

鄂尔多斯盆地西南缘镇泾地区断缝体发育特征及 油气富集规律

杨桂林^{1,2},任战利^{1,2},何发岐³,张园园⁴,王宝江⁵,祁凯^{1,2}

(1. 大陆动力学国家重点实验室,陕西 西安 710069;2. 西北大学 地质学系,陕西 西安 710069;3. 中国石化 华北油气分公司,河南 郑州 450006;4. 中国石油 长庆油田分公司,陕西 西安 710069;5. 西昌学院 信息技术学院,四川 西昌 615000)

摘要:断裂、裂缝对油气成藏有重要控制作用,镇泾区块位于鄂尔多斯盆地西南部不同构造单元交汇部位,受周缘强烈构造运动影响,断裂、裂缝普遍发育。在三维地震资料全覆盖的镇泾区块断裂、裂缝精细解释的基础上,对镇泾地区由断裂、伴生脆性破碎带及被其改造过的致密低渗砂岩共同构成的储集体——“断缝体”组合样式、形成期次、断缝体特征等分别进行了深入研究。断缝体主要发育5种构造组合样式,剖面上构造样式有堑垒式、阶梯式、地堑式、花状和紧闭平移式,分别对应于平面上的帚状、雁列式、平行直线式、拉分地堑式和直线式,不同组合样式具有不同的应力背景。通过地震解释和C-O同位素分析技术认为研究区断缝体带内主要存在3期断裂构造:印支期、燕山期和喜马拉雅期。其中燕山期是最主要也是最关键的断缝形成期,喜马拉雅期和印支期断裂活动相对较弱。利用K-Ar同位素、包裹体测温及热演化史分析等手段,明确了研究区三叠系延长组8段(长8段)断缝体油藏的成藏期为早白垩世中晚期。在断缝体三维刻画的基础上,结合断缝形成期与油气成藏的空间配置关系,对研究区长8段不同组合样式控藏机制进行了分析。研究结果表明雁列-阶梯式组合样式最有利于油气富集,其次是拉分地堑-花状、帚状-堑垒式组合样式,平行直线-地堑式和直线-紧闭平移式组合样式中油气富集程度最差。

关键词:油气富集;断缝体;延长组;镇泾地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Fault-fracture body growth and hydrocarbon enrichment of the Zhenjing area, the southwestern margin of the Ordos Basin

Yang Guilin^{1,2}, Ren Zhanli^{1,2}, He Faqi³, Zhang Yuanyuan⁴, Wang Baojiang⁵, Qi Kai^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 3. North China Oil and Gas Branch, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450006, China; 4. Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 5. School of Information Technology, Xichang University, Xichang, Sichuan 615000, China)

Abstract: Faults and fractures play a key role in hydrocarbon accumulation. The Zhenjing area has been taken as study subject as it contains numerous faults and fractures resulted from intensive tectonic movements due to its location at the intersection of different tectonic units in the southwestern Ordos Basin. Based on the fine interpretation of faults and fractures in the Zhenjing area fully covered by 3D seismic acreage, this paper makes an deep study on the combination style, formation period and characteristics of fault-fracture bodies composed of faults and associated brittle fracture zone as well as the modified tight (with low permeability) sandstone. There are mainly five structural combination styles of fault-fracture bodies. On a sectional view, including graben horst, ladder, graben, flower and tight translation types, corresponding respectively to broom, en echelon, parallel straight-line, pull-apart graben and straight-line combinations on a plane view. Different combination styles have different stress background. Through seismic interpretation and C-O isotope analysis, it is suggested that there are mainly three stages of tectonic activities in the fault-fracture body belt in the study area: Indosinian, Yanshanian and Himalayan periods. The Yanshanian period is the most important period for

收稿日期:2022-05-19;修订日期:2022-09-24。

第一作者简介:杨桂林(1992—),男,博士研究生,构造断裂解释、储层沉积学与油气田开发。E-mail:893318054@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41630312);国家重点研发计划项目(2017YFC0603106)。

the formation of fractures, while the Himalayan and Indosinian periods are less important. By means of K-Ar isotope analysis, temperature measurement of inclusions and thermal evolution history analysis, it is clear that the hydrocarbon accumulation in fault-fracture bodies in Chang 8 member of the Yanchang Formation occurred mainly in the middle and late of Early Cretaceous. The three-dimensional description of fault-fracture bodies was combined with the determination of temporal relationship between the formation period of the fault-fracture and the hydrocarbon accumulation to analyze the reservoir control mechanism of different combination styles of the Chang 8 member in the study area. The results show that the en echelon ladder is the most favorable to hydrocarbon enrichment, followed by the pull-apart flower-shaped graben and broom-like graben horst, and the parallel straight-line graben and straight-line tight translation style are the least favorable to hydrocarbon enrichment.

Key words: hydrocarbon enrichment, fault-fracture body, Yanchang Formation, Zhenjing area, Ordos Basin

引用格式:杨桂林,任战利,何发岐,等. 鄂尔多斯盆地西南缘镇泾地区断缝体发育特征及油气富集规律[J]. 石油与天然气地质,2022,43(6):1382-1396. DOI:10.11743/ogg20220609.

Yang Guilin, Ren Zhanli, He Faqi, et al. Fault-fracture body growth and hydrocarbon enrichment of the Zhenjing area, the southwestern margin of the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1382-1396. DOI: 10.11743/ogg20220609.

断缝体顾名思义是一类兼容断裂和裂缝的地质体单元,是针对断裂-裂缝发育的致密储层所提出的概念。王威等学者2019年在四川盆地须家河组气藏特征研究过程中引入断缝体这一概念,描述一种呈网状规模分布的缝、孔储渗体,这类储渗体受断裂和褶皱伴生裂缝共同限定^[1]。黄伟将断裂及其周缘裂缝带共同构成的地质单元定义为断缝体,同时结合蚂蚁体追踪法及曲率属性对断缝体进行了检测和识别^[2]。同年,何发岐等利用测井、地震分析技术对鄂南彬长地区断缝体进行三维刻画^[3]。李辉通过分带建立模型的方法在中国东部某区域建立了断缝体地质模型^[4]。王威、黄仁春等对川东北须家河组断缝体气藏模型再次进行了完善,在前期只考虑断裂、裂缝因素控制缝网的基础上,增加了砂体等控制因素^[5-6]。刘振峰、刘君龙等结合生产动态资料对川西坳陷须家河组断缝体内部的断缝特征进行分析,明确了气藏有利分布区^[7-8]。尽管已有学者通过测井、地震等不同手段对断缝体进行了刻画和研究,但未形成一套系统的研究方法,对油气成藏和富集的控制等问题有待学者去完善和解决。

镇泾地区位于鄂尔多斯盆地西南缘构造转折带(图1),油气资源量高达 3.2×10^8 t,尤其是长8段(三叠系延长组8段)主力油层组产能规模更高,勘探开发前景广阔^[9-11],中生界延长组断裂-裂缝大规模发育。针对此类储集层,2020年何发岐等学者首次在研究区引入断缝体概念,即由断裂、伴生脆性破碎带及被其改造过的致密低渗砂岩共同构成的储集体,其上部及侧面均有非渗透泥质岩、致密层等封挡^[3],并在区内断缝体中发现多个开发效果良好的油藏。研究表明断缝是控

制中生界延长组油气富集的主要因素^[3,12-13]。但迄今为止对断缝体类型、发育特征及其控藏作用仍缺乏深入研究,制约了下一步勘探开发。针对研究区中生界长8段,综合各因素对断缝体带的断裂级别、形成时期及组合样式等特征进行系统研究,同时深入探讨断缝与油气成藏的时空配置关系及其对断缝体油藏的控制机理,研究成果对断缝体油藏高效勘探开发有重要指导意义。

1 断缝体刻画

断缝体是由断裂和伴生破碎带(裂缝)共同构成,本次在对断裂和裂缝系统研究的基础上,采用由点到线-面再到体的流程对断缝体内幕进行精细刻画,以地震解释断裂为重点,从地质、实钻和地震3个方面综合分析确定断缝体发育边界和范围。

地质上,通过裂缝密度与到主断裂距离的交会分析,厘定断裂对裂缝带的影响范围。通过岩心和成像测井统计的裂缝密度与到主断裂距离,总体上具有较好的相关性,距离主断裂越近,裂缝越发育,密度值越高,反之裂缝发育程度越低(图2a)。图中存在两个异常分布区Ⅰ和Ⅱ:区域Ⅰ距离主断裂近,理论上裂缝发育程度应该很高,实际测算则较低,是因为所测算点所属的主断裂本身尺度就非常小,且周围无大断裂存在,故裂缝不发育;区域Ⅱ距离主断裂较远,天然裂缝较发育,究其原因,认为该区域裂缝属非断裂伴生缝,主要是一些节理缝和成岩缝。从岩心和成像井裂缝密度统计结果来看,主断裂的影响范围限于3 200 m之内,距离主断裂最近为15 m,对应裂缝密度为3.20条/m,最

