

引用格式:尹帅,田涛,李俊鹿,等.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[J].油气地质与采收率,2024,31(1):1-12.

YIN Shuai, TIAN Tao, LI Junlu, et al. Fault-fracture body characteristics and their effect on hydrocarbon distribution of Yanchang Formation in southwestern margin of Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(1): 1-12.

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

尹帅^{1,2}, 田涛³, 李俊鹿⁴, 王瑞飞⁵, 周雪⁶, 李玉蓉⁶, 柳伟明⁶, 李香雪¹, 张磊⁴

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 3. 陕西省煤田地质集团有限公司 自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西 西安 710021; 4. 中国石化华北油气分公司 采油一厂, 甘肃 庆阳 745000; 5. 西安石油大学 石油工程学院, 陕西 西安 710065; 6. 延长油田股份有限公司 志丹采油厂, 陕西 延安 717500)

摘要:鄂尔多斯盆地西南缘断缝体发育, 针对断缝体对延长组油藏甜点分布控制作用的研究有待深化。利用大量的地震及测井解释结果, 从断缝体演化机制角度对断缝体特征进行精细描述, 进而系统探讨断缝体对油气的调控作用。研究表明, 鄂尔多斯盆地西南缘发育直立走滑断裂, 多具有“Y”字型、花状及负花状结构, 且断裂常穿过白垩系底、延安组底、长7油层组底等界面, 向下则插入基底。部分断裂仍具有早期逆断性质, 表明断裂在后期反转程度不彻底。主断裂在不同部位具有不同的形态及偏移量, 剖面上表现为张扭及压扭性质的循环转变, 平面上则表现为不同类型断裂组合形式的交替出现。构建了断缝体中走滑断裂的发育模式, 走滑断裂具有典型的多期活动、继承发育的特征。长8油层组主要发育垂直缝及水平层理缝, 水平层理缝的发育频率为62.5%, 垂直缝的发育频率为37.5%, 且垂直缝含油级别相对较高。裂缝主要发育于分流河道细砂岩。当距主断裂距离大于1.25~1.5 km时, 裂缝发育程度急剧降低, 存在断缝体边界; 在该边界范围内, 厚度小于6 m的单砂体裂缝较为发育, 当单砂体厚度超过6 m, 裂缝发育程度急剧降低。所构建的基于沉积(基础)、构造(主导)及裂缝(见效)的指标体系可以有效预测研究区长8油层组断缝体油藏有利区。

关键词:断缝体; 有利区预测; 走滑断裂; 延长组; 指标体系

文章编号: 1009-9603(2024)01-0001-12

DOI: 10.13673/j.pgre.202305040

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Fault-fracture body characteristics and their effect on hydrocarbon distribution of Yanchang Formation in southwestern margin of Ordos Basin

YIN Shuai^{1,2}, TIAN Tao³, LI Junlu⁴, WANG Ruifei⁵, ZHOU Xue⁶, LI Yurong⁶,
LIU Weiming⁶, LI Xiangxue¹, ZHANG Lei⁴

(1. School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China; 3. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Shaanxi Coal Geology Group Co., Ltd., Xi'an City, Shaanxi Province, 710021, China; 4. First Oil Production Plant, North China

收稿日期: 2023-05-20。

作者简介: 尹帅(1989—), 男, 山东新泰人, 副教授, 博士, 从事深部油气地质理论及应用技术、储层测井评价及岩石力学基础实验方面的教学和科研工作。E-mail: speedysys@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“不同应力系统作用下陆相页岩油储层纳米孔缝变形及扩展微观机理研究”(42302167), 陕西省自然科学基金研究计划项目“鄂尔多斯盆地东缘深部上古生界构造演化及断-缝联合控藏机理研究”(2023-JC-QN-0355), 中国石油化工股份有限公司华北油气分公司项目“断缝体油藏措施效果影响因素分析”(34550319-22-ZC0613-0001-BG01)。

Oil and Gas Branch, SINOPEC, Qingyang City, Gansu Province, 745000, China; 5.School of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an City, Shaanxi Province, 710065, China; 6.Zhidan Oil Production Plant, Yanchang Oilfield Co., Ltd., Yan'an City, Shaanxi Province, 717500, China)

Abstract: Fault-fracture bodies are developed in the southwestern margin of Ordos Basin, and thus, the study on the controlling effect of fracture bodies on sweet spot distribution of Yanchang Formation reservoirs needs to be deepened. In this paper, based on the extensive seismic and logging interpretation results, the characteristics of fault-fracture bodies are described from the point of view of their evolution mechanism, and then the controlling effect of fault-fracture bodies on oil and gas is systematically discussed. The results show that vertical strike-slip faults are developed in the southwest margin of Ordos Basin, with Y-shaped, flower-like, and negative flower-like structures. The faults usually pass through the bottom of Chang 7 Member, the bottom of Yan'an Formation, the bottom of the Cretaceous series, and the basement. Some of the faults retain the early reverse fault properties, indicating that the late inversion degree is not complete. The main fault has different shapes and migrations in different parts, and the section shows the cyclic transformation of tension-torsion and compression-torsion properties. On the plane, different types of fracture combinations appear alternately. The development model of strike-slip faults is established, and the strike-slip faults have typical characteristics of "multi-stage activity and inherited development". Chang 8 Member mainly develops vertical fractures and horizontal bedding fractures. The development frequency of horizontal bedding fractures is 62.5%, while that of vertical fractures is 37.5%. The oil level of vertical fractures is relatively higher. Fractures are mainly developed in fine sandstone in distributary channels. When the distance from the main fault is greater than 1.25-1.5 km, the degree of fracture development decreases sharply, showing a fault-fracture body boundary. In addition, fractures are relatively developed in the single sand body within 6 m from the main fault. When the thickness of the single sand body exceeds 6 m, the degree of fracture development decreases sharply. The study shows that the index system based on sedimentation (foundation), structure (dominant), and fracture (effective) can effectively predict the favorable zones of Chang 8 fault-fracture body reservoir.

Key words: fault-fracture body; favorable zone prediction; strike-slip fault; Yanchang Formation; index system

鄂尔多斯盆地是典型的克拉通盆地,盆地边缘多板块拼接处发育大量走滑断裂,走滑断裂多具有继承性活动特征^[1]。鄂尔多斯盆地周缘走滑断裂系统具有差异,主要走滑断裂体系包括“X”型共轭走滑断裂体系及单剪走滑断裂体系^[2-3]。断裂本质上与构造裂缝具有类似的成因机制且两者相互伴生。断裂及其伴生裂缝是如何影响油气的聚集一直是石油地质科研工作者关心的问题。与此同时,提出“断缝体”的概念,其指与断裂及褶皱相关的具有一定空间展布规模的裂缝型储集体单元^[3-4]。断缝体的断裂性质及规模(断裂长度、断距、位移、厚度等)、断裂开闭性、裂缝发育规模及断缝耦合关系都影响油气储集体的生产及开发效果^[5]。

近十余年来,鄂尔多斯盆地周缘大量的地震、测井、岩心及微观显微数据都揭示了断缝体的存在^[2-6]。地震相干、曲率属性及分频相干方法可以有效识别断距约为10 m的小尺度断裂;常规及特殊测井(如FMI电成像及阵列各向异性测井^[7])联合可以有效识别裂缝;岩心及微观显微镜观察到的裂缝则通常被用于裂缝预测结果的校对。断缝体区的原始母岩被强烈改造,进而加剧了储层物性的非均质性及油气井产能的巨大差异。但并不是所有储层

的物性均会受到影响,即线状展布的断缝体的作用范围具有一定边界。对于一个独立的断缝体,其本质为一个地质力学单元,其作用边界限定了储集体单元的扩展规模。因此,同一个断缝体应作为同一类开发单元来制定相应的开发策略^[2]。通常断缝体边界与断裂延伸形态相关,而与断裂规模无关,这是由于其限定边界与断裂延伸方向平行且通常终止于周围砂体尖灭端。

目前,借助地震空间雕刻技术,对鄂尔多斯盆地西南缘断缝体的三维空间展布已经有了较为清晰的认识^[2,8]。断缝体是沿着各主断裂展布的长条状区域,且通常距断裂两侧600 m范围砂体内部的裂缝最为发育^[2-3]。杨桂林等根据断裂几何学原理将鄂尔多斯盆地西南缘镇泾地区断缝体类型划分为帚状垂垒式、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5类,研究认为雁列阶梯式组合最有利于油气富集^[8]。该研究为鄂尔多斯盆地西南缘断缝体油气勘探指明了方向。然而,随着时间的演化,断缝体内部储层性质极为复杂,这是由于断缝体演化通常伴随着多期断裂及裂缝的活动、储层内部流-固耦合的水岩物理/化学反应(如热演化、应变率等)以及复杂的成岩作用(如断裂涂

抹、压溶、胶结、溶蚀等)^[8-9]。因此,需从不同角度对断缝体特征进行评价,可以为断缝体的油气调控作用提供新的依据。

鄂尔多斯盆地西南缘断裂发育,但是目前尚无基于断缝体演化机制角度对断缝体特征进行描述的相关报道。笔者综合采用构造解析方法及地质力学理论,精细刻画断缝体形成演化机制,包括走滑断裂生长发育机制、断-缝耦合规律,进而得出断缝体油藏受沉积(基础)、构造(主导)及裂缝(见效)三级评价指标综合调控的新认识。该研究成果可以为断缝体区油藏勘探及开发提供一些新的思路。

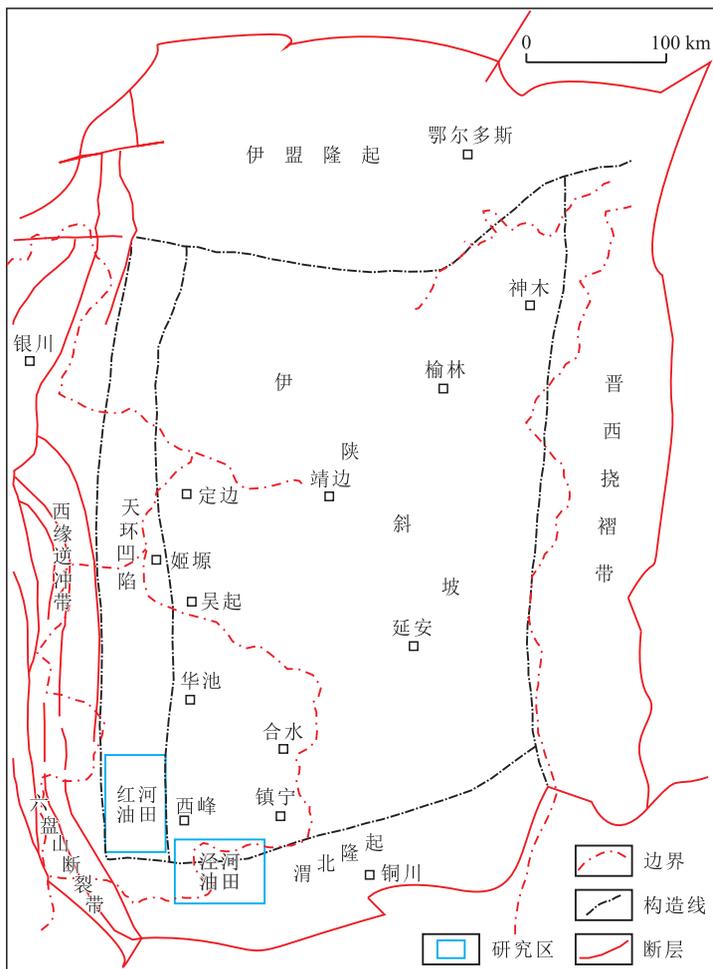
1 区域构造演化背景及断缝体特征

1.1 区域构造演化背景

鄂尔多斯盆地西南缘位于秦岭造山带和贺兰山带交汇的核心区域(图1a),构造活动相对活跃,且受中生代构造叠合的综合作用^[8-9]。结合连井

地震反射波对比剖面,全区追踪对比的地震反射波包括第四系(Q₄)、白垩系志丹群(K_{1z})、安定组(J_{2a})、直罗组(J_{2z})、延安组(J_{1-2y})及延长组(T_{3y})等。研究区中生代发育Q₄-K_{1z},K_{1z}-J_{2a},J_{2z}-J_{1-2y}及J_{1-2y}-T_{3y}共4个不整合面,包括叠合不整合、平行不整合、角度不整合及侵蚀不整合4种类型(图1b)。盆地西南缘中生代构造演化与六盘山弧形断裂带的形成及活动性密切相关,六盘山弧形断裂带的构造活动对研究区具有远程效应^[9-10]。

六盘山弧形冲断体系位于华北地台的西南边缘,是两大构造单元秦祁地槽系和华北地台结合部的一个褶皱构造带^[11]。其主断裂具有逆冲背景,局部断裂呈现“正花状”构造,且具有走滑及正断裂性质,表明断裂在晚期发生了构造负反转^[9]。六盘山弧形断裂沿着近NS及NNW方向延伸,最大水平断距可达12 km,垂直断距为2~3 km,具有明显的分段差异性;主断裂多呈向东凸出的弧形,具有走滑性质。梳理前人对于鄂尔多斯盆地西南缘晚三叠世



a—区域构造位置

地 层						井深/m	
系	统	组	段	油层组	代号		
第四系	全新统				Q ₄	290	叠合不整合
白垩系	下统(志丹群)	罗汉组			K _{1z}	426	
		环河组				769	
		华池组				956	
		洛河-宜君组			1261	平行不整合	
侏罗系	中统	安定组			J _{2a}	1526	
		直罗组			J _{2z}	1698	角度不整合
	下统	延安组			J _{1-2y}	1850	侵蚀不整合
三叠系	上统	延长组		长5 (Ch5)	二段	1871	
				长6 (Ch6)		1967	
				长7 (Ch7)		2195	
				长8 (Ch8)		2234	

b—三叠系及其上覆地层单元划分(HHP7井)

图1 鄂尔多斯盆地西南缘区域构造位置及地层单元划分

Fig.1 Location and stratigraphic unit division of southwestern margin of Ordos Basin

以来的区域构造演化过程,发现近年来的研究普遍认为该地区经历了4次主要的构造活动(表1)^[9-11]。

鄂尔多斯盆地西南缘经历了印支期、燕山期及喜马拉雅期3期构造运动。中生代早期,即晚三叠世一早中侏罗世(距今220~175 Ma),受印支运动影响,鄂尔多斯西南缘发生海退,逐渐转为内陆河湖沉积^[9-10]。该时期为湖盆发育鼎盛时期,发育纸坊组和延长组。中晚三叠世,秦岭地区发生碰撞造山活动,研究区遭受一定程度改造^[11]。晚三叠世末,研究区发生不均匀抬升,上三叠统遭受剥蚀并持续至早侏罗世,缺失下侏罗统^[12]。经过中侏罗统延安组沉积早期的短暂过渡后,湖盆迅速扩张并再一次进入鼎盛期,发育延安组、直罗组和安定组等。

晚侏罗世至早白垩世早期(距今165~118 Ma),研究区持续发生区域构造抬升。晚侏罗世燕山运动主幕,研究区处于三向汇聚背景,受NE向强烈挤压/剪切应力的影响,发育向东的强烈逆冲推覆构造,形成燕山期NWW和NEE向早期逆冲断裂组合,局部区域可能以发育一组为主^[10-11];早白垩世(燕山中晚期),断陷作用造成六盘山盆地形成,局部走滑拉分作用下早期逆冲断裂开始发生构造负反转^[11-12]。

晚白垩世一早新生代(距今95~40 Ma),晚白垩世的区域沉积缺失且该沉积间断状态一直持续至古新世,之后,西南缘剥蚀夷平;在随后的伸展构造活动影响下,断裂不断发生构造负反转^[10-11]。至晚新生代(距今14~7 Ma),主要受NE向挤压-剪切应力及NS向弱拉伸作用,发育一些NE向走滑拉分断裂。从西到东挤压作用减弱但剪切作用逐渐增强。六盘山弧形冲断体系对东部稳定克拉通基底

区具有一定影响,但二者属于2套构造单元系统^[12-13]。六盘山弧形逆冲构造带以发育挤压背景下的逆冲系统为主,向东逐渐向走滑拉分-正断系统过渡。

1.2 断缝体特征

研究区涵盖鄂尔多斯盆地西南缘两大油田,即天环凹陷南端的红河油田和渭北隆起西段的泾河油田。红河油田中生界断裂主要沿NWW和NEE方向展布,具有共轭走滑断裂体系特征;而泾河油田中生界断裂主要沿NEE方向展布,具有单剪走滑断裂体系特征^[12-13]。图2所示为红河油田1291地震测线反射层特征,长7油层组底部的“张家滩”页岩为一个强反射层,可以看出延长组顶面在西部剥蚀强度大,长3油层组向西部迅速减薄;西部区域长8油层组构造起伏较大,向斜窄闭。西部排状背斜的圈闭规模较小,面积主要为3~10 km²;而东部则发育宽缓背斜,圈闭面积主要为5~15 km²,规模较大(图2)。

主断裂及其附近的砂体决定了断缝体的骨架形态。何发岐等利用三维地震雕刻技术恢复了鄂尔多斯盆地西南缘泾河油田JH17工区的断缝体形态(图3)^[2]。断缝体沿着主断裂展布,周围发育一系列次级断裂及裂缝系统。裂缝系统在地震上的响应表现为曲率大于46、相干值低于1^[2]。

2 断-缝耦合关系

2.1 走滑断裂特征

地震剖面上,研究区走滑断裂几乎都是近垂直分布;向上断裂通常穿过T3(白垩系底)、T5(延安组

表1 鄂尔多斯盆地西南缘晚三叠世以来构造活动的热年代学证据

Table1 Thermochronological evidence of tectonic activity since Late Triassic in southwestern margin of Ordos Basin

实验方法	构造活动时间	构造期次	数据来源
	晚三叠世(距今213~194 Ma)		
裂变径迹及AFT热年代学方法	晚侏罗世—早白垩世(距今165~141和115~113 Ma)	3期	文献[9]
	晚白垩世—古新世(距今100~81和66~59 Ma)		
裂变径迹及AFT热年代学方法	晚侏罗世(距今158 Ma)		
	早白垩世(距今106~103 Ma)	4期	文献[10]
	晚白垩世(距今87.2~75.9和65.9~57.3 Ma)		
	新生代		
AFT热年代学方法及热史模拟	晚三叠世—早中侏罗世(距今220~175 Ma)		
	晚侏罗世—早白垩世(距今165~118 Ma)	4期	文献[11]
	晚白垩世—早新生代(距今95~40 Ma)		
	晚新生代(距今14~7 Ma)		

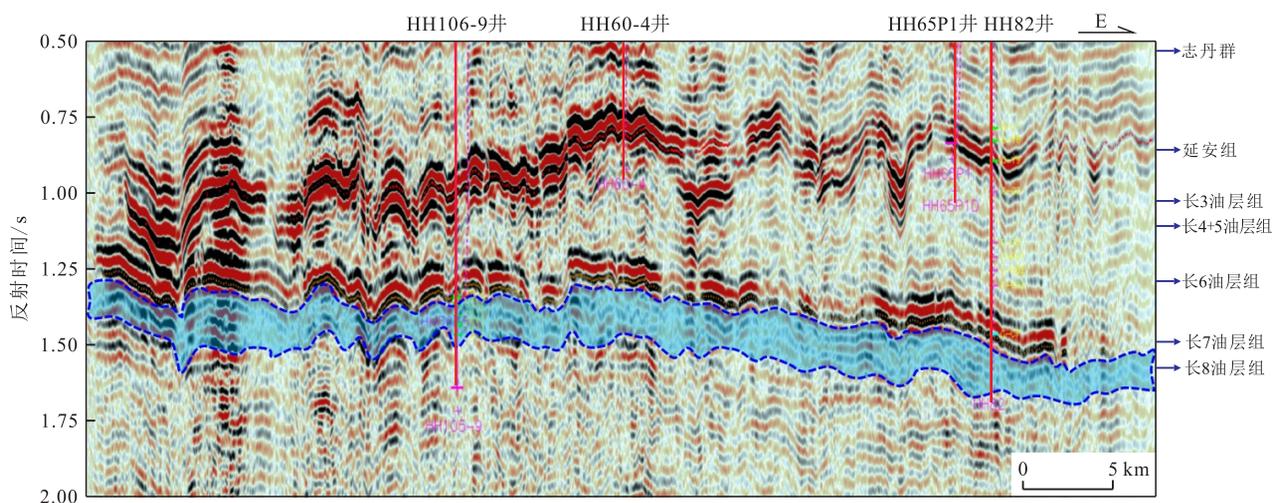


图2 红河油田 1291 地震测线反射层特征

Fig.2 Reflection layer characteristics of 1291 seismic survey line in Honghe Oilfield

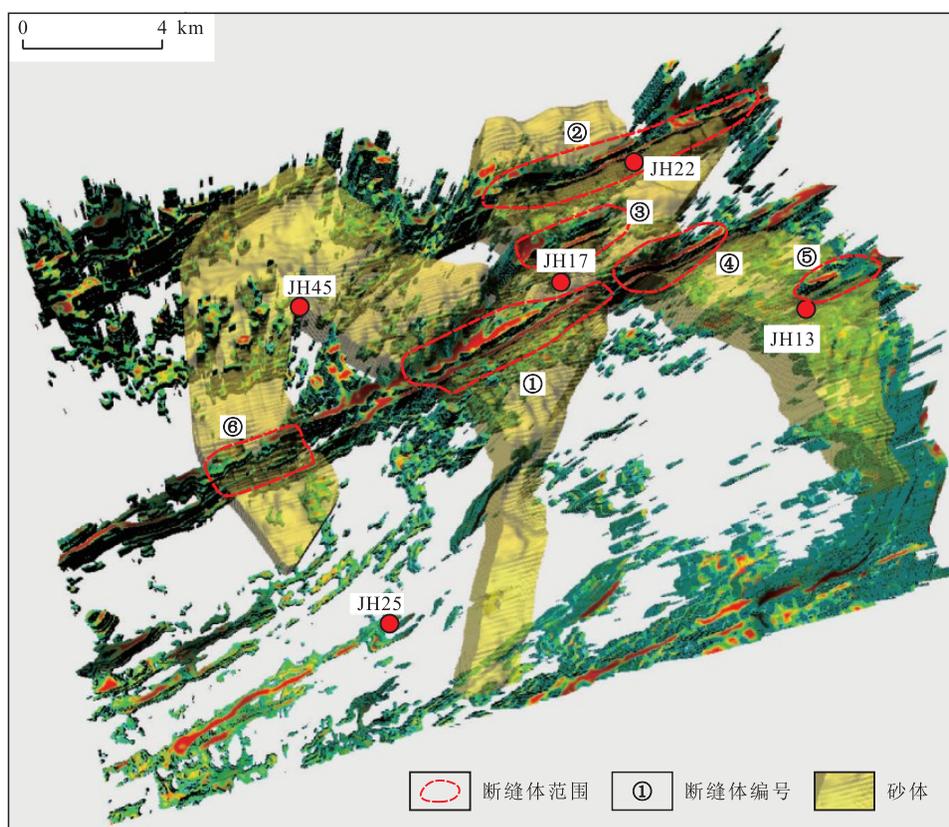


图3 泾河油田 JH17 工区断缝体识别及发育模式^[2]

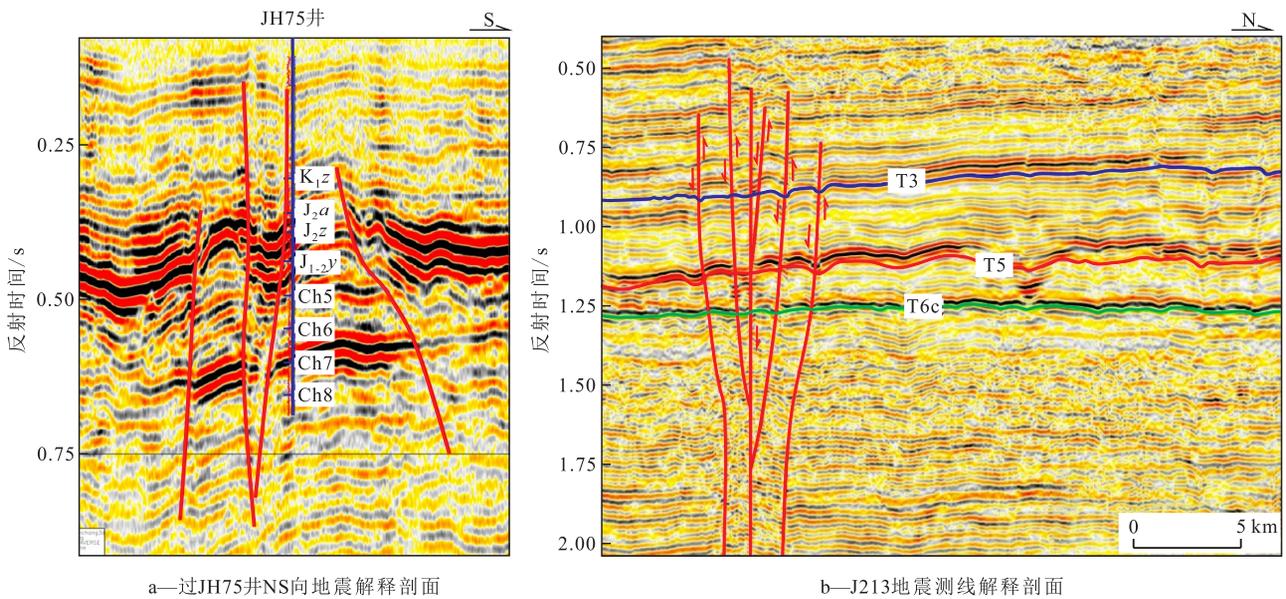
Fig.3 Identification and development model of fault-fracture body in JH17 working area of Jinghe Oilfield^[2]

底)、T6c(长7油层组底)等界面,向下则穿过基底(图4)。断缝体在地震剖面上表现为垂直带状杂乱反射、反射同相轴错断和叠置以及同相轴能量突变。对应的测井响应为深侧向电阻率(*LLD*)、中侧向电阻率(*LLM*)及八侧向电阻率(*LL8*)减小,声波时差(*AC*)增大,岩石密度(*DEN*)减小^[10-11]。

图4a显示研究区中部发育“Y”字形走滑断裂夹持的负起伏区,而“Y”字形断裂外侧发育逆断裂,即“两逆夹走滑”结构,表明断裂在早期具有逆断性

质,后期发生了构造负反转,但反转程度不彻底。整体来看,正、负起伏区可发育于同一层位的走滑带中。图4b显示由一系列走滑断裂形成的花状构造,小规模断裂向下逐渐合并至主干断裂,可组成正/负花状构造,地震剖面上显示为上缓下陡、上宽下窄。

研究区走滑断裂在空间上具有显著的“丝带”效应和“海豚”效应^[14-15]。“丝带”效应表现为走滑断裂在较大尺度上观察是近于直立的,但是沿着断裂



a—过JH75井NS向地震解释剖面 b—J213地震测线解释剖面

图4 鄂尔多斯盆地西南缘走滑断裂地震解释剖面

Fig.4 Seismic interpretation profiles of strike-slip fault in southwestern margin of Ordos Basin

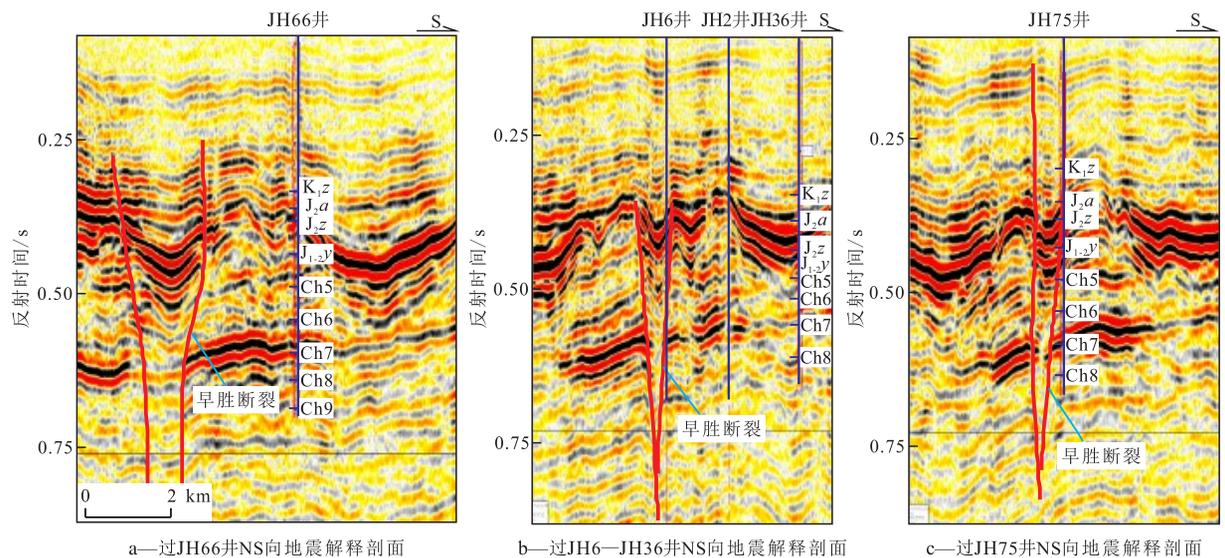
走向其倾向有所变化,如丝带般左右摇摆;“海豚”效应表现为走滑断裂倾向一致的情况下,当在不同横剖面观察时,其正、逆断裂性质发生改变的现象,即相邻剖面的相对升降盘、断裂性质不同。从图5可以看出,研究区早胜断裂在不同部位具有不同的偏移量,如丝带一般发生摆动,断裂走向主要在 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 发生变化;部分断裂在不同部位发生了正、逆断裂性质的变化。

研究区走滑断裂在深部断穿三叠系,浅部最浅终止于第四系全新统,因此走滑断裂带形成时期晚于三叠纪,最晚活动时期早于全新世(图6)。印支期,在NS向弱挤压条件下,在深部先存基底断裂基

础上,走滑断裂发生右行走滑,未明显发育分支断裂;燕山期,NE向构造活动较为强烈,断裂进一步发展,在深层及浅层发育2套分支断裂系统,主要断裂类型为花状及直立断裂;喜马拉雅期,构造活动强度较弱,主断裂在走滑作用下继续扩展,同时产生一些小规模派生及滑脱断裂(图6)。对长8油层组而言,主干断裂指示印支期断裂,派生断裂则为燕山期及喜马拉雅期断裂。研究区走滑断裂具有典型的多期活动、继承发育特征^[15-16]。

2.2 裂缝发育特征

断缝体内部走滑断裂附近区域的裂缝极为发育(图7)。高角度缝及垂直缝是与油气聚集相关的



a—过JH66井NS向地震解释剖面 b—过JH6—JH36井NS向地震解释剖面 c—过JH75井NS向地震解释剖面

图5 鄂尔多斯盆地西南缘沿NS向不同部位早胜断裂剖面特征对比

Fig.5 Comparison of characteristics of Zaosheng fault profiles in different parts along NS direction in southwestern margin of Ordos Basin

最主要的裂缝类型(图 7a—7d)。研究发现垂直缝的缝面多被原油充填,且多为油斑、油浸级别,指示含油性较好(图 7a),垂直缝主要由区域构造剪切作用形成。此外,长 8 油层组还发育水平层理缝(图 7e),其含油级别通常为油斑,含油性明显低于垂直

缝;层理缝主要为具剥离线理的平行层理在沉积和构造应力综合作用下滑动而形成,裂缝面一旦发生活动,通常再无法完全齿合^[15-16]。研究区 14 口井岩心观察统计结果显示,长 8 油层组水平层理缝的发育频率为 62.5%,而垂直缝的发育频率为 37.5%,垂

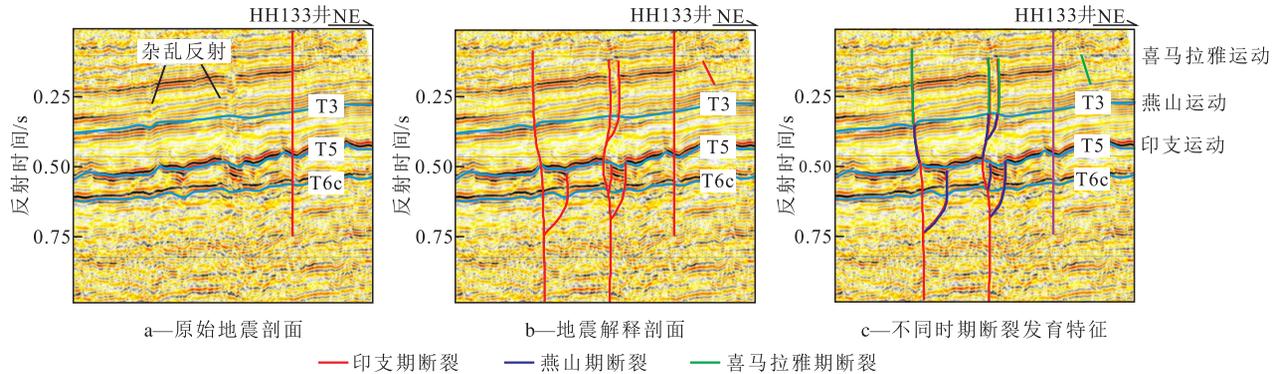


图 6 鄂尔多斯盆地西南缘过 HH133 井地震解释剖面及断裂生长模式

Fig.6 Seismic interpretation profile and fault development mode through Well HH133 in southwestern margin of Ordos Basin



图 7 鄂尔多斯盆地西南缘延长组致密砂岩裂缝发育特征

Fig.7 Fracture development characteristics of tight sandstone of Yanchang Formation in southwestern margin of Ordos Basin

直缝发育程度整体低于层理缝。裂缝主要发育于细砂岩,少量发育于中砂岩及粉砂岩。通常来说,高角度构造缝对油气大规模聚集起到纵向输导作用^[17],但并不是所有的垂直缝都含油,即高角度缝是含油性较好的必要不充分条件。

2.3 断缝体边界

走滑断裂与裂缝具有密切的联系,裂缝为断裂诱导而产生的低级序破裂形式,其分布具有离散性^[17-18]。通常随着距主断裂距离的减小,裂缝的发育程度会呈指数型增长。因此,随着距主断裂距离的增大,断裂对裂缝的影响作用将逐步减弱直至完全消失,该临界距离实质上代表了断缝体的边界^[19-20]。岩心观察结果显示,裂缝主要发育于分流

河道细砂岩,而分流河道中砂岩及分流间湾泥岩的裂缝相对欠发育,薄砂体中裂缝发育程度相对较高^[21-23]。因此,断缝体边界还需考虑砂体发育规模及平面展布。

图8所示为泾河油田及红河油田长8油层组裂缝指数与距主断裂距离的关系。裂缝指数为裂缝段砂岩厚度与砂岩累积厚度的比值,对于泾河油田,当距主断裂距离大于1.25 km,裂缝发育程度急剧降低;而对于红河油田,当距主断裂距离大于1.5 km,裂缝发育程度急剧降低。此外,单砂体厚度对裂缝发育也有一定控制作用,厚度小于6 m的单砂体裂缝较为发育,当单砂体厚度