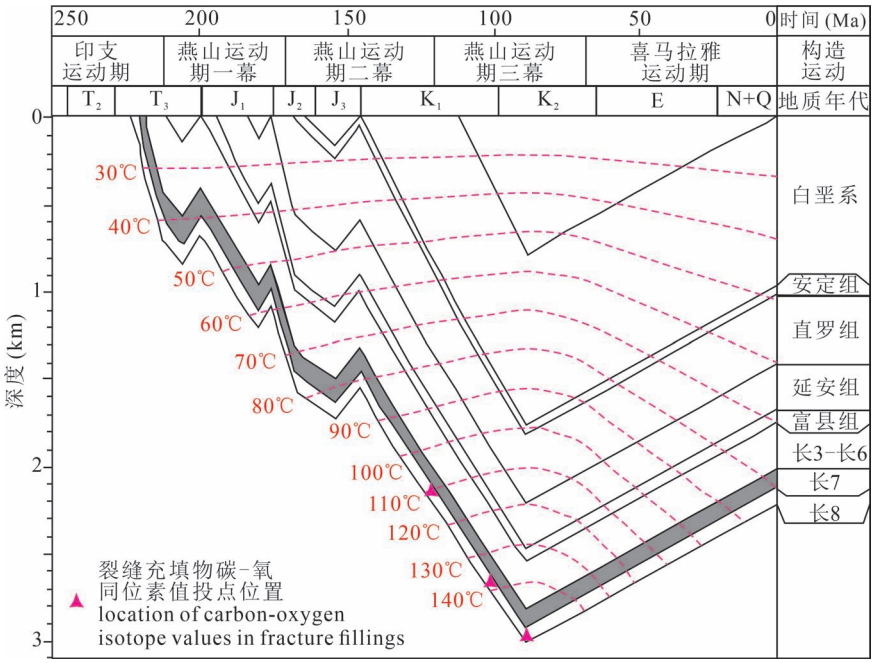


图 7 鄂尔多斯盆地洪德地区裂缝方解石脉形成时期判别图

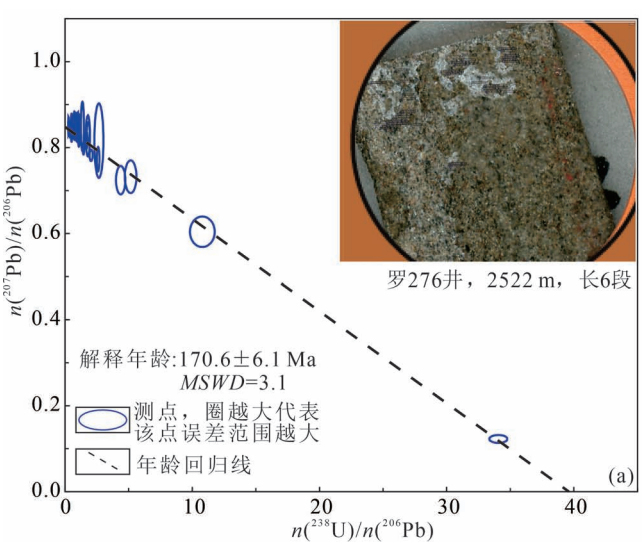
Fig. 7 Discrimination diagram of calcite vein formation period in Hongde area, Ordos Basin

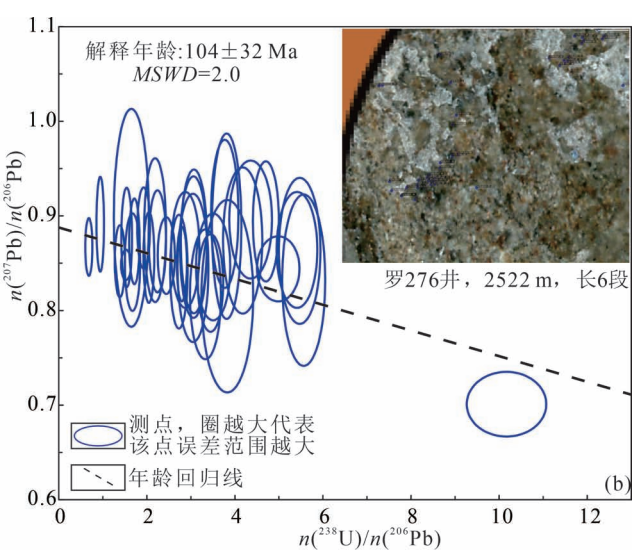
4),层位为延长组长 6 油层组,有两期方解石胶结,测得的 U-Pb 同位素年龄分别是 170.6±6.1 Ma、104±32 Ma(图 8a、b);罗 350 井样品位于研究区北东东向断裂(图 4),层位为延长组长 8 油层组,测得的 U-Pb 同位素年龄为 143±12 Ma(图 8c)。结合研究区典型井埋藏史与热演化史(图 8d),判断研究区北东东向断裂的活动时期主要为中侏罗世和晚侏罗世末—早白垩世末。构造运动时期处于燕山运动期二幕以及燕山运动期三幕,表明北东东向断裂具有多期活动的特点。

4 断裂—裂缝控藏作用

4.1 北东东向断裂横向沟通盆内烃源岩

洪德地区长 7 烃源岩厚度分布范围为 5~35 m,从东至西烃源岩厚度逐渐减薄,在研究区东北部的秦团庄—耿湾一带厚度最大,在山城—罗山川地区基本不发育烃源岩(图 9)。从目前洪德地区的长 8 油藏勘探成果显示(图 9),洪德地区东部的秦团庄—耿湾—肖关一带油藏大面积连片分布,洪德地区西部的罗山川地区油藏小面积点状分布,显示出该区具有巨大的勘探潜力。根据前人对鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组烃源岩的认识(席胜利等,2008),认为长 7 油层组烃源岩在晚侏罗世末期进入生油窗,在早白垩世中—晚期达到生排烃高峰期(窦伟坦等,2008)。上述利用裂缝面方解石 U-Pb 同位素定年对研究区北东东向断裂的活动时期研究显示,该走向断裂的活动时期主要为中侏罗世—早白垩世末。长 7 烃源岩生排烃期与北东东向断裂的活动时期相匹配,该走向断裂可沟通长 7 烃源岩与长 8 储层,良好的断砂输导体系为长 8 石油运移提供了优势通道。虽然研究区在晚侏罗世与晚白垩世的构造形态发生过掀斜(李相博等,2010),但是罗山川地





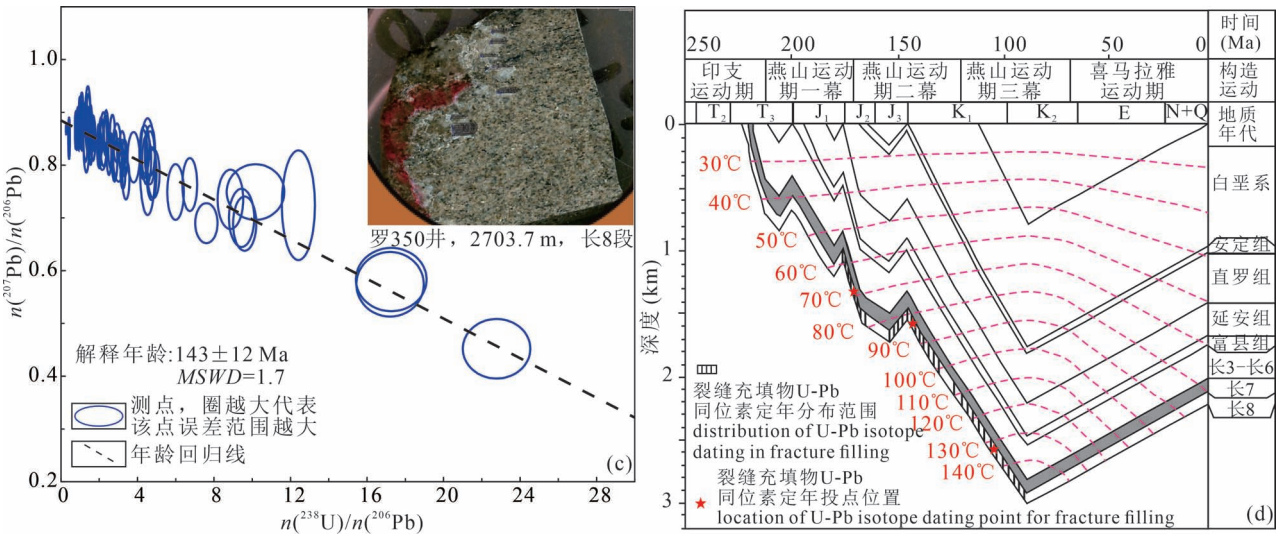


图 8 鄂尔多斯盆地洪德地区裂缝方解石 U-Pb 同位素年龄(a)(b)(c)及断裂活动期判别图(d)

Fig. 8 U-Pb isotopic age (a) (b) (c) and fault activity stage of fracture calcite (d) in Hongde area, Ordos Basin

区一直保持构造隆起状态(图 1a、图 9)。因此,该区块长 8 油藏并未被调整,在 23 口探井中求产获得高产工业油流,其中 3 口井日产油超过百吨。

4.2　裂缝改善储层物性

上述对岩芯裂缝特征研究发现,研究区延长组下组合主要发育垂直裂缝和高角度裂缝,裂缝面和

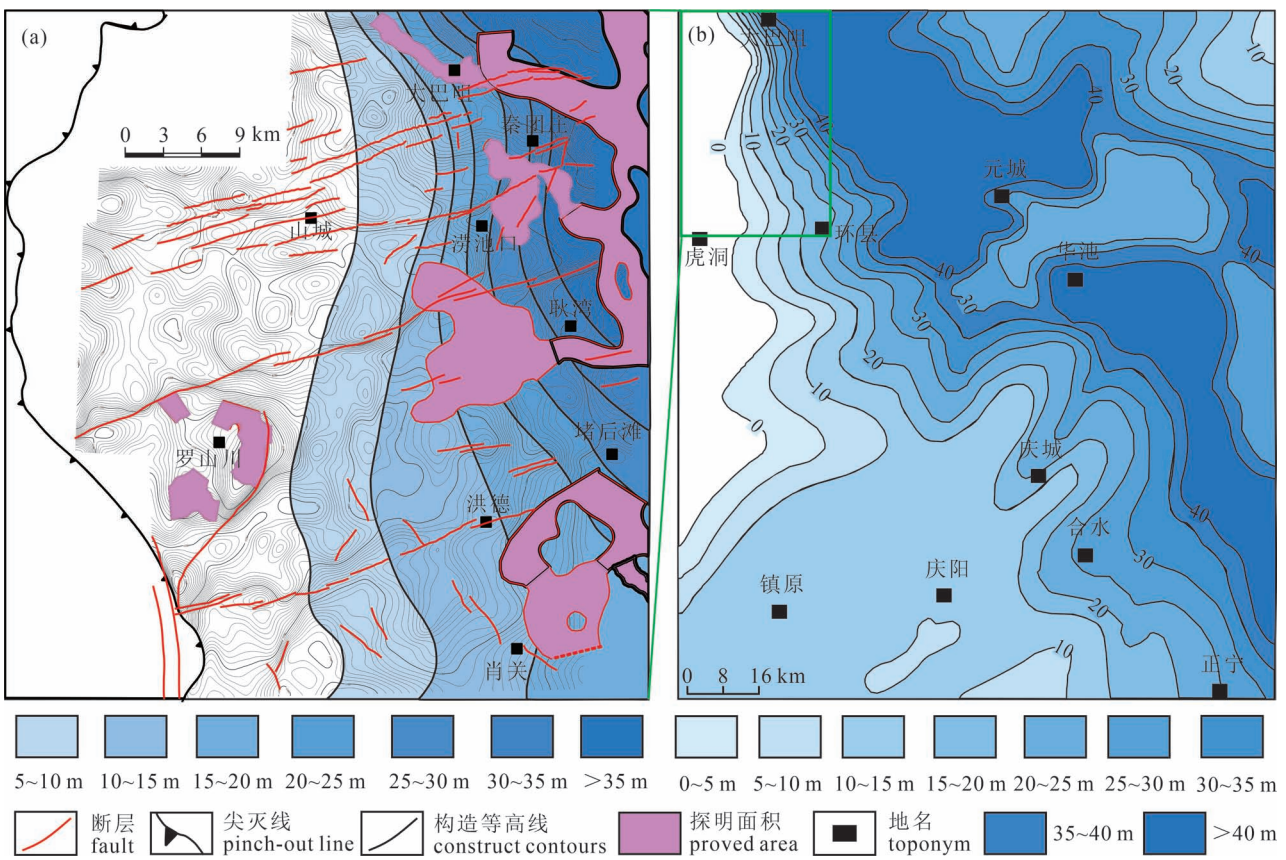


图 9 鄂尔多斯盆地洪德地区断裂—长 7 烃源岩厚度—长 8 顶面构造—长 8 油藏叠合图

Fig. 9 Superposition diagram for fault—source rock thickness of the Chang-7 Oil Layer—top structure of the Chang-8 Oil Layer and oil reservoir of the Chang-8 Oil Layer in Hongde area, Ordos Basin

表 2 鄂尔多斯盆地洪德地区巴 20、虎 256 井长 8 单砂体物性、裂缝密度与解释结论统计表

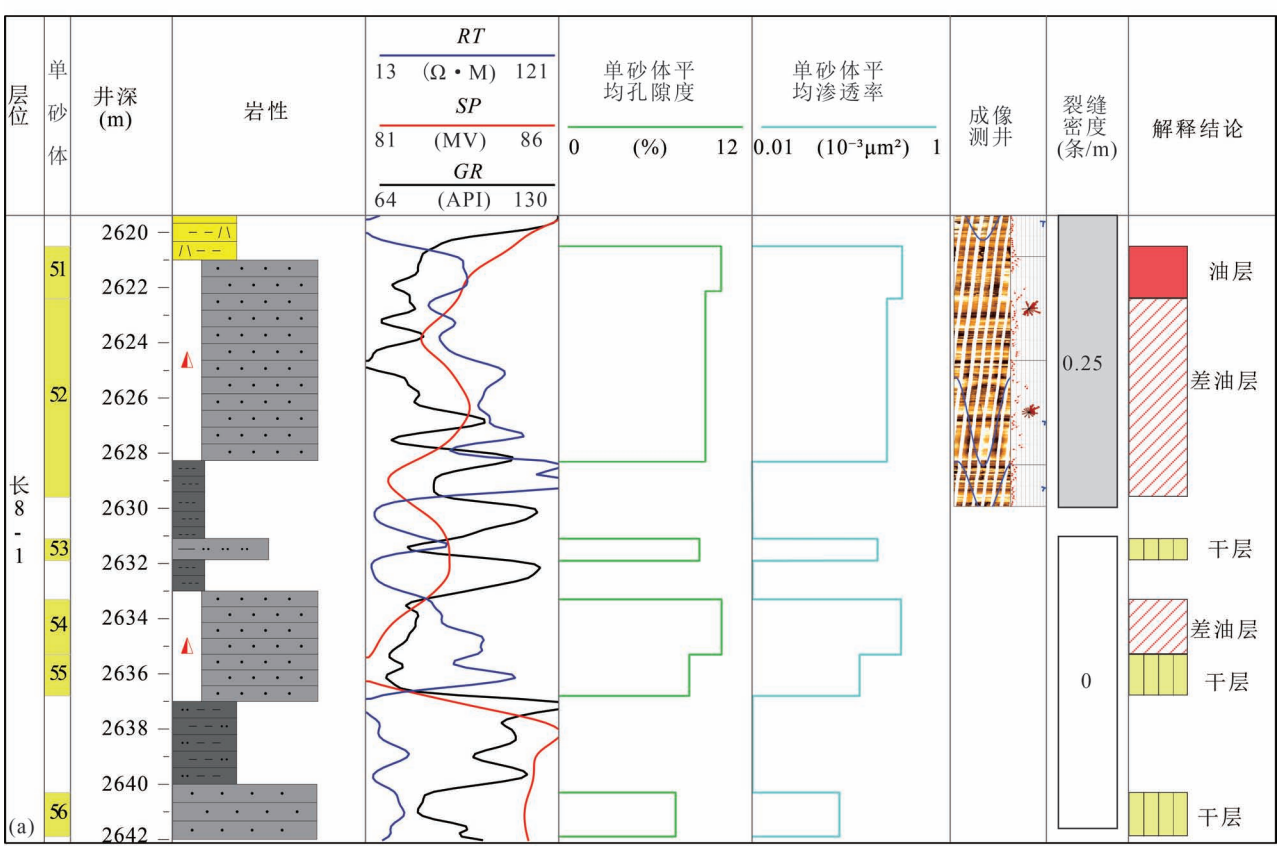
Table 2 Statistical table of physical properties, fracture density and interpretation conclusions of single sand body in the Chang-8 Oil Layer in the Wells Ba-20 and Hu-256 in Hongde area, Ordos Basin

井位	层位	砂体编号	平均孔隙度（%）	平均渗透率（$\times10^{-3}$ μm²）	裂缝密度（条/m）	解释结论
巴20井	长 8_1	51	10.1	0.36	0.25	油层
		52	9.12	0.25		差油层
		53	8.86	0.2	0	干层
		54	10.13	0.35		差油层
		55	8.11	0.13		干层
		56	7.26	0.08		干层
虎256井	长 8_1	93	9.97	0.35	0	水层
	长 8_2	94	11.69	0.65		水层
		95	10.48	0.52		水层
		96	11.92	0.72		干层
		97	14.82	1.85		干层
		98	17.6	4.06	0.26	油层
		99	17.4	3.84	0.13	油层
		100	15.47	2.33	0	油水同层

部分脉体中可见油迹、油斑及油浸等明显过油痕迹，表明裂缝曾经是石油的运移通道。通过对巴 20 井、虎 256 井长 8 裂缝发育段与不发育段单砂体物性分析可知，裂缝发育段单砂体孔、渗比裂缝不发育段明显提高，特别是渗透率有明显增加（表 2）。如巴 20 井长 8_1 亚油层组（图 10a），2631.1～2641.9 m 井段裂缝不发育，平均孔、渗为 8.59%、0.19×10^{-3} μm²，属于低渗透储层，解释结论为干层与差油层。而与其相邻的 51、52 号单砂体共发育 3 条裂缝，裂缝密度为 0.25 条/m，平均孔、渗为 9.61%、0.305×10^{-3} μm²，解释结论为油层与差油层。又如虎 256 井长 8 油层组（图 10a），2812.00～2863.20 m 井段裂缝不发育，平均孔、渗为 11.776%、0.818×10^{-3} μm²，解释结论为水层与干层，而与其相邻的 98 号单砂体发育 2 条裂缝、99 号单砂体发育 1 条裂缝，裂缝密度分别为 0.26 条/m、0.13 条/m，平均孔、渗分别为 17.6%、4.06×10^{-3} μm² 与 17.4%、3.84×10^{-3} μm²，解释结论均为油层。由此可见，裂缝的发育改善了低渗透储层的性能，促进了油气在裂缝型砂体中运聚成藏。

4.3 断裂活动与油气成藏关系

油气充入储层的时间可以根据与烃类包裹体相关的盐水包裹体的均一化温度与盆地模拟结果来综合判断（刘润川等，2019，杨易卓等，2023）。研究



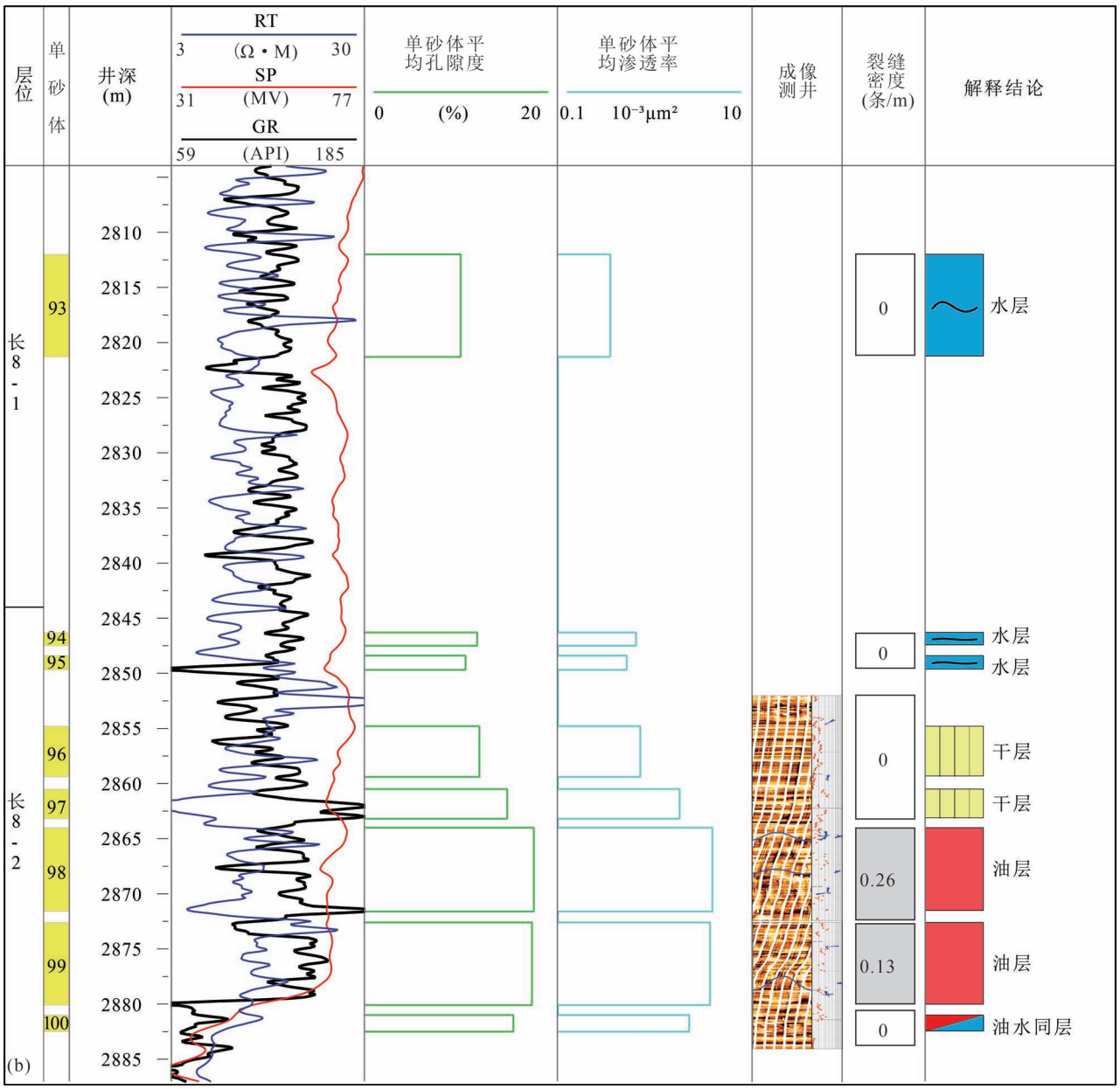


图 10 鄂尔多斯盆地洪德地区巴 20 井(a)、虎 256 井(b)长 8 油层组裂缝综合评价图

Fig. 10 Comprehensive fracture evaluation diagram for the Chang-8 Oil Layer in the Well Ba-20 (a) and the Well Hu-256 (b) in Hongde area, Ordos Basin

区长 8 储层中与烃类包裹体相关的盐水包裹体均一化温度分布于 80~140℃,存在 90~100℃和 120~130℃两个主要的峰值区间(图 11a),说明研究区长 8 储层在持续充注的大背景下,至少经历了两次主要的油气充注过程。通过联合典型井埋藏史与热演化史(图 11b),发现第一期油气充注发生在早白垩世早期,构造运动时期对应于燕山运动二幕晚期;第二期油气充注发生在早白垩世末期,构造运动时期对应于燕山运动三幕早期。上述利用裂缝面方解石碳—氧同位素以及 U-Pb 同位素定年对研究区裂缝形成期次以及北东东向断裂的活动时期进行研究,认为裂缝形成时期主要为早白垩世以及晚白垩世早期,北东东向断裂的活动时期主要为中侏罗世以及晚侏罗世末—早白垩世末(图 11b)。结合长 8 油气成藏期与断裂活动期可知,断裂活动时期与油气成藏时期相匹配,起到沟通油源和运移通道的作用(图 11b)。

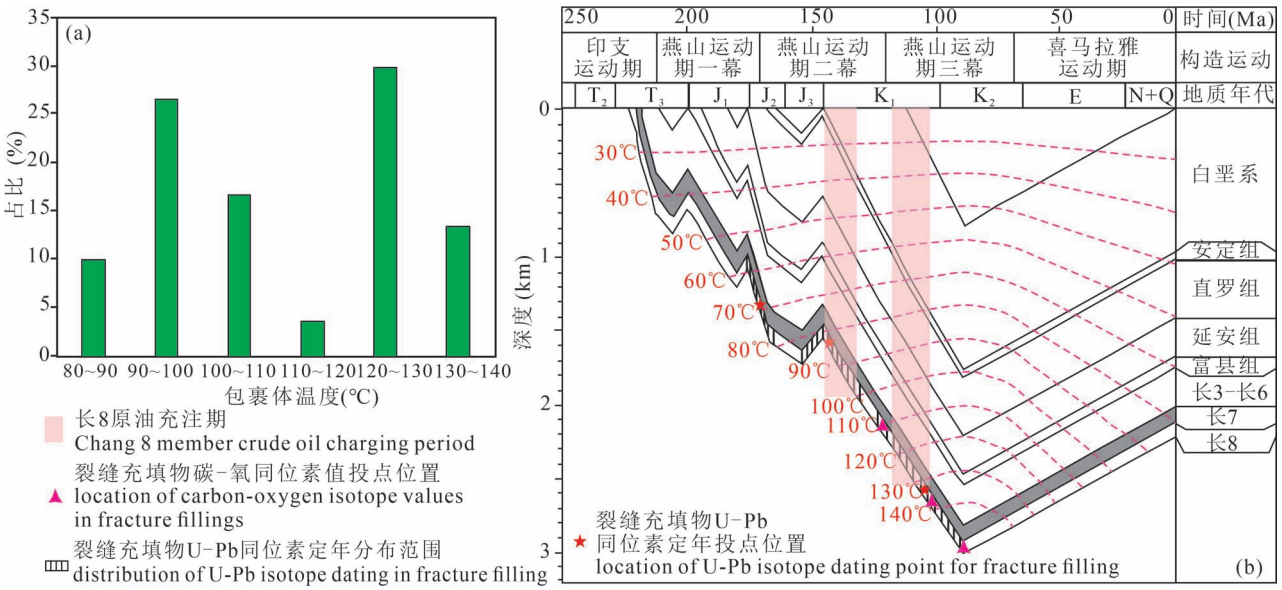


图 11 鄂尔多斯盆地洪德地区长 8 原油充注期次:(a) 烃类伴生盐水包裹体均一化温度频率直方图;(b) 研究区典型井埋藏史与热演化史)

Fig. 11 Crude oil charging period of the Chang-8 Oil Layer in Hongde area, Ordos Basin: (a) homogenization temperature and frequency histograms of hydrocarbon associated brine inclusions; (b) burial history and thermal evolution history of the typical wells in study area

5 结论

(1)洪德地区裂缝多集中在延长组下组合,上组合裂缝较少;裂缝类型以剪切裂缝为主;主要发育垂直裂缝和高角度裂缝;裂缝部分充填方解石脉体,少部分充填石英;裂缝面平直光滑,可见油迹、油斑及油浸等明显过油痕迹;微观裂缝以穿粒缝为主;裂缝走向以北东东—南西西向占绝对优势,少量近东西向以及北西—南东向。

(2)岩芯观察、成像测井、区域地质构造应力、裂缝面方解石碳—氧同位素以及裂缝面方解石 U-Pb 同位素定年等综合表明,洪德地区主要发育三期裂缝,形成时期分别为早白垩世中期、早白垩世末期以及晚白垩世早期;北东东向断裂的活动时期主要为中侏罗世以及晚侏罗世末—早白垩世末;构造运动时期均处于燕山运动期二幕以及燕山运动期三幕。

(3)延长组裂缝的发育改善了低渗透储层的性能,促进了油气在裂缝型砂体中运聚成藏;北东东向断裂以及裂缝的活动时期与长 7 烃源岩生排烃期、长 8 油气成藏期相互吻合,起到沟通油源和运移通道的作用,为低渗储层中油气运移、聚集提供良好条件。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

陈翠雀, 罗菊兰, 韩焘, 丛培茂. 2009. 低渗透率储层裂缝发育程度与储层产能关系研究. 测井技术, 33(5): 475~479.

邓虎成, 周文, 姜文利, 刘岩, 梁峰. 2009. 鄂尔多斯盆地麻黄山西区块延长、延安组裂缝成因及期次. 吉林大学学报(地球科学版), 39(5): 811~817.

窦伟坦, 侯明才, 陈洪德, 董桂玉. 2008. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组油气成藏条件及主控因素研究. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(6): 686~692.

高金栋,周立发,冯乔. 2018. 鄂尔多斯盆地姬塬—元城地区构造裂缝特征与形成期次的划分. 大地测量与地球动力学, 38(8): 811~817.

郭惠, 赵红格, 陈江萌, 邵晓州, 刘池洋, 王建强, 雷琳琳, 李俊, 汪建, 黄雷. 2024. 鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区三叠系延长组裂缝特征及其对低渗透油藏的控制作用. 中国地质, 51(1): 73~88.

郭惠, 赵红格, 李莹, 雷琳琳, 汪建, 李俊, 邵晓州. 2023. 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. 石油实验地质, 45(1): 109~121.

郭惠. 2022. 鄂尔多斯盆地西缘中部断层—裂缝特征及其成藏效应. 导师: 赵红格. 西安: 西北大学硕士学位论文: 1~96.

郭凯, 曾溅辉, 李元昊, 刘涛涛. 2013. 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. 中国石油大学学报(自然科学版), 37(2): 36~42.

何发岐, 黄雷, 贾会冲, 张茹, 张威, 王朝, 黎小伟. 2024. 鄂尔多斯盆地走滑断裂特征及控油气效应[OL]. 地质学报, [2024-

08-27]. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023197.
惠潇, 赵彦德, 邵晓州, 张文选, 程党性, 罗安湘. 2019. 鄂尔多斯盆地中生界石油地质条件、资源潜力及勘探方向. 海相油气地质, 24(2): 14~22.
贾丽. 2007. 方解石脉 ESR 信号特征的研究. 导师: 尹功明. 北京: 中国地震局地质研究所硕士学位论文: 1~69.
姜琳, 邱振, 郭玉森, 吴超凡, 吴志杰. 2017. 鄂尔多斯盆地延长组次生矿物与裂缝形成时限分析. 地质科学, 52(3): 915~930.
李明瑞, 侯云超, 谢先奎, 张忠义, 张晓磊, 罗丽荣, 邵晓州, 薛楠. 2023a. 鄂尔多斯盆地平凉—演武地区三叠系延长组油气成藏模式及勘探前景. 石油学报, 44(3): 433~446.
李明瑞, 王学刚, 于波, 姚志纯, 张亚东, 黄祥虎. 2023b. 针对目标的非地震解释技术在鄂尔多斯盆地西缘的应用. 石油地球物理勘探, 58(6): 1481~1488.
李相博, 刘化清, 陈启林, 郭彦如, 完颜容, 魏立花, 冯明, 廖建波, 马玉虎. 2010. 鄂尔多斯盆地天环坳陷迁移演化与坳陷西翼油气成藏. 地质科学, 45(2): 490~499.
李阳, 张文选, 李树同, 罗安湘, 牟炜卫, 邓秀芹, 闫灿灿, 惠潇. 2018. 鄂尔多斯盆地长 8 砂岩储层碳酸盐胶结物特征及其对物性的影响. 地质科技情报, 37(4): 175~183.
梁承春, 吴锦伟, 王代国, 何学文, 梁臣, 刘小虎, 王治磊, 黄光明, 雷克辉. 2024. 利用地震和三维数值模拟研究鄂尔多斯盆地红河油田的走滑断裂活动及应力场演化. 西北大学学报(自然科学版), 54(2): 313~328.
梁晓伟, 韩永林, 王海红, 王成玉, 牛小兵, 辛红刚. 2009. 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. 岩性油气藏, 21(2): 49~53.
梁正中, 许红涛, 高超利, 肖荣, 杨红新, 边延河, 王彩霞. 2023. 鄂尔多斯盆地西南缘三叠系延长组流体包裹体特征及对油气充注调整的指示. 中国石油勘探, 28(2): 81~91.
刘润川, 任战利, 马侃, 张园园, 祁凯, 于春勇, 任文波, 杨燕. 2019. 鄂尔多斯盆地南部延长组油气成藏期次研究. 现代地质, 33(6): 1263~1274.
刘显阳,惠潇,李士祥. 2012. 鄂尔多斯盆地中生界低渗透岩性油藏形成规律综述. 沉积学报, 30(5): 964~974.
刘显阳, 李士祥, 周新平, 陈修, 刘江艳, 郭芪恒, 魏嘉怡, 廖永乐. 2023. 鄂尔多斯盆地石油勘探新领域、新类型及资源潜力. 石油学报, 44(12): 2070~2090.
鲁雪松, 桂丽黎, 陈玮岩, 柳少波, 吴石头, 范俊佳, 刘强, 孙晶, 张亮亮, 肖阳, 杨文霞, 曹日洲. 2023. 激光原位碳酸盐岩 U-Pb 定年实验方法改进与石油地质应用. 中国科学:地球科学, 53(12): 2953~2968.
吕文雅, 曾联波, 陈双全, 吕鹏, 董少群, 惠晨, 李睿琦, 王浩南. 2021. 致密低渗透砂岩储层多尺度天然裂缝表征方法. 地质论评, 67(2): 543~556.
吕文雅, 曾联波, 周思宾, 吉园园, 梁丰, 惠晨, 尉加盛. 2020. 鄂尔多斯盆地西南部致密砂岩储层微观裂缝特征及控制因素—以红河油田长 8 储层为例. 天然气地球科学, 31(1): 37~46.
马海勇, 周立发, 张雪峰, 韩天佑. 2016. 陕西省定边—吴起地区延长组长 8 地层裂缝形成因素分析. 陕西师范大学学报(自然科学版), 44(2): 106~110.
任战利, 于强, 崔军平, 祁凯, 陈占军, 曹展鹏, 杨鹏. 2017. 鄂尔多斯盆地热演化史及其对油气的控制作用. 地学前缘, 24(3): 137~148.
邵晓州, 王苗苗, 惠潇, 王淑敏, 张晓磊, 齐亚林. 2021. 鄂尔多斯盆地盐池地区裂缝特征、形成期次及发育模式. 天然气地球科学, 32(10): 1501~1513.
邵晓州, 王苗苗, 齐亚林, 赵红格, 张晓磊, 孙勃, 刘永涛. 2022. 鄂尔多斯盆地盐池地区中生界断裂特征及其石油地质意义. 中国石油勘探, 27(5): 83~95.
唐大卿, 陈红汉, 耿锋, 齐荣, 姜华, 古再丽努尔·艾尔肯. 2023. 板内小位移走滑断裂特征解析: 以塔里木、四川及鄂尔多斯盆地为例. 地球科学, 48(6): 2067~2086.
唐永, 周立夫, 陈孔全, 董晓霞, 唐文军. 2018. 川东南构造应力场地质分析及构造变形成因机制讨论. 地质论评, 64(1): 15~28.
王翠丽, 周文, 李红波, 邓虎成, 刘岩. 2014. 镇泾地区延长组多期次裂缝发育特征及分布. 成都理工大学学报(自然科学版), 41(5): 596~603.
王启超, 刘光祥, 吴疆, 岳欣欣, 孙自明, 张军涛, 高晓鹏, 刘玲, 鲁锴, 张仲培. 2024. 鄂尔多斯盆地旬宜地区下古生界走滑断裂特征与油气勘探意义. 石油实验地质, 46(2): 342~353.
王启宇, 郑荣才, 梁晓伟, 辛红刚, 王昌勇. 2011. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组裂缝特征及成因. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(2): 220~228.
王瑞飞, 孙卫. 2009. 鄂尔多斯盆地姬塬油田上三叠统延长组超低渗透砂岩储层微裂缝研究. 地质论评, 55(3): 444~448.
王允诚, 周文, 朱永铭, 童孝华, 陆正元, 董伟, 何鹏, 蒋建平, 罗雨田. 1992. 裂缝性致密油气储集层. 北京: 地质出版社: 1~252.
席胜利, 李文厚, 李荣西. 2008. 烃源岩生烃期次与油气成藏—以鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区长 7 烃源岩为例. 石油勘探与开发, 35(6): 657~663.
肖正录, 路俊刚, 李勇, 张海, 尹相东, 周翔. 2023. 鄂尔多斯盆地延长组裂缝特征及其控藏作用. 新疆石油地质, 44(5): 535~542.
徐黎明, 周立发, 张义楷, 党犇. 2006. 鄂尔多斯盆地构造应力场特征及其构造背景. 大地构造与成矿学, 30(4): 455~462.
杨帆, 方成名, 黄泽光, 周小进, 徐良发. 2014. 贺兰山断裂带的 ESR 年龄测定. 石油实验地质, 36(5): 642~644.
杨俊杰. 2002. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律. 北京: 石油工业出版社: 1~228.
杨易卓, 黄志龙, 屈童, 李志远, 王瑞, 张景缘, 马崇林, 潘永帅, 于瑾. 2023. 东海盆地西湖凹陷黄岩地区油气成藏主控因素及成藏模式. 地质论评, 69(6): 2179~2194.
叶慧, 石万忠, 王任, 齐荣, 刘凯, 贾会冲, 林建炜. 2023. 鄂尔多斯盆地南部玉都走滑断裂带构造特征及其对油气成藏的控制. 地球科学, 48(6): 2294~2309.
尹帅, 田涛, 李俊鹿, 王瑞飞, 周雪, 李玉蓉, 柳伟明, 李香雪, 张磊. 2024. 鄂尔多斯盆地西南缘延长组断缝体特征及对油藏的调控作用. 油气地质与采收率, 31(1): 1~12.
尹帅, 邬忠虎, 吴晓明, 刘建平, 谭成仟, 王濡岳, 袁慧, 戴亚威. 2022. 鄂尔多斯盆地陇东地区洪德区块侏罗系延安组油藏富集规律. 石油与天然气地质, 43(5): 1167~1179.
曾联波, 李忠兴, 史成恩, 王正国, 赵继勇, 王永康. 2007. 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. 地质学报, 81(2): 174~180.
曾联波, 郑聪斌. 1999. 陕甘宁盆地延长统区域裂缝的形成及其油气地质意义. 中国区域地质, 18(4): 391~396.
张晓磊, 唐颖, 李卓奕, 杨艳宁, 崔一凡, 任宇晖, 韦明丹. 2023. 鄂尔多斯盆地西南缘延长组长 8 段低充注油藏成藏模式——以环西—彭阳地区为例. 西安石油大学学报(自然科学版), 38(1): 31~44.
张园园, 任战利, 杨桂林, 王琨, 吉园园, 林清申. 2021. 天环坳陷南段中生界断裂特征及其石油地质意义. 中国矿业大学学报, 50(2): 318~328.

赵红格, 刘池洋, 王建强, 王锋, 银燕. 2007. 鄂尔多斯盆地西部晚三叠世构造属性探讨. 中国地质, 34(3): 384~391.

赵希, 张小莉, 杨振, 李亚军, 卢俊辉, 王晓琳, 钟高润. 2021. 鄂尔多斯盆地樊学油区长 8 砂岩裂缝平面展布及控制因素. 地质与勘探, 57(3): 667~675.

赵振宇, 郭彦如, 王艳, 林冬娟. 2012. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展. 特种油气藏, 19(5): 15~20.

周新桂, 张林炎, 范昆. 2007. 含油气盆地低渗透储层构造裂缝定量预测方法和实例. 天然气地球科学, 18(3): 328~333.

Chen Cuique, Luo Julan, Han Tao, Cong Peimao. 2009&. Study on relationship between low-permeability reservoir fracture growth and reservoir productivity. Well Logging Technology, 33(5): 475~479.

Deng Hucheng, Zhou Wen, Jiang Wenli, Liu Yan, Liang Feng. 2009&. Genetic mechanism and development periods of fracture in Yanchang and Yan´an formation of western Mahuangshan Block in Ordos Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 39(5): 811~817.

Dou Weitan, Hou Mingcai, Chen Hongde, Dong Guiyu. 2008&. A research on the conditions of the reservoir formation and the main controlling factors of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 35(6): 686~692.

Gao Jindong, Zhou Lifa, Feng Qiao. 2018&. The characteristics and formation phase of structural fracture of the Jiyuan—Yuancheng area in the Ordos Basin. Journal of Geodesy and Geodynamics, 38(8): 811~817.

Guo Hui, Zhao Hongge, Chen Jiangmeng, Shao Xiaozhou, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Lei Linlin, Li Jun, Wang Jian, Huang Lei. 2024&. Fracture characteristics of Triassic Yanchang Formation in the Gufengzhuang Area, Western Ordos Basin and its control on low permeability reservoirs. Geology in China, 51(1): 73~88.

Guo Hui, Zhao Hongge, Li Ying, Lei Linlin, Wang Jian, Li Jun, Shao Xiaozhou. 2024&. Fracture characteristics and hydrocarbon significance in the Chang 7 to Chang 9 members of Triassic Yanchang Formation of Gufengzhuang area, western Ordos Basin. Petroleum Geology & Experiment, 45(1): 109~121.

Guo Hui. 2022&. Faults—fractures characteristics in the central part of the western margin of Ordos Basin, and its reservoir-forming effects. Xi´an: Northwestern University Master Thesis: 1~96.

Guo Kai, Zeng Jianhui, Li Yuanhao, Liu Taotao. 2013&. Geochemical characteristics of tectonic fracture-filling calcite in Yanchang formation of Longdong area and its relationship with hydrocarbon fluid flow. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 37(2): 36~42.

He Faqi, Huang Lei, Jia Huichong, Zhang Ru, Zhang Wei, Wang Zhao, Li Xiaowei. 2024&. Characteristics of strike-slip faults and their oil—gas-controling effect in the Ordos basin [OL]. Acta Geologica Sinica, [2024-08-27]. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023197.

Hui Xiao, Zhao Yande, Shao Xiaozhou, Zhang Wenxuan, Cheng Dangxing, Luo Anxiang. 2019&. The geological conditions, resource potential, and exploration direction of oil in Ordos Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 24(2): 14~22.

Jia Li. 2007&. Study on ESR signal characteristics of calcite pulse. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration Master Thesis: 1~69.

Jiang Lin, Qiu Zhen, Guo Yusen, Wu Chaofan, Wu Zhijie. 2017&. The analysis of secondary minerals and fracture formation time in Yanchang Formation of Ordos Basin. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 52(3): 915~930.

Keith M L, Weber J N. 1964. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils. Geochimica et Cosmochimica Acta, 28(11): 1786~1790.

Li Mingrui, Hou Yunchao, Xie Xiankui, Zhang Zhongyi, Zhang Xiaolei, Shao Xiaozhou, Luo Lirong, Xue Nan. 2023a&. Hydrocarbon accumulation mode and exploration prospect of Triassic Yanchang Formation in Pingliang Yanwu area, Ordos Basin. Acta Petrolei Sinica, 44(3): 433~446.

Li Mingrui, Wang Xuegang, Yu Bo, Yao Zhichun, Zhang Yadong, Huang Xianghu. 2023b&. Non-seismic target-oriented interpretation techniques and application in the western edge of Ordos Basin. Oil Geophysical Prospecting, 58(6): 1481~1488.

Li Xiangbo, Liu Huaqing, Chen Qilin, Guo Yanru, Wan Yanrong, Wei Lihua, Feng Ming, Liao Jianbo, Ma Yuhu. 2010&. Migration history of the Tianhuan depression of the Ordos Basin and it's effects on the hydrocarbon accumulation in the west part of the depression. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 45(2): 490~499.

Li Yang, Zhang Wenxuan, Li Shutong, Luo Anxiang, Mou Weiwei, Deng Xiuqin, Yan Cancan, Hui Xiao. 2018&. Characteristics of carbonate cements and their effects on properties in Chang 8 sandstone reservoir, Ordos Basin. Geological Science and Technology Information, 37(4): 175~183.

Liang Chengchun, Wu Jinwei, Wang Daiguo, He Xuewen, Liang Chen, Liu Xiaohu, Wang Zhilei, Huang Guangming, Lei Kehui. 2024&. Using seismic data and 3D numerical simulation to study strike-slip faulting and stress field evolution in Honghe Oilfield, Ordos Basin. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 54(2): 313~328.

Liang Xiaowei, Han Yonglin, Wang Haihong, Wang Chengyu, Niu Xiaobing, Xin Honggang. 2009&. Fracture characteristics and geological significance of Upper Triassic Yanchang Formation in Jiyuan area, Ordos Basin. Lithologic Reservoirs, 21(2): 49~53.

Liang Zhengzhong, Xu Hongtao, Gao Chaoli, Xiao Rong, Yang Hongxin, Bian Yanhe, Wang Caixia. 2023&. Characteristics of fluid inclusion and its indication to hydrocarbon charge and adjustment of the Triassic Yanchang Formation in southwestern margin of Ordos Basin. China Petroleum Exploration, 28(2): 81~91.

Liu Runchuan, Ren Zhanli, Ma Kan, Zhang Yuanyuan, Qi Kai, Yu Chunyong, Ren Wenbo, Yang Yan. 2019&. Classification of hydrocarbon accumulation phases of Yanchang Formation in southern Ordos Basin. Geoscience, 33(6): 1263~1274.

Liu Xianyang, Hui Xiao, Li Shixiang. 2012&. Summary of formation rule for low permeability lithologic reservoir of Mesozoic in Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 30(5): 964~974.

Liu Xianyang, Li Shixiang, Zhou Xinping, Chen Xiu, Liu Jiangyan, Guo Qiheng, Wei Jiayi, Liao Yongle. 2023&. New fields, new types and resource potentials of petroleum exploration in Ordos Basin. Acta Petrolei Sinica, 44(12): 2070~2090.

Lu Xuesong, Gui Linli, Chen Weiyan, Liu Shaobo, Wu Shitou, Fan Junjia, Liu Qiang, Sun Jing, Zhang Liangliang, Xiao Yang, Yang Wenxia, Cao Rizhou. 2023#. Improvement of in situ LA-ICP-MS U-Pb dating method for carbonate minerals and its application in petroleum geology. Scientia Sinica (Terrae), 53(12): 2953~2968.

Lü Wenya, Zeng Lianbo, Chen Shuangquan, Lü Peng, Dong Shaoqun, Hui Chen, Li Ruiqi, Wang Haonan. 2021&. Characterization methods of multi-scale natural fractures in tight and low-permeability

sandstone reservoirs. Geological Review, 67(2): 543~556.

Lü Wenya, Zeng Lianbo, Zhou Sibin, Ji Yuanyuan, Liang Feng, Hui Chen, Wei Jiasheng. 2020&. Microfracture characteristies and its controlling factors in the tight oil sandstones in the southwest Ordos Basin: Case study of the eighth member of the Yanchang Formation in Honghe Oilfield. Natural Gas Geoscience, 31(1): 37~46.

Ma Haiyong, Zhou Lifa, Zhang Xuefeng, Han Tianyou. 2016&. Analysis of factors affecting fractures of Chang-8 subsection based on Dingbian—Wuqi area of Shaanxi province. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 44(2): 106~110.

Ren Zhanli, Yu Qiang, Cui Junping, Qi Kai, Chen Zhanjun, Cao Zhanpeng, Yang Peng. 2017&. Thermal history and its controls on oil and gas of the Ordos Basin. Earth Science Frontiers, 24(3): 137~148.

Shackleton N J, Kennett J P. 2004. Paleotemperature history of the cenozoic and the initiation of nteretic glaciation: Oxygen and carbon isotopic analysis. AAPG Bulletin, 28(21): 349~373.

Shao Xiaozhou, Wang Miaomao, Hui Xiao, Wang Shumin, Zhang Xiaolei, Qi Yalin. 2021&. Characteristics, formation stages and development model of fractures in Yanchi area, Ordos Basin. Natural Gas Geoscience, 32(10): 1501~1513.

Shao Xiaozhou, Wang Miaomiao, Qi Yalin, Zhao Hongge, Zhang Xiaolei, Sun Bo, Liu Yongtao. 2022&. Characteristics of the Mesozoic faults in Yanchi area and the petroleum geological significance, Ordos Basin. China Petroleum Exploration, 27(5): 83~95.

Tang Daqing, Chen Honghan, Geng Feng, Qi Rong, Jiang Hua, Guzailinuer. Aierken. 2023&. Characteristics of intraplate small-displacement strike-slip faults: A case study of Tarim, Sichuan and Ordos Basins. Earth Science, 48(6): 2067~2086.

Tang Yong, Zhou Lifu, Chen Kongquan, Dong Xiaoxia, Tang Wenjun. 2018&. Analysis of tectonic stress field of southeastern Sichuan and Formation mechanism of tectonic deformation. Geological Review, 64(1): 15~28.

Wang Cuili, Zhou Wen, Li Hongbo, Deng Hucheng, Liu Yan. 2014&. Characteristics and distribution of multiphase fractures in Yanchang Formation of Zheniing block in Ordos Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 41(5): 596~603.

Wang Qichao, Liu Guangxiang, Wu Jiang, Yue Xinxin, Sun Ziming, Zhang Juntao, Gao Xiaopeng, Liu Ling, Lu Kai, Zhang Zhongpei. 2024&. Characteristics of Lower Paleozoic strike-slip faults and their significance for oil and gas exploration in Xunyi—Yijun area, Ordos Basin. Petroleum Geology & Experiment, 46(2): 342~353.

Wang Qiyu, Zheng Rongcai, Liang Xiaowei, Xin Honggang, Wang Changyong. 2011&. Feature and genesis of the reservoir fractures of Upper Triassic Yanchang Formation in Jiyuan area, Ordos Basin. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 38(2): 220~228.

Wang Ruifei, Sun Wei. 2009&. A study on micro cracks in super-low permeability sandstone reservoir of the Upper Triassic Yanchang formation in the Ordos Basin. Geological Review, 55(3): 444~448.

Wang Yuncheng, Zhou Wen, Zhu Yongming, Tong Xiaohua, Lu Zhengyuan, Dong Wei, He Peng, Jiang Jianping, Luo Yutian. 1992. Fractured Tight Oil and Gas Reservoir. Beijing: Geology Press: 1~252.

Xi Shengli, Li Wenhou, Li Rongxi. 2008&. Hydrocarbon generation and reservoir formation: A case from Chang 7 source rock in Majiatan area west margin of Ordos Basin. Petroleum Exploration and Development, 35(6): 657~663.

Xiao Zhenglu, Lu Jungang, Li Yong, Zhang Hai, Yin Xiangdong, Zhou Xiang. 2023&. Characteristics of fractures and their controls on Yanchang formation reservoir in Ordos Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 44(5): 535~542.

Xu Liming, Zhou Lifa, Zhang Yikai, Dang Ben. 2006&. Characteristics and tectonic setting of tectono-stress field of Ordos Basin. Geotectonica et Metallogenia, (4): 455~462.

Yang Fan, Fang Chengmin, Huang Zeguang, Zhou Xiaojin, Xu Liangfa. 2014&. ESR dating of Helan Mountain Fault Zone. Petroleum Geology & Experiment, 36(5): 642~644.

Yang Junjie. 2002. Tectonic Evolution and Hydrocarbon Distribution in Ordos Basin. Beijing: Petroleum Industry Press: 1~228.

Yang Yizhuo, Huang Zhilong, Qu Tong, Li Zhiyuan, Wang Rui, Zhang Jingyuan, Ma Chonglin, Pan Yongshuai, Yu Jin. 2023&. Main controlling factors and reservoir forming models of oil and gas reservoirs in Huangyan area, Xihu Sag, East China Sea Basin. Geological Review, 69(6): 2179~2194.

Ye Hui, Shi Wanzhong, Wang Ren, Qi Rong, Liu Kai, Jia Huichong, Lin Jianwei. 2023&. Structural characteristics of Yudu strike-slip fault zone and their control on hydrocarbon accumulation in southern Ordos Basin. Earth Science, 48(6): 2294~2309.

Yin Shuai, Tian Tao, Li Junlu, Wang Ruifei, Zhou Xue, Li Yurong, Liu Weiming, Li Xiangxue, Zhang Lei. 2024&. Fault—fracture body characteristics and their effect on hydrocarbon distribution of Yanchang Formation in southwestern margin of Ordos Basin. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 31(1): 1~12.

Yin Shuai, Wu Zhonghu, Wu Xiaoming, Liu Jianping, Tan Chengqian, Wang Ruyue, Yuan Hui, Dai Yawei. 2022&. Oil enrichment law of the Jurassic Yan'an Formation, Hongde block, Longdong area, Ordos Basin. Oil & Gas Geology, 43(5): 1167~1179.

Zeng Lianbo, Li Zhongxing, Shi Chengen, Wang Zhengguo, Zhao Jiyong, Wang Yongkang. 2007&. Characteristics and origin of fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs of the Upper Triassic Yanchang formation in the Ordos Basin. Acta Geologica Sinica, 81(2): 174~180.

Zeng Lianbo, Zheng Congbin. 1999&. Origin of the regional fracturing in Yanchang epoch, Shanganning basin, significance for geology of oil and gas. Regional Geology of China, 18(4): 391~396.

Zhang Xiaolei, Tang Ying, Li Zhuoyi, Yang Yanning, Cui Yifan, Ren Yuhui, Wei Mingdan. 2023&. Hydrocarbon accumulation patterns of Chang 8 Low-charging oil reservoirs in southwestern margin of Ordos Basin: Taking Huanxi—Pengyang area as an example. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 38(1): 31~44.

Zhang Yuanyuan, Ren Zhanli, Yang Guilin, Wang Kun, Ji Yuanyuan, Lin Qingshen. 2021&. Characteristics and petroleum geological significances of Mesozoic faults in the southern section of Tianhuan depression. Journal of China University of Mining & Technology, 50(2): 318~328.

Zhao Hongge, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Wang Feng, Yin Yan. 2007&. Tectonic attribute of the western Ordos basin during the Late Triassic. Geology in China, 34(3): 384~391.

Zhao Xi, Zhang Xiaoli, Yang Zhen, Li Yajun, Lu Junhui, Wang Xiaolin, Zhong Gaorun. 2021&. The planar distribution and controlling factors of sandstone cracks in the Chang 8 reservoir, Fanxue oil district, Ordos Basin. Geology and Exploration, 57(3): 667~675.

Zhao Zhenyu, Guo Yanru, Wang Yan, Lin Dongjuan. 2012&. Study progress in tectonic evolution and paleogeography of Ordos Basin.

Special Oil & Gas Reservoirs, 19(5): 15~20.
Zhou Xingui, Zhang Linyan, Fan Kun. 2007&. Methods for quantitative prediction of tectonic fractures in compact reservoirs in petroliferous basins and a case study. Natural Gas Geoscience, 18(3): 328~333.

Fault characteristics, formation stages and oil—gas geological significance of Yanchang Formation in Tianhuan Depression, Ordos Basin

——A case study of Hongde area

LIU Xiaorui[1)], XIAO Zhenglu[1, 2, 3)], LU Jungang[1, 2, 3)], ZHANG Zhongyi[4)], ZHANG Xiaolei[4)], HOU Yunchao[4)], XUE Nan[4)]

1) *School of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu*, 610500;
2) *National Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu*, 610500;
3) *Sichuan Natural Gas Geology Key Laboratories, Chengdu*, 610500;
4) *Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an*, 710018

Objectives: The Middle—Upper Yanchang Formation in the Tianhuan Depression, Ordos Basin, is rich in oil and gas resources and has great exploration potential. However, due to its location in the western margin of the basin, the tectonic activities are complicated and the fault distribution and reservoir control mechanism are unknown.

Methods: Based on core, imaging logging, calcite C—O isotope and U-Pb isotope dating experiments on fracture surface, the development characteristics and formation stages of Chang-6 ~ Chang-8 Oil Layer faults in Hongde area are studied, and the controlling effect of faults on hydrocarbon accumulation is discussed.

Results: The results show that: ① The fractures in Hongde area are mostly concentrated in the lower combination of the Yanchang Formation, mainly in vertical and high-angle shear fractures. The fractures are partially filled with calcite and quartz, and obvious traces of overoil can be seen. ② The fracture strikes in the NEE—SW direction are predominant, followed by the near EW direction, mainly formed in the middle Early Cretaceous, late Early Cretaceous and early Late Cretaceous. The corresponding oxygen isotope conversion temperatures are 115.39℃, 139.83℃ and 153.55℃, respectively. ③ The U-Pb isotopic age of fractureface calcite is 170.6±6.1 Ma, 143±12 Ma, 104±32 Ma, and the activity period of the NEE-trending main fault is the Middle—Late Jurassic to Early Cretaceous, corresponding to the second—third act of Yanshanian Movement, which is consistent with the accumulation period of Chang-8 oil reservoir.

Conclusions: It is concluded that the Yanchang Formation fault in the Tianhuan Depression improves the physical property of low permeability reservoir, plays a role of communication between oil source and migration channel, and promotes the migration and accumulation of oil and gas in remote source sand body.

Keywords: U-Pb isotope dating; fracture formation time; accumulation control effect; Yanchang Formation; Hongde region; Ordos Basin

Acknowledgements: This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42072185, 42002176)

First author: LIU Xiaorui, male, born in 1999, master, is mainly engaged in oil and gas accumulation and oil and gas geochemistry research; Email: 2767326029@qq.com

Corresponding author: LU Jungang, male, born in 1980, professor, doctoral supervisor, is mainly engaged in oil and gas geochemistry and unconventional oil and gas geology; Email: lujungang21@sohu.com

Manuscript received on: 2024-06-25; Accepted on: 2024-09-05; Published online on: 2024-09-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.09.031 **Edited by**: LIU Zhiqiang