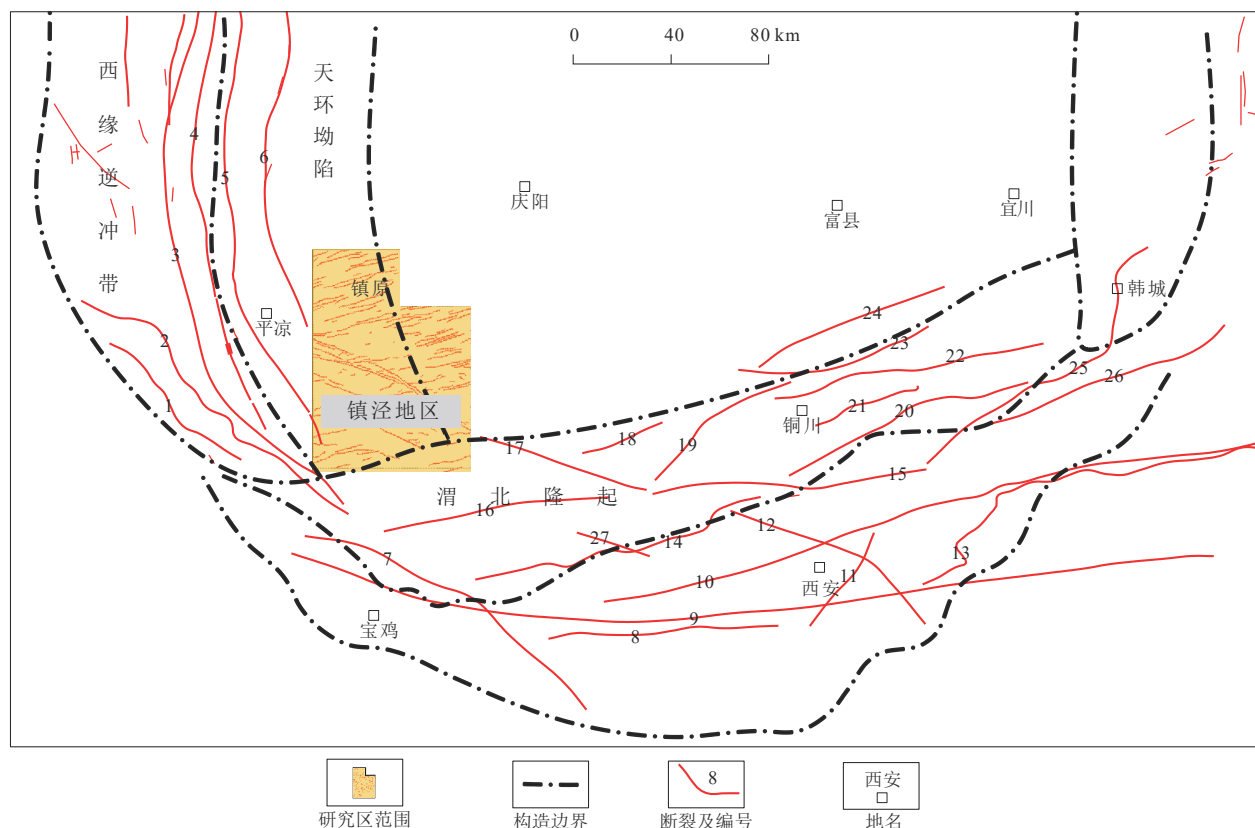


图1 鄂尔多斯盆地南部断裂体系

Fig. 1 Map showing the fault system in the southern Ordos Basin

1. 六盘山西麓断裂; 2. 清水河断裂; 3. 青铜峡-固原断裂; 4. 韦州-安国断裂; 5. 青龙山-平凉断裂; 6. 惠安堡-沙井子断裂; 7. 岐山-马召断裂; 8. 秦岭山前断裂; 9. 余下断裂; 10. 渭河断裂; 11. 长安-临潼断裂; 12. 泾阳-蓝天断裂; 13. 华山山前断裂; 14. 乾县-富平断裂; 15. 口镇-关山断裂; 16. 老龙山断; 17. 彬县-官庄断裂; 18. 彬县-老爷岭断裂; 19. 田家咀断裂; 20. 宫里-翔村断裂; 21. 薛镇-罕井断裂; 22. 枣庙-爱帖村断裂; 23. 云蒙山断裂; 24. 宜黄断裂; 25. 韩城-富平断裂; 26. 双泉-临猗断裂; 27. 张家咀断裂

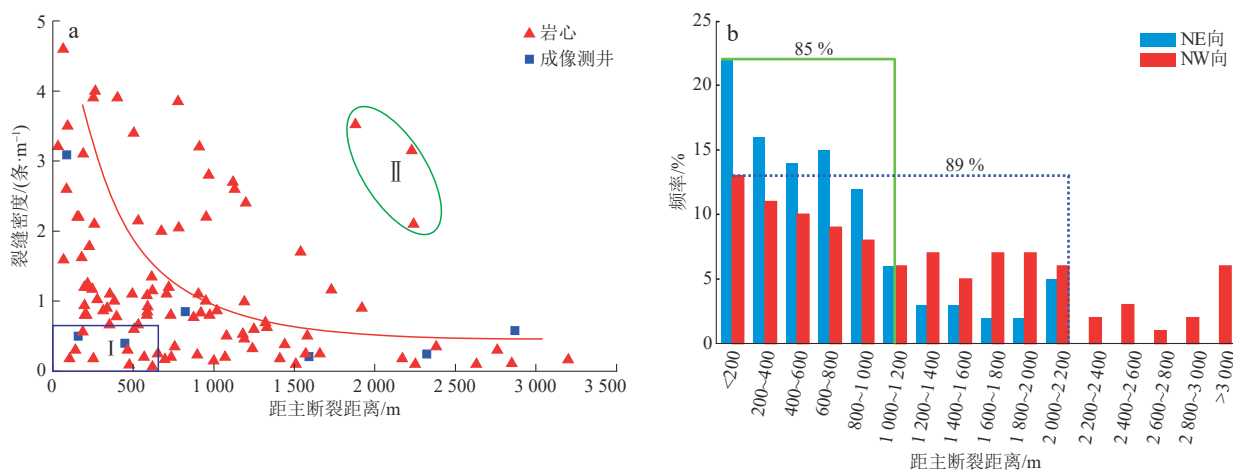


图2 鄂尔多斯盆地镇泾地区长8段断缝边界综合分析

Fig. 2 Comprehensive analysis diagrams of fault-fracture boundary of the Chang 8 member, Zhenjing area, Ordos Basin

a. 裂缝密度与主断裂距离交会分析; b. NE向与NW向实钻裂隙点-主断裂距离频率分布直方图

远为3 200 m, 相应裂缝密度为0.16条/m, 裂缝几乎不发育。

实钻裂隙点能够客观真实地反映断缝带发育界

限。本次分别对NW向和NE向主断裂与实钻裂隙点间的距离进行了统计分析(图2b), 结果表明, 无论是NE向还是NW向断裂, 其裂缝波及范围大致都为

3 000 m之内,超出此范围的区域裂缝一般欠发育,部分区域裂缝发育程度高并非是主断裂所引起。NE向和NW向断裂间的裂缝波及带又存在些许差异,NE向主断裂的波及范围主要分布于1 200 m之内,约占NE向总实钻裂隙点的89%(图2b);而NW向主断裂波及宽度在2 200 m之内,在NW向总实钻裂隙点中占比为85%(图2b)。实钻分析认为主断裂的裂缝带波及范围为2 200 m,距离较远的区域主要发育一些成岩缝和节理缝,受主断裂影响甚小。

地震解释方面,以三维叠后连片处理后的数据体为基础,对其进行多属性分析,最终优选极大似然体(fault likelihood)属性对长8段断缝体边界进行圈定^{[14-17]①}。

利用极大似然裂缝检测技术对研究区长8段裂缝进行刻画,对极大似然边界值反复厘定,结合已有岩心、成像测井及实钻裂隙点进行校正,最终确定极大似然体门槛值大于0.1即为断缝体边界,红色和黄色指示主断裂发育位置,绿色和天蓝色代表主断裂所波及的裂缝发育范围(图3)。HH26等井均位于长8段断裂发育带(红色-黄色),成像测井和岩心观测结果同样显示这些井所处位置裂缝发育,预测结果和实钻结果高度吻合,表明极大似然体法对断缝的识别具有精度高、连续性强等优势,分析结果更加接近断缝原貌。测量可知,断缝带范围由几百米至两千多米不等,但总体处于2 500 m之内。综合地质、钻井及极大似然法进行断缝体边界圈定的同时,利用岩心、测井等资料进行标

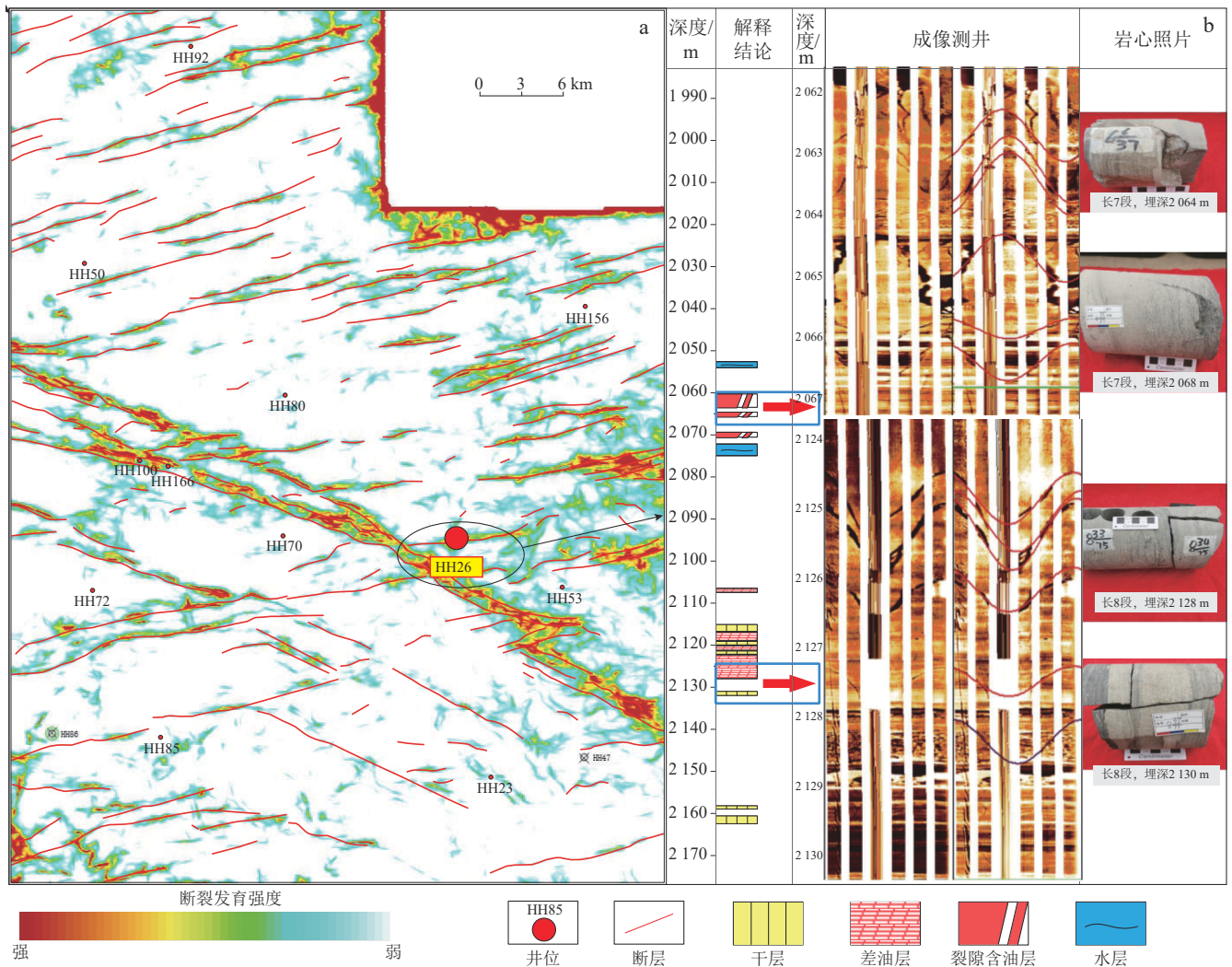


图3 鄂尔多斯盆地镇泾地区井-震结合断缝边界厘定

Fig. 3 Delineation of fault-fracture boundaries based on well-tied seismic interpretation, Zhenjing area of Ordos Basin

a. 极大似然法厘定的断缝边界;b. HH26井长7段-长8段裂缝解释

①任战利,王宝江,张园园,等. 红河油田主力油层组构造、断裂特征及与油藏成藏关系研究[R]. 河南:中国石化华北油气分公司,2018.

定,并将砂体展布与校正后的断裂-裂缝进一步叠合,对断缝体进行三维雕刻(图4)。

2 断缝体形成与油气成藏的时间配置关系

镇泾地区断缝体是多期构造活动的产物,各时期应力背景不尽相同,进而影响油气的运移和聚集^[12,18-23]。因此,在控藏机制分析之前有必要先搞清楚研究区断缝的形成时期、油气成藏期及二者的配置关系。以长8段断缝体油藏为研究对象,通过地震属性、C-O同位素和包裹体测温-热演化史恢复、伊利石测年等手段,明确长8段断缝体形成期和油气成藏期,同时结合断缝演化历史,阐明断缝体与油藏的匹配关系。

2.1 断缝体形成期次

镇泾地区构造位置特殊,应力环境复杂^[9-10]。明确断缝体发育期次是后续油气成藏与断缝体空间配置关系研究的前提,对断缝体期次的确定实际上就是对断缝体内断裂的期次进行判识,因此分析断裂活动期次,能够间接厘定断缝体发育期次^[24-29]。

2.1.1 地震解释分析断缝体发育期次

区内断裂由多期幕式构造活动所形成。基于构造演化史的分析,利用地震解释-地质限定的方法对全区长8段断缝体期次进行确定。基本原理就是通过地震剖面解释断裂,分析其断穿的具体层段、相互切割关系及对应时代,并由地质演化历史进行限定,从而判断

其形成时期^[22,24]。

基于此原理,并结合前人对研究区的地质认识,对全区断缝体带内的断裂期次进行判识,认为研究区主要历经3期构造运动(图5)。第一期:中一晚三叠世受印支运动的影响,近SN向的挤压应力环境促使研究区中部和南部率先产生NNW向走滑断裂,并伴生部分近EW向雁列式平行断裂;第二期:晚侏罗世—白垩世,在NW-SE向的左旋剪切挤压应力背景下,形成NNE向断裂,同时印支期形成的NNW向断裂再次被改造;第三期:白垩纪沉积之后形成的改造性断裂是区内最新一期断裂,在喜马拉雅运动右旋剪切拉张应力环境下产生,区域应力方向为NW-SE向拉伸、NE向挤压。

2.1.2 裂缝充填物同位素分析

裂缝的形成必然伴随着岩体空间的扩大,此时裂缝带内饱和地层水会发生矿物结晶并析出,附着于裂缝内^[30-31]。结晶矿物中氧同位素与裂缝形成时的水体条件和温度有密切联系,由氧同位素值结合地温梯度值反算矿物结晶时的温度,同时综合地层埋藏史特征分析,即可确定裂缝形成时期,这就是利用裂缝充填物明确断裂期次的主要原理^[30-31]。与漫长的地质历史相比,裂缝的发育可视为是瞬间完成的^[32-33],所以可由此法对裂缝期次进行定量评价。

以研究区长8段为例,选用Smith和Fritz提出的针对老地层的古温度计算方程(1):

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

式中: t 为方解石矿物形成时的温度, $^{\circ}\text{C}$; $\delta^{18}\text{O}$ 为矿物氧同位素值, ‰ ; $\delta^{18}\text{O}_w$ 为水介质氧同位素值^[30-31], ‰ 。

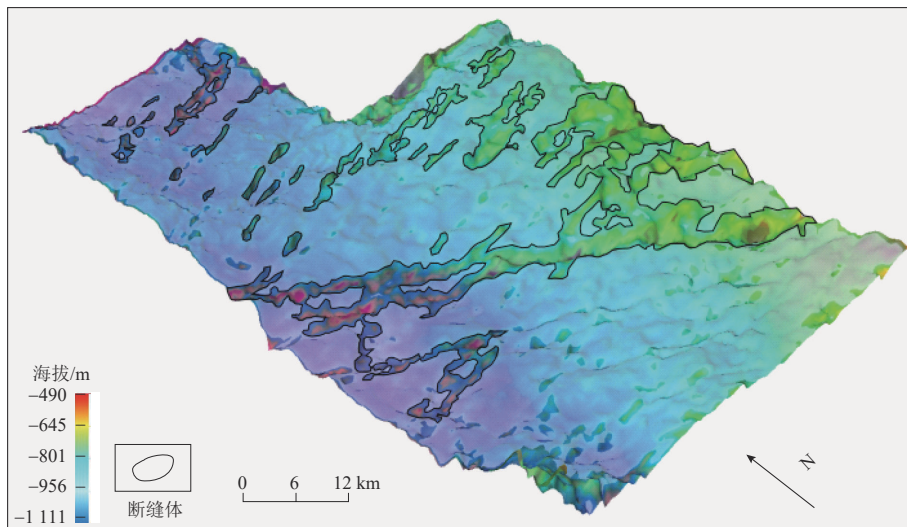


图4 鄂尔多斯盆地镇泾地区长8段顶面构造-断缝体叠合图

Fig. 4 Superimposition diagram of the structures and fault-fracture bodies of Chang 8 member, Zhenjing area, Ordos Basin

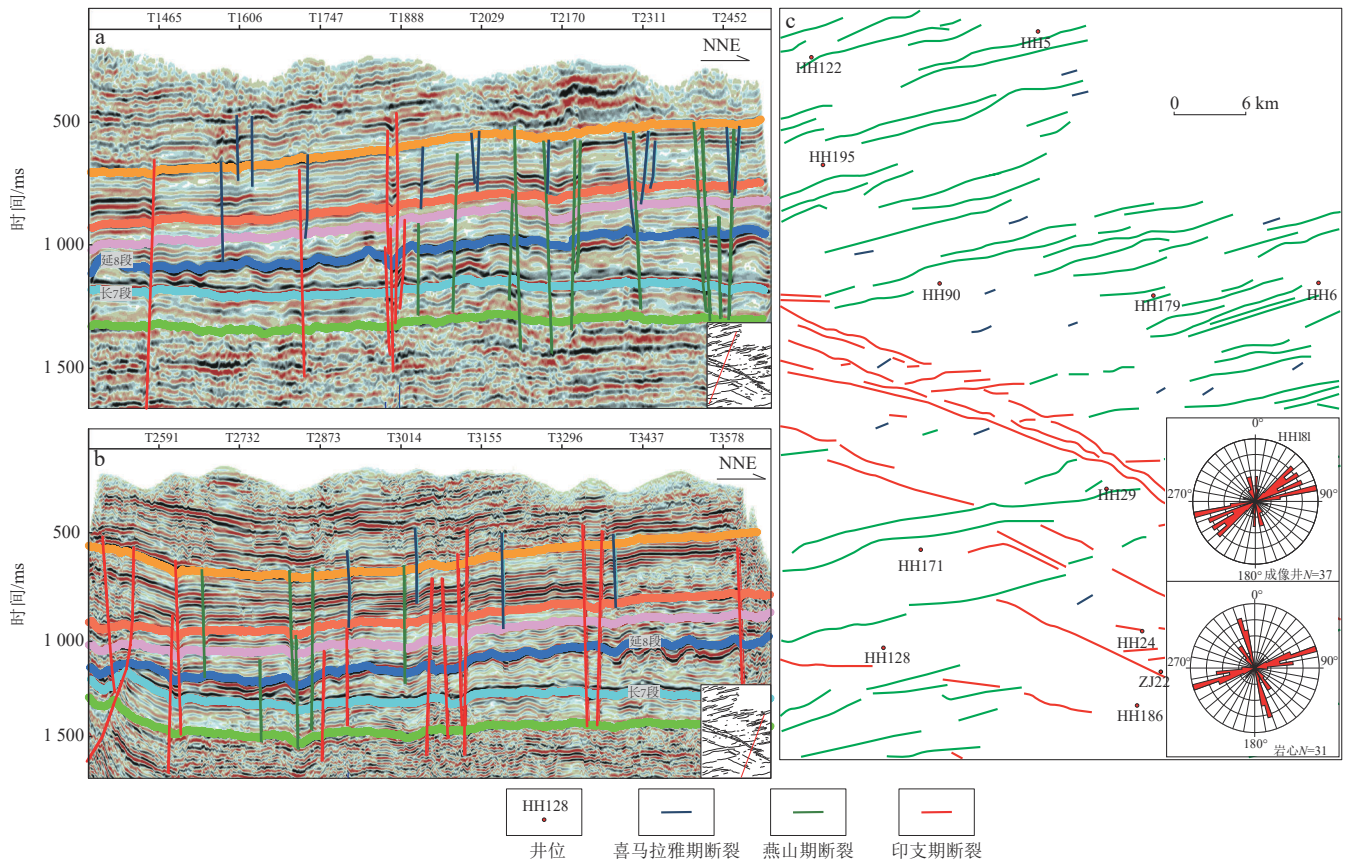


图5 鄂尔多斯盆地镇泾地区断缝体带断裂发育期次

Fig. 5 Developmental stages of faults in the fault-fracture body belt, Zhenjing area, Ordos Basin

a. NNE向地震剖面断裂期次分析1; b. NNE向地震剖面断裂期次分析2; c. 镇泾地区长8段断裂期次平面分析

本次利用 Thermo Finnigan MAT 253 气体稳定同位素比值质谱仪 (IRMS) 和 Gas Bench 多用途样品制备装置对方解石充填物的 C-O 同位素进行分析测试。在分析之前首先将样品粉碎并研磨至 200 目大小, 在玻璃瓶中加入 0.3 mg 的粉末样品, 在 70 °C 下与磷酸反应 2 h。然后以氦气作为载体将产生的 CO₂ 转移至 IRMS 系统中进行分析。其中进样采用 CombiPAL 自动进样器, 利用 PoraPhtQ 色谱柱 (25 m × 0.32 mm) 进行分析。经过多次的重复分析, δ¹³C 和 δ¹⁸O 的分析标准偏差分别低于 0.06 ‰ 和 0.08 ‰, 然后采用国标 GBW04405 (CaCO₃, δ¹³C = 0.57 ‰, δ¹⁸O = -8.49 ‰) 对分析结果进行校正。

利用 C-O 同位素的相关性对 30 个样品分析结果 (包括部分前人的测试结果) (表 1) 的有效性进行检验。通常认为, C-O 同位素间相关性较好, 则说明二者经历了成岩改变, 形成时的原始信息未被有效保留, 反之则认为其有效地保留了原始信息。经分析可知, C-O 同位素间的相关系数仅为 0.02 (图 6a), 几乎不相关, 故认为此次分析结果有效, 可用来反映裂缝形成时的原始信息。以本次测试数据为主, 并收集部

分前人的测试结果^[29], 综合分析认为, 研究区中生界 δ¹⁸O 平均值为 -18.37 ‰, 总体分布于 -23.43 ‰ ~ 8.38 ‰; δ¹³C 平均为 -6.55 ‰, 分布范围是 -18.77 ‰ ~ 1.16 ‰。由 δ¹³C 和 δ¹⁸O 交会分析发现, 其分区特征明显, 3 个分布区即代表断缝存在 3 期成因 (图 6b)。延安组和延长组属湖相-河流体系, δ¹⁸O_w 通常取值为 -10 ‰ 代入公式 (1) 进行古温度反算。I 区的 δ¹⁸O 值主要集中于 -10.56 ‰, 由公式 (1) 换算至断缝体形成时期的温度为 35.23 °C; II 区的 δ¹⁸O 值主要集中于 -16.83 ‰, 由公式 (1) 换算至断缝体形成时期的温度为 102.46 °C; III 区的 δ¹⁸O 值主要集中于 -19.93 ‰, 换算至断缝体形成时期的温度为 156.03 °C。结合前人研究成果, 通过对地表温度和地温梯度参数的反复选取、计算和分析, 最终取地表平均温度 20 °C、地温梯度 55 °C/km 对 3 期裂缝形成期的埋深进行反算, 计算结果显示 I、II 和 III 区的对应埋深分别为 276.86, 1 499.29 和 2 473.36 m。此分析结果与 HH112 井埋藏史图的对比分析显示 (图 7), 研究区断缝体带内主要存在 3 期断裂, 印支期 (I 区)、燕山期 (II 区) 和喜马

表1 鄂尔多斯盆地镇泾地区裂缝充填同位素分析

Table 1 Isotopic analysis of fracture filling, Zhenjing area, Ordos Basin

井号/剖面	层位	样品深度/m	充填物	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	计算温度/ $^{\circ}\text{C}$	计算埋深/m	备注
HH26	长6段	1 891.11	方解石	-16.96	-17.47	104.48	1 536.09	
HH198	延安组	1 813.45	方解石	-15.77	-18.77	87.25	1 222.71	
HH112	长8段	2 123.97	方解石	-17.75	-12.94	116.95	1 762.73	
HH149	长8段	2 357.11	方解石	-19.08	-6.51	140.00	2 181.85	
HH149	长8段	2 356.20	方解石	-19.45	-6.38	146.84	2 306.23	
HH152	延安组	1 748.04	方解石	-20.80	-7.40	173.49	2 790.69	
HH152	延安组	1 757.15	方解石	-19.40	-9.00	145.92	2 289.49	
HH157	长8段	2 042.28	方解石	-21.60	-4.50	190.47	3 099.49	
HH166	长8段	2 395.52	方解石	-19.01	-6.46	138.74	2 158.88	
HH166	长8段	2 389.86	方解石	-20.17	-6.66	160.80	2 560.06	
HH166	长8段	2 398.95	方解石	-21.76	-4.79	193.88	3 161.41	
HH188	长8段	2 413.25	方解石	-20.85	-9.12	174.50	2 809.09	
HH188	长8段	2 418.35	方解石	-20.23	-8.83	161.80	2 578.26	
HH192	长8段	2 462.16	方解石	-20.94	-4.27	176.33	2 842.32	
HH193	长8段	2 298.83	方解石	-20.05	-7.50	158.40	2 516.39	
HH197	长8段	2 398.27	方解石	-18.98	-6.70	138.19	2 148.90	
HH198	长8段	2 245.56	方解石	-20.65	-5.06	170.33	2 733.26	
JH36	长8段	1 376.08	方解石	-23.43	-9.15	232.60	3 865.41	
HH112	长8段	2 122.62	方解石	-21.18	-8.87	181.39	2 934.28	
HH26	长8段	2 134.57	方解石	-19.70	-1.97	151.60	2 392.69	
HH26	长8段	2 064.51	方解石	-17.82	-0.25	118.11	1 783.78	
HH30	长8段	2 283.28	方解石	-18.66	-1.13	132.46	2 044.73	
HH6	长8段	1 779.08	方解石	-19.58	-0.42	149.31	2 351.14	
HH105	长8段	2 264.42	方解石	-18.07	-5.77	122.28	1 859.56	
HH105	长8段	2 264.42	石英	-18.08	-6.26	122.44	1 862.63	原始C-O值据 刘岩(2013) ^[26]
HH41	长8段	2 116.17	方解石	-19.00	-2.83	138.55	2 155.46	
纳水河剖面	长8段	野外露头	方解石	-8.38	-7.91	24.75	86.29	
纳水河剖面	长8段	野外露头	方解石	-11.12	-10.32	38.99	345.35	
HH26	长8段	2 110.20	方解石	-11.36	-0.42	40.74	377.14	
ZJ25	长8段	2 259.58	方解石	-11.36	1.16	40.74	377.14	

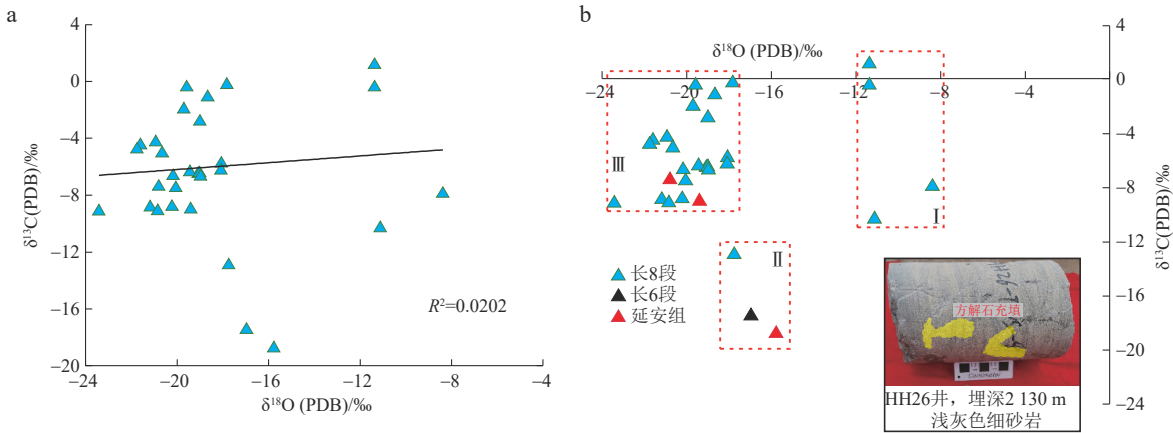


图6 鄂尔多斯盆地镇泾地区中生界碳-氧同位素分析

Fig. 6 Correlation analysis of the Mesozoic C-O isotopes, Zhenjing area, Ordos Basin

a. C-O同位素相关性分析;b. C-O同位素分区特征

拉雅期(Ⅲ区),分析结果同王翠丽的声发射实验结果一致^[34](图7)。

综上地震-地质解释、断缝带内方解石脉体测试,

认为研究区断缝体带内断缝主要形成于3期构造活动,其中燕山期是最主要也是最关键的断缝形成期,喜马拉雅期和印支期断裂活动相对较弱^[26,34]。

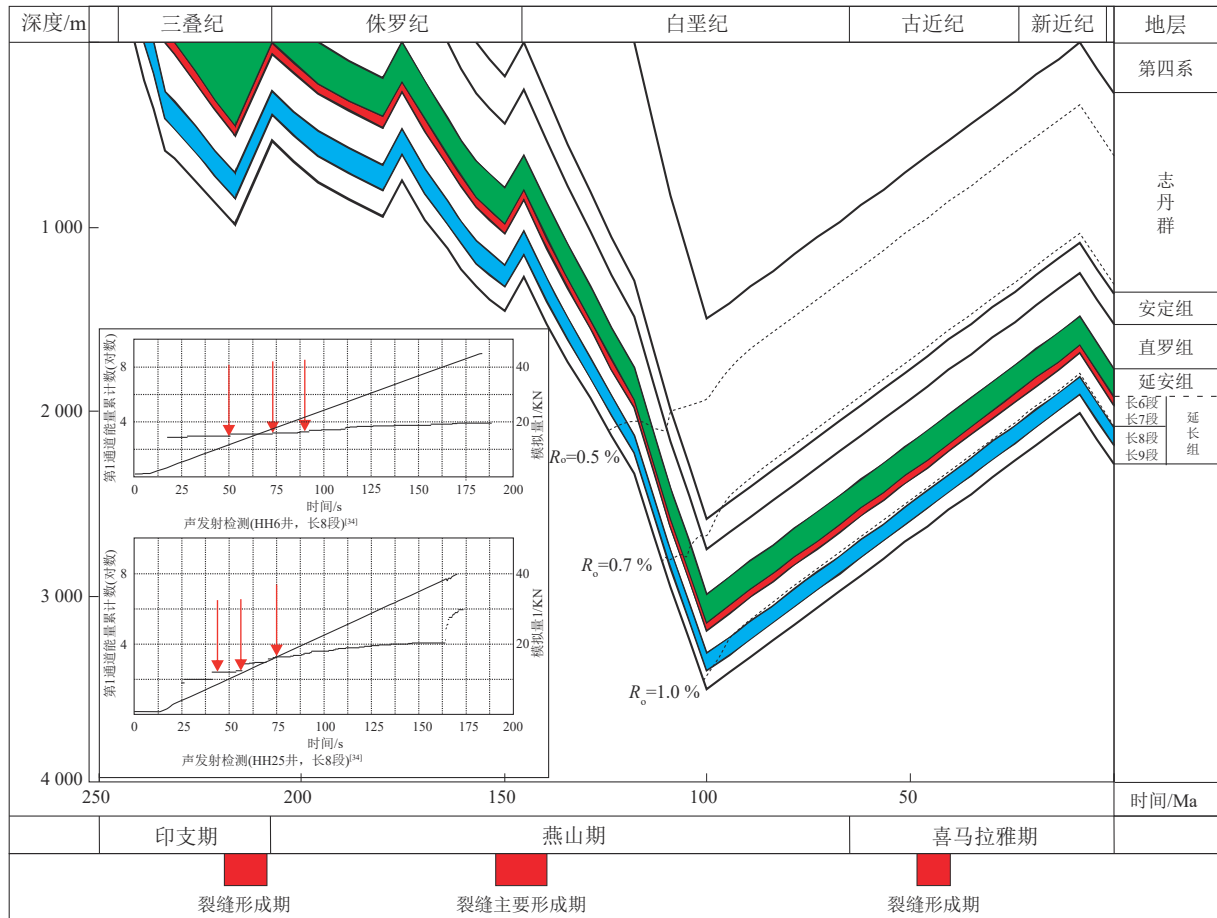


图7 鄂尔多斯盆地镇泾地区HH112井埋藏史与裂缝期次匹配关系

Fig. 7 Matching relationship between burial history and fracture stages of Well HH112, Zhenjing area, Ordos Basin

2.2 油气成藏期分析

通过包裹体测温-热演化史恢复和伊利石测年两种方法确定研究区长8段油气成藏期。在西北大学热年代学实验室,利用LINKM600型冷热台,在电压10.5 V、室内温度26℃、湿度65%的条件下,测试HH188和HH156等12口井长8段岩样的冰点温度和均一温度。本次测试对象为与烃类包裹体共生的盐水包裹体,主要赋存于石英加大边或裂隙和石英内部。实验结果分析可知,包裹体均一温度为69~155℃,范围较广,峰值介于100~125℃。利用此结果对埋藏史恢复图进行标定,确定长8段油藏的主成藏期为120~110 Ma(图8)。当油气进入储层后,自生伊利石的生长便会停止,故认为其停止生长的时间就是油气成藏期^[26,32-33]。本次伊利石测试分析是利用VG3600质谱仪,在样品1500℃熔化的同时,将³⁸Ar稀释剂精准投入并稀释,然后测定³⁸Ar/³⁶Ar和⁴⁰Ar/³⁸Ar的同位素比值,求

取样品放射性成因⁴⁰Ar,最后依据K含量计算相应年龄^[30]。HH192和HH198两口井长8段含油砂岩伊利石定年分析结果显示,长8段油藏的成藏期为115~105 Ma(表2),与包裹体分析结果一致,因此认为研究区长8段油藏的形成成为连续的成藏过程,主成藏期为120~105 Ma,即早白垩世中晚期(图8)^②。

2.3 断缝体期次与油气成藏期的配置关系

镇泾地区中生代以来的3期构造活动对盆地演化和油气的运聚有重要的影响^[31],在明确油气成藏期和断缝体发育期的基础上,对二者的配置关系作进一步分析。

印支时期,盆地西南部隆升为研究区提供了良好物源基础,中生界最重要的源岩层——长7段底部灰黑色油页岩和泥岩便形成于该时期^[27-28,35]。印支晚期,近SN向的挤压应力环境促使研究区中部率先产生NWW向走滑断裂,并伴生部分近EW向雁列式平行断

②任战利,杨桂林,王宝江,等. 镇泾区块“断缝体”油藏特征及成藏模式研究[R]. 河南:中国石化华北油气分公司,2020.

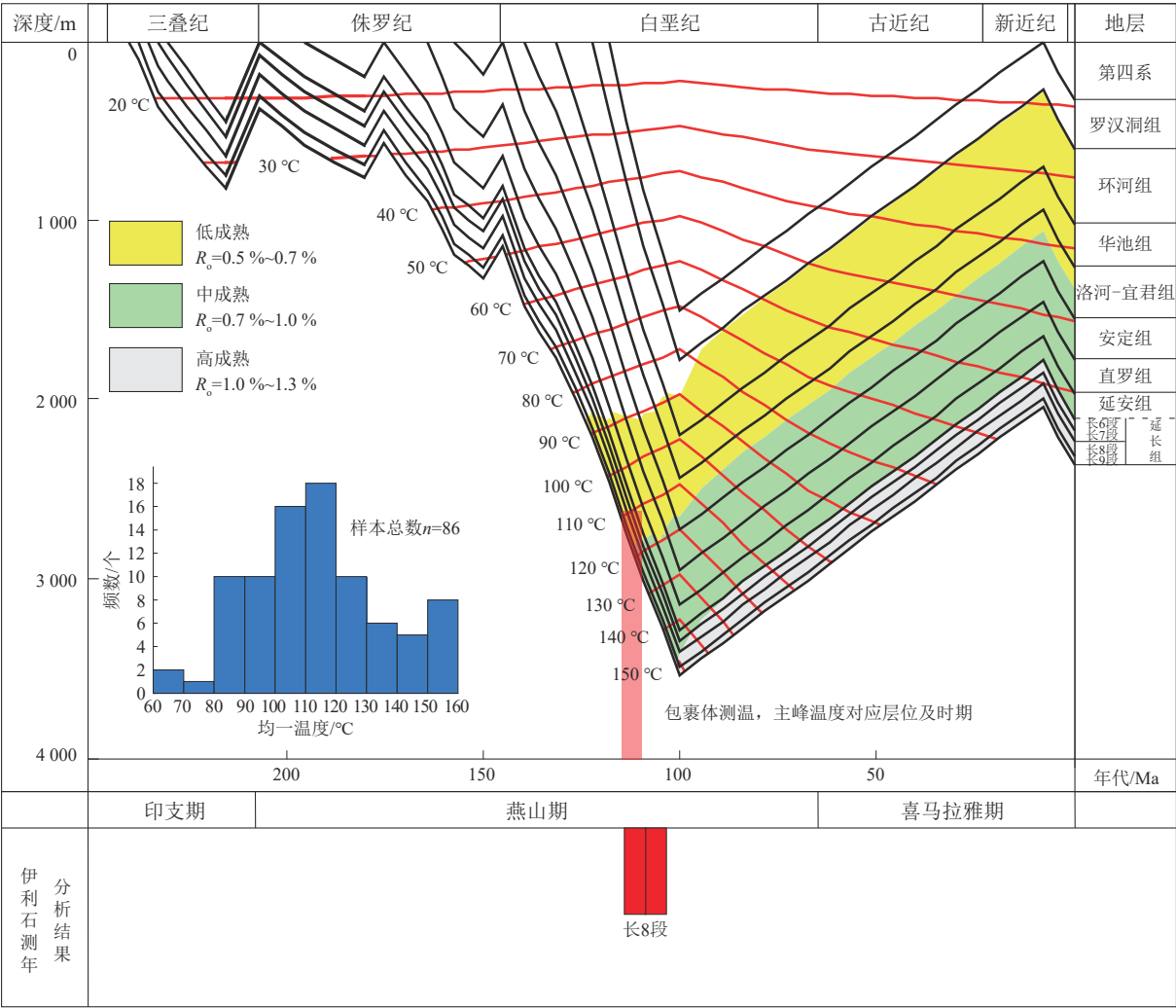


图8 鄂尔多斯盆地镇泾地区长8段热演化史约束的油气成藏分析

Fig. 8 Analysis of hydrocarbon accumulation constrained by thermal evolution history of Chang 8 member in Zhenjing area of Ordos Basin

表2 鄂尔多斯盆地镇泾地区长8段自生矿物(伊利石)K-Ar同位素定年分析数据

Table 2 K-Ar isotopic dates of authigenic minerals (illite) in the Chang 8 member, Zhenjing area, Ordos Basin

井号	深度/m	粒度/ μm	粘土矿物组成/%					K含量/%	$^{40}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$	^{40}Ar 含量/ $(10^{-10}\text{mol}\cdot\text{g}^{-1})$	时间/Ma
			I	I/S	S	K	C(C/S)				
HH192	2 451.49 ~ 2 451.99	<0.1	47	44	0	5	4	4.47	74.23	8.96	112.0 ± 1.5
HH198	2 242.66 ~ 2 245.56	<0.1	52	39	0	3	6	5.13	72.05	9.83	107.2 ± 1.5

注:I为伊利石;I/S为伊蒙混层;S为蒙皂石;K为高岭石;C为绿泥石;C/S为绿蒙混层。

裂。古地貌表现为东北低、西南高的特征,长7段优质源岩层主要集中发育于研究区东北部^[27]。燕山期,早白垩世研究区长7段底部源岩层在区域性构造热事件的驱动下^[36-38],热演化程度加强,生、排烃已达高峰,原油大量排出,在源-储压差的作用下向储集层运移,该时期也是研究区长8段油藏的主成藏期^[35,39-41]。

晚侏罗世—白垩世,在NW-SE向的左旋剪切挤压应力背景下,全区发育NNE向断裂^[27]。燕山大规模成藏期与该构造活动同步,所产生的NNE向断裂弱化了

储层致密进程,有效沟通了长8段与长7段源岩层,油气顺断缝带运移至长8段储层,并聚集成藏,形成断缝体油藏^[28]。

古近纪以来,长7段源岩层热演化终止,长8段储层趋于致密,受喜马拉雅运动的影响,盆地隆升^[35],油气再次运移调整。此时在喜马拉雅运动NW-SE向右旋拉张应力环境下,NNE向张扭性断裂大量形成,同时对燕山期形成的NEE向断裂和印支运动产生的NWW向断裂加以改造,使其活化,成为该期油气运移

的主要通道,将早期平衡的油藏动态打破并进行改造调整,造成研究区长8段油藏差异富集现象。

3 断缝体组合特征及对油藏的控制

受印支、燕山和喜马拉雅3期构造活动影响,研究区断缝交切叠加,在空间上呈差异性分布^[26-28]。分析发现,镇泾地区长8段断缝体剖面与对应的平面构造样式两两组合,构成了5种构造组合样式,分别为帚状-堑垒式、雁列-阶梯式、平行直线-地堑式、拉分地堑-花状、直线-紧闭平移式(图9)。

雁列-阶梯式组合与走滑应力密切相关,是由同一应力环境下形成的一系列走向、倾向、规模及性质相同或近乎相同的断裂所构成。在平面上呈雁列状展布,端部有时收敛于同一侧的主干断裂^[19,21-22,42],在剖面上呈阶梯状(图9)。这些断裂形成于同一构造历史时期,应力背景相同,多为旋钮作用的结果,常发育于盆地边缘。

拉分地堑-花状组合构造样式位于平面上断裂重叠区,呈菱形状,规模差异较大,由数十千米至数百米不等^[18-19,21-22,42-43]。在强张扭应力背景下形成,断面为应力集中区,拉扭作用将地层拉分形成地堑,并伴生大批裂缝切割早期溶孔。随着拉张作用的持续,地堑两侧的空间逐步扩展,小断裂和裂缝进一步发育,为油气聚集成藏提供了有利空间。通常平面上菱形状短边是

正断裂,长边是走滑断裂。剖面上,与拉分地堑相对应的构造样式为花状,又称棕榈树构造。该组合整体呈花状形态,具有活动时间长、发育早的特点(图9)。拉分地堑-花状构造组合对小断裂和裂缝的发育极为有利,对油气运聚具有重要意义。

帚状-堑垒式组合的形成受走滑旋扭作用影响较大,是历经多期断裂改造的一个表现。在平面上呈帚状,次级断裂发育终止于主干断裂,多为正断裂。各断裂在剖面上具有相反倾向,相邻断裂间共享上升盘或下降盘,并形成相应的地垒和地堑,表现为堑垒状^[18-19,21-22,42-43](图9)。

平行直线-地堑式构造样式内断裂之间距离相等,在平面上呈平行状。剖面上特征与平面类似,且倾向相反的断裂之间会共享下降盘,表现为地堑样式^[19,21,43](图9)。这些断裂有正有逆,但同一样式中断裂具有相同应力背景^[15,38]。直线型-紧闭平移构造组合样式相对其他样式较为简单,在全区均有发育(图9)。平面上表现为单一的直线状,局部稍有弯曲,与其他断裂未构成明确的组合^[19,21-22,42-43]。

3.1 雁列-阶梯式组合控藏机制

以12井区翟池断裂带内断缝体为例,结合生产动态资料对雁列-阶梯式组合样式的控藏机制进行探讨(图10a)。雁列-阶梯式组合断裂根部呈张扭性,该位

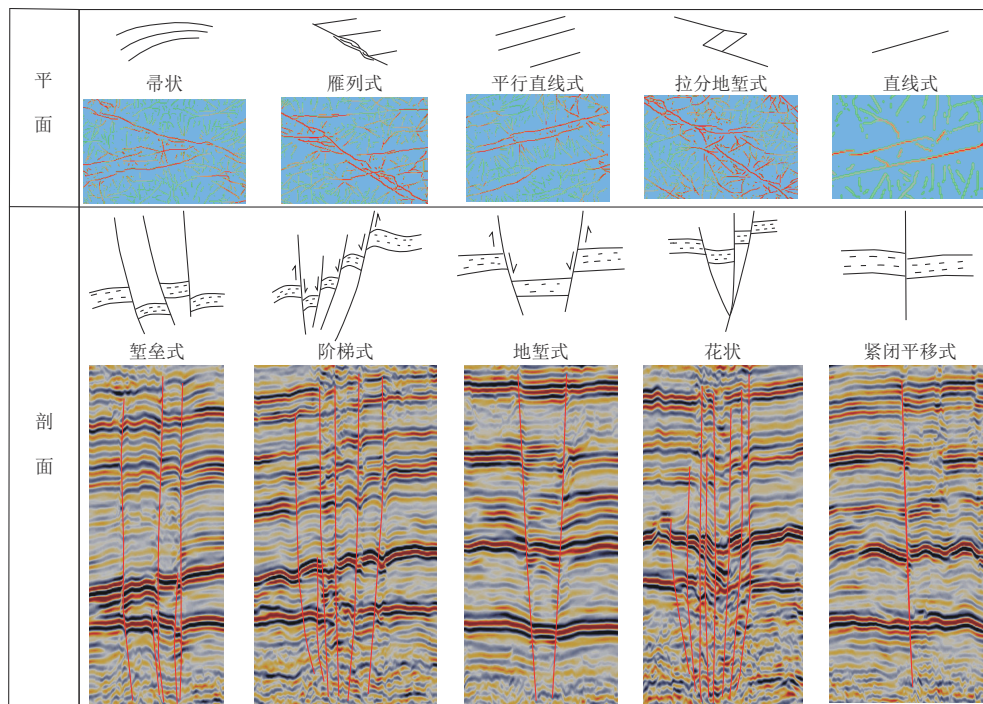


图9 鄂尔多斯盆地镇泾地区断缝体组合特征综合分析

Fig. 9 Comprehensive characterization of combinations in fault-fracture bodies, Zhenjing area, Ordos Basin

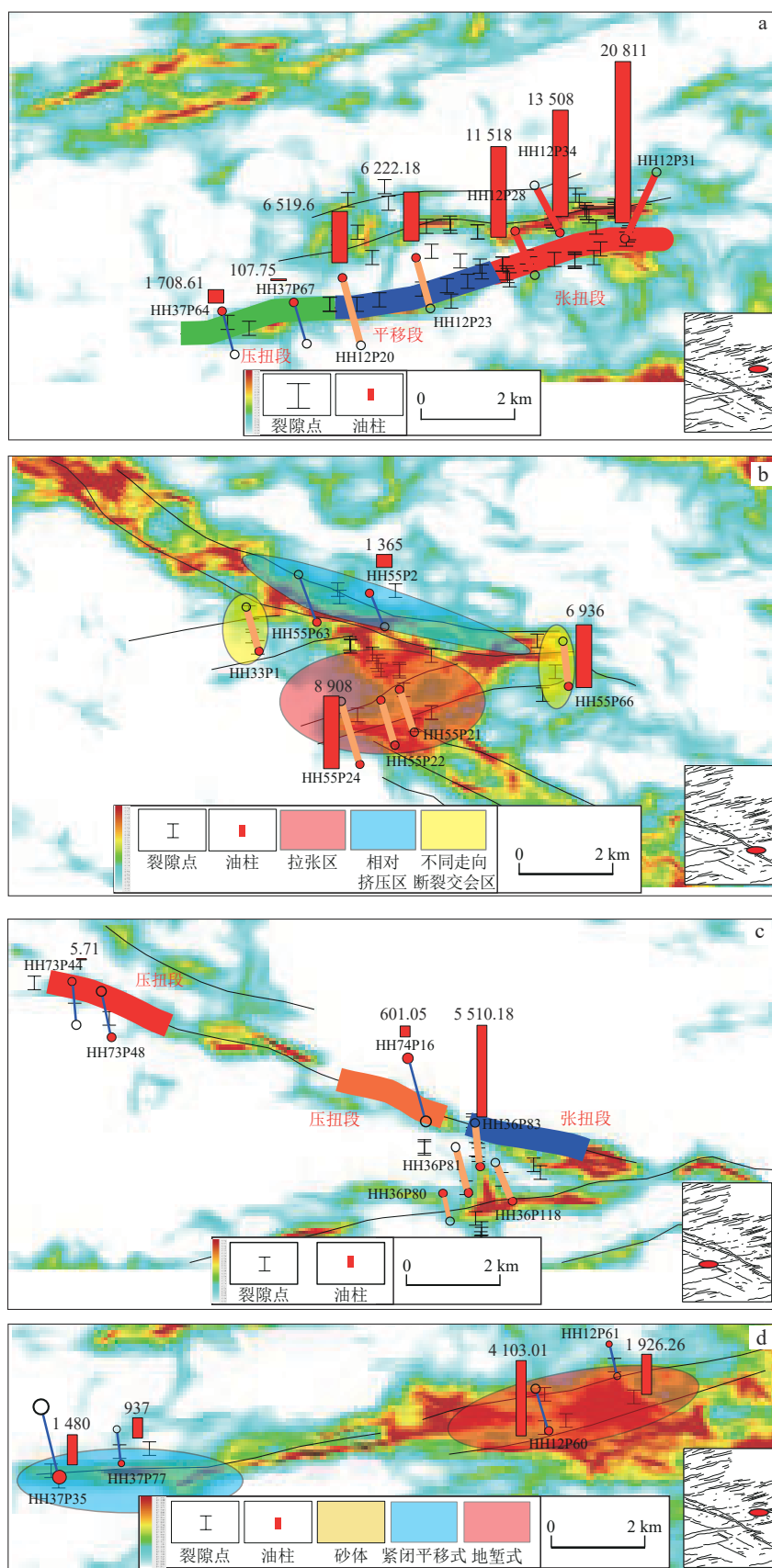


图10 鄂尔多斯盆地镇泾地区断缝体组合控藏机制综合分析

Fig. 10 Comprehensive analysis of reservoir control mechanism of fault-fracture body combinations, Zhenjing area, Ordos Basin
a. 雁列-阶梯式断缝体组合; b. 拉分地堑-花状断缝体组合; c. 帚状-堑垒式断缝体组合; d. 平行直线-地堑式及直线-紧闭平移式组合

置 HH12P31, HH12P34 和 HH12P28 井稳产期日产量分别为 23.73, 15.90 和 43.23 t, 累产分别为 20 261.01, 13 245.28 和 11 257.26 t, 均属高产类井, 且稳产延续时间较长。该样式中部为断裂平移部位, 应力状态居中。此处的 HH12P20 和 HH12P23 井日产分别为 5.75 和 18.45 t, 累产分别为 6 260.34 和 6 106.20 t, 油气富集程度较断裂根部差。样式中断裂依次收敛的部位呈压扭性, 不利于油气的运聚。如 HH37P64 和 HH37P67 井日产和累产均较其他部位更低, 日产分别为 5.77 和 0.27 t, 累产分别为 1 708.61 和 107.75 t。总体而言, 雁列-阶梯式组合中, 断裂根部更有利于油气富集, 其次是中部的平移段, 断裂依次收敛的部位油气富集程度相对较差。究其原因, 该样式中断裂根部处于张扭性应力释放环境, 断缝发育程度最高, 实钻过程中也是裂隙点最集中的部位, 极大增强了该部位断缝间的连通性, 从而促进油气聚集成藏。断裂呈雁列状依次收敛端为压扭段, 断缝发育程度较弱, 油气富集程度相对较差。雁列-阶梯式样式中部, 无论是应力状态还是断缝发育程度均介于上述两个部位之间, 相应的油气富集程度也介于二者之间。

3.2 拉分地堑-花状构造组合控藏机制

玉都大断裂东部与红河凸起带西部相交区的拉分地堑-花状组合大致可分为3个区域: 拉张区、相对挤压区和不同走向断裂交会区(图 10b)。结合部分水平井生产动态资料分析, 发现相比于断裂交会区和相对挤压区而言, 拉张区的 HH55P21, HH55P22 和 HH55P24 井油气产量最高, 稳产期日产量分别是 21.85, 6.54 和 11.05 t, 累产分别为 6 858.48, 7 630.21 和 8 908.14 t。其次是断裂交会区的 HH33P1 和 HH55P66 井, 稳产期日产量分别为 7.83 和 9.83 t, 累产分别为 6 872.81 和 6 939.86 t。拉张区和断裂交会区均达到了中产水平。而位于挤压区的井均为低产井, 如 HH55P63 和 HH55P2 井, 稳产期日产量分别为 1.61 和 4.09 t, 累产分别为 762.29 和 1 365.78 t(图 10b)。对拉分地堑-花状组合不同部位油气差异分布的主因进行分析, 认为该样式的拉分区由于拉张作用优化了断缝体内断缝间的连通性, 扩大了储集空间, 是该样式中最有利于油气聚集的部位。断裂交会区通常是不同时期断裂叠加而成, 新产生的断裂促使前期的断裂再次活化, 提高断缝有效性, 且该区域应力较为集中, 断缝较发育, 亦是油气良好的储集空间。相对挤压区断缝也比较发育, 但受挤压应力的影响, 断缝的连通性和有效性变差, 不利于油气聚集成藏。

3.3 帚状-堑垒式组合控藏机制

极大似然法断缝检测结果显示, 索罗断裂带和花所断裂带交汇处的帚状-堑垒式组合中, NEE 和 NWW 向断裂交会区断缝最发育, 也是实钻裂隙点分布最密集的区域(图 10c), 为油气聚集成藏奠定了良好的空间基础。由于晚期燕山运动的影响, 促使印支期 NWW 向断裂活化, 增强了断缝有效性, 扩大了油气储集空间。实际开发中, 位于帚状-堑垒式组合交会区的 HH36P80, HH36P83, HH36P81 和 HH36P118 井稳产期日产分别是 26.38, 13.78, 13.28 和 11.26 t, 累产分别为 7 562.40, 5 510.18, 9 509.43 和 6 926.69 t。无论是日产量还是累产均高于该样式其他区域(HH73P48, HH74P16 和 HH73P44 井, 日产分别为 1.06, 0.68 和 0.03 t, 累产分别是 164.9, 601.05 和 5.71 t)(图 10c), 进一步说明帚状-堑垒式组合中断裂交会区较其他区域更有利于油气富集。同时对样式中 NWW 向断裂的应力性质进行分析(图 10c), 将张扭段 HH36P83 井与压扭段 HH74P16 及 HH73P44 井的生产情况进行对比, 结果表明张扭区受张扭作用的影响, 断缝空间得以扩大, 油气富集程度明显优于压扭区。

3.4 平行直线-地堑式和直线-紧闭平移式组合控藏机制

以研究区东南部上肖断裂带内断缝体为例(图 10d), 红色阴影区断缝体内发育平行直线型-地堑式组合样式, 该样式是由两条中等规模的四级断裂构成, 呈北东东向展布; 蓝色阴影区发育直线型-紧闭平移组合样式, 仅发育一条燕山期的四级断裂。结合实际开发情况对两种组合样式的控藏机制进行分析(图 10d), 位于平行直线-地堑式组合区的 HH12P60 和 HH12P61 井累产分别为 4 103.01 和 1 926.26 t, 其中 HH12P60 井稳产期日产量达 7.29 t, 产能整体高于直线-紧闭平移式组合区的 HH37P77 和 HH37P35 井, 这两口井日产分别是 2.56 和 2.02 t, 累产分别为 937 和 1 480.85 t。虽然 HH12P60 和 HH12P61 井所处位置的砂体发育程度较 HH37P77 和 HH37P35 井差, 但其断缝发育更为密集, 故油井产量更高。这充分说明研究区内控制油气富集程度的主因是断缝。单独分析平行直线-地堑式组合发现, 同时钻穿该样式中两条断裂的水平井 HH12P60 产量明显高于钻遇一条断裂的 HH12P61 井, 这也是断缝差异性发育的结果。

综上所述, 认为研究区断缝体内主要发育5种组合样式: 帚状-堑垒式、雁列-阶梯式、平行直线-地堑式、拉

分地堑-花状构造以及直线-紧闭平移式组合。断缝作为研究区油气主要的运移通道和聚集空间,是控制油藏分布的关键因素,不同的断缝组合样式控藏机制有所不同。对5种组合样式的控藏机制进行分析,发现雁列-阶梯式组合样式最有利于油气富集,其次是拉分地堑-花状、帚状-堑垒式组合样式,平行直线-地堑式和直线-紧闭平移式组合样式中油气富集程度最差。

4 结论

1)据发育规模、断穿层位、延伸长度及断裂几何动力学特征,镇泾地区发育三级、四级、五级和六级断裂。断缝体内包含五种构造组合样式,分别是帚状-堑垒式、雁列-阶梯式、平行直线-地堑式、拉分地堑-花状和直线-紧闭平移式。

2)基于构造演化史和地层埋藏史分析,通过地震解释和C-O同位素分析技术明确断缝体内主要存在3期断裂构造:印支期、燕山期和喜马拉雅期。其中燕山期是最主要也是最关键的断缝形成期,喜马拉雅期和印支期断裂活动相对较弱。包裹体测温及伊利石定年分析表明长8段油藏主成藏期为120~105 Ma,即早白垩世中晚期。

3)断缝有效沟通油源,改善储层物性。对5种组合样式内断缝的应力状态、砂体发育等因素分析发现,张扭区断缝最为发育,油气富集程度最高,其次是不同走向断裂交会区,压扭区最差。同一样式中,砂体发育与油气富集程度呈正相关关系。综合分析认为雁列-阶梯式组合样式最有利于油气富集,其次是拉分地堑-花状、帚状-堑垒式组合样式,平行直线-地堑式和直线-紧闭平移式组合样式中油气富集程度最差。

参 考 文 献

- [1] 王威,凡睿. 四川盆地北部须家河组“断缝体”气藏特征及勘探意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 541-548.
Wang Wei, fan Rui Characteristics and exploration significance of "fracture body" gas reservoir in Xujiahe Formation in northern Sichuan Basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 46 (5): 541-548
- [2] 黄伟. 基于拓频的多阶复数域各向异性扩散滤波[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
Huang Wei Multi order complex domain anisotropic diffusion filtering based on frequency extension [D]. Chendu: Chengdu University of technology, 2020
- [3] 何发岐,梁承春,陆骋,等. 鄂尔多斯盆地南缘过渡带致密-低渗油藏断缝体的识别与描述[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 710-718.
He Faqi, Liang Chengchun, Lu Cheng, et al. Identification and description of fault-fracture bodies in tight-low permeability oil reservoirs in the transition zone in the southern margin of the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 710-718.
- [4] 李辉,林承焰,马存飞,等. 基于地质模式约束的致密砂岩储层断缝体地质建模[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(1): 38-46.
Li Hui, Lin Chengyan, Ma cunfei, et al. Geological modeling of fracture body in tight sandstone reservoir based on geological model constraints [J]. Daqing Petroleum Geology and development, 2021, 40 (1): 38-46
- [5] 王威,凡睿,黎承银,等. 川东北地区须家河组“断缝体”气藏有利勘探目标和预测技术[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 992-1001.
Wang Wei, fan Rui, Li Chengyan, et al. Favorable exploration targets and prediction technology of "fracture body" gas reservoir in Xujiahe Formation in Northeast Sichuan [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42 (4): 992-1001
- [6] 黄仁春,刘若冰,刘明,等. 川东北通江-马路背地区须家河组断缝体储层特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 873-883.
Huang Renchun, Liu Ruobing, Liu Ming, et al. Reservoir characteristics and genesis of fault fracture body of Xujiahe Formation in Tongjiang malubei area, Northeast Sichuan [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42 (4): 873-883
- [7] 刘振峰,刘忠群,郭元岭,等. “断缝体”概念、地质模式及其在裂缝预测中的应用——以四川盆地川西坳陷新场地区须家河组二段致密砂岩气藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 973-980.
Liu Zhenfeng, Liu Zhongqun, Guo Yuanling, et al. Concept and geological model of "fault fracture body" and its application in fracture prediction--Taking the tight sandstone gas reservoir in the second member of Xujiahe Formation in Xinchang area of West Sichuan depression in Sichuan Basin as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42 (4): 973-980
- [8] 刘君龙,胡宗全,刘忠群,等. 四川盆地川西坳陷新场须家河组二段气藏甜点模式及形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 852-862.
Liu Junlong, Hu Zongquan, Liu Zhongqun, et al. Gas reservoir model and formation mechanism of the second member of Xujiahe Formation in Xinchang, West Sichuan depression, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42 (4): 852-862
- [9] 徐梦龙,何治亮,尹伟,等. 鄂尔多斯盆地镇泾地区延长组8段致密砂岩储层特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 240-247.
Xu Menglong, He Zhiliang, Yin Wei, et al. Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoirs in the 8th member of Yanchang Formation in Zhenjing area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 240-247.
- [10] 贺育超,赵俊兴,关登彬,等. 镇泾地区长8、长6段储层特征及成岩作用对孔隙的改造[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(2): 217-225.
He Yuchao, Zhao Junxing, Guan Dengbin, et al. Reservoir

- characteristics of Chang 8 and Chang 6 members in Zhenjing area and diagenesis-induced porosity modification [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 48(2): 217-225.
- [11] 梁承春,郭景祥. 鄂尔多斯盆地红河油田延长组长8₁小层致密砂岩成岩作用与储层特征[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(1): 57-63.
- Liang Chengchun, Guo Jingxiang. Diagenesis and reservoir characteristics of tight sandstone in Chang 8₁ sublayer of Yanchang Formation, Honghe Oilfield, Ordos Basin [J]. Oil and Gas Geology and Recovery, 2017, 24(1): 57-63.
- [12] 罗衍灵. 鄂尔多斯盆地红河油田长8油藏天然裂缝特征及其对开发的影响[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(3): 52-56.
- Luo Yanling. Characteristics of Natural Fractures in Chang 8 Reservoir in Honghe Oilfield, Ordos Basin and Its Influence on Development [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(3): 52-56.
- [13] 王猛. 鄂尔多斯盆地镇原-泾川地区中生界断裂发育特征[J]. 断块油气田, 2019, 26(2): 142-146.
- Wang Meng. Development characteristics of Mesozoic faults in Zhenyuan-Jingchuan area, Ordos Basin [J]. Fault Block Oil and Gas Fields, 2019, 26(2): 142-146.
- [14] 梁志强. 不同尺度裂缝的叠后地震预测技术研究[J]. 石油物探, 2019, 58(5): 766-772.
- Liang Zhiqiang. Research on post-stack seismic prediction technology for fractures of different scales [J]. Petroleum Geophysical Prospecting, 2019, 58(5): 766-772.
- [15] 王鹏,刘军,顾汉明. 不连续性属性增强技术在顺北地区断控不同尺度裂缝检测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(2): 131-137.
- Wang Peng, Liu Jun, Gu Hanming. Application of discontinuity attribute enhancement technology in detection of fractures at different scales in Shunbei area [J]. Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(2): 131-137.
- [16] 马德波,赵一民,张银涛,等. 最大似然属性在断裂识别中的应用——以塔里木盆地哈拉哈塘地区热瓦普区块奥陶系走滑断裂的识别为例[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(6): 817-825.
- Ma Debo, Zhao Yimin, Zhang Yintao, et al. Application of maximum likelihood attribute in fault identification: Taking the identification of Ordovician strike-slip faults in the Rewapu block, Halahatang area, Tarim Basin as an example [J]. Natural Gas Earth Science, 2018, 29(6): 817-825.
- [17] 李蒙,商晓飞,赵华伟,等. 基于likelihood地震属性的致密气藏断裂预测——以四川盆地川西坳陷新场地区须二段为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(6): 1299-1309.
- Li Meng, Shang Xiaofei, Zhao Huawei, et al. Fault prediction of tight gas reservoirs based on likelihood seismic attributes: Taking the second member of Xu 2 Member, Xinchang area, West Sichuan Depression, Sichuan Basin as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 1299-1309.
- [18] 付兆辉. 垦东凸起及邻区构造特征与油气聚集[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- Fu Zhaohui. Structural characteristics and hydrocarbon accumulation in the Kendong uplift and adjacent areas [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- [19] 刘喜林. 复杂断块区构造组合特征及其对油气的控制[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2014.
- Liu Xilin. Characteristics of tectonic assemblages in complex fault blocks and their control on oil and gas [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [20] 唐照星. 塔里木盆地塔中北坡走滑断裂特征及与油气成藏关系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- Tang Zhaoxing. Characteristics of strike-slip faults on the north slope of Tazhong, Tarim Basin and their relationship with hydrocarbon accumulation [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [21] 石春龙. 巴基斯坦M区块白垩系断裂特征研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- Shi Chunlong. Research on the characteristics of Cretaceous faults in the M block of Pakistan [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [22] 张健. 渤中凹陷断裂体系及其对成藏的控制[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2015.
- Zhang Jian. Fault system in Bozhong sag and its control on accumulation [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [23] 张坦. 川南地区断裂特征与构造样式分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Zhang Tan. Analysis of fault characteristics and tectonic style in southern Sichuan [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [24] 杨文敏. 塔南凹陷断裂特征及其对油气成藏与分布的控制作用[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.
- Yang Wenmin. Characteristics of faults in Tanan Sag and their control on hydrocarbon accumulation and distribution [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.
- [25] 张岳桥,廖昌珍. 晚中生代—新生代构造体制转换与鄂尔多斯盆地改造[J]. 中国地质, 2006, (1): 28-40.
- Zhangyueqiao, Liao Changzhen. Late Mesozoic Cenozoic tectonic regime transformation and Ordos Basin reconstruction [J]. Chinese Geology, 2006, (1): 28-40.
- [26] 刘岩. 低渗储层裂缝特征及其对油气富集的控制作用[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- Liu Yan. Fracture characteristics of low permeability reservoirs and their control on oil and gas enrichment [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [27] 张园园,任战利,何发岐,等. 克拉通盆地构造转折区中-新生界构造特征及其控藏意义——以鄂尔多斯盆地西南部镇泾地区延长组为例[J]. 岩石学报, 2020, 36(11): 3537-3549.
- Zhang Yuanyuan, Ren Zhanli, He Faqi, et al. Meso-Cenozoic tectonic features in the structural turning area of the Craton Basin and its significance for controlling reservoirs: Taking the Yanchang Formation in Zhenjing area in the southwest of the Ordos Basin as an example [J]. Chinese Journal of Petrology, 2020, 36(11): 3537-3549.
- [28] 张园园,任战利,杨桂林,等. 天环坳陷南段中生界断裂特征及其石油地质意义[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 318-328.

- Zhang Yuanyuan, Ren Zhanli, Yang Guilin, et al. Characteristics of Mesozoic faults in southern Tianhuan Depression and their petroleum geological significance [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2021, 50(2): 318-328.
- [29] 刘江斌. 鄂尔多斯盆地西南部三叠系延长组沉积体系研究[D]. 西安:西北大学, 2017.
- Liujiangbin. Study on sedimentary system of Triassic Yanchang Formation in southwest Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwestern University, 2017.
- [30] 邓虎成. 断层共生裂缝系统的发育规律及分布评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- Deng Hucheng. Development law and distribution evaluation of fault coexisting fracture system [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [31] 牛海瑞. 春风油田石炭系火山岩裂缝形成期次及充填特征研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- Niu Hairui. Research on the formation stages and filling characteristics of fractures in Carboniferous volcanic rocks in Chunfeng Oilfield [D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2017.
- [32] 陈刚, 徐黎明, 丁超, 等. 用自生伊利石定年确定鄂尔多斯盆地东北部二叠系油气成藏期次[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 713-719+729.
- Chen Gang, Xu Liming, Ding Chao, et al. Determination of Permian hydrocarbon accumulation period in northeastern Ordos Basin by authigenic illite dating [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 713-719+729.
- [33] 赵彦德, 齐亚林, 罗安湘, 等. 应用流体包裹体和自生伊利石测年重构鄂尔多斯盆地侏罗系油藏烃类充注史[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(6): 1637-1648.
- Zhao Yande, Qi Yalin, Luo Anxiang, et al. Reconstruction of hydrocarbon charging history of Jurassic reservoirs in Ordos Basin by using fluid inclusion and authigenic illite dating [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(6): 1637-1648.
- [34] 王翠丽. 镇泾探区长9油层组裂缝发育特征及分布评价研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- Wang Cuili. Research on the development characteristics and distribution evaluation of fractures in Chang 9 oil-bearing formation in Zhenjing exploration area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [35] 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 Mesozoic hydrocarbon accumulation and tectonic movement in the Ordos Basin [J]. Chinese Journal of Sedimentology, 2010, 28(4): 798-807.
- [36] 任战利, 赵重远, 张军, 等. 鄂尔多斯盆地古地温研究[J]. 沉积学报, 1994, 12(1): 56-65.
- Ren Zhanli, Zhao Chongyuan, Zhang Jun, et al. Paleothermal research in the Ordos Basin [J]. Chinese Journal of Sedimentation, 1994, 12(1): 56-65.
- [37] 任战利, 祁凯, 李进步, 等. 鄂尔多斯盆地热动力演化史及其对油气成藏与富集的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1030-1042.
- Ren Zhanli, Qi Kai, Li Jinbu, et al. Geothermal dynamic evolution history of Ordos basin and its control on hydrocarbon accumulation and enrichment [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1030-1042.
- [38] 孙少华, 李小明, 龚革联. 鄂尔多斯盆地构造热事件研究[J]. 科学通报, 1997, 42(3): 306-309.
- Sun Shaohua, Li Xiaoming, Gong Gelian. Study on tectonic thermal events in the Ordos Basin [J]. Science Bulletin, 1997, 42(3): 306-309.
- [39] 张文正, 杨华, 李剑锋, 等. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用—强生排烃特征及机理分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 289-293.
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Jianfeng, et al. On the leading role of high-quality source rocks in the Chang 7 Member of the Ordos Basin in the accumulation and enrichment of low-permeability oil and gas—Characteristics and mechanism of strong hydrocarbon generation and expulsion [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 289-293.
- [40] Liu X S, Xi S L, Huang D J, et al. Dynamic conditions of Mesozoic petroleum secondary migration, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and development, 2008, 35(2): 143-147.
- [41] Guo Y R, Liu J B, Yang H, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism of low permeable tight lithologic oil fields in the Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4): 447-456.
- [42] 杨伟华. 饶阳凹陷留北地区新近系断裂特征及其控藏作用研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2014.
- Yang Weihua. Research on the characteristics of Neogene faults in Liubei area of Raoyang sag and their control of reservoirs [D]. Dongying: China University of Petroleum(East China), 2014.
- [43] 周延豪. 南堡3区沙河街组断裂特征及控油作用研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2016.
- Zhou Yanhao. Research on the fault characteristics and oil control of Shahejie Formation in Nanpu 3rd District [D]. Dongying: China University of Petroleum(East China), 2016.

(编辑 张亚雄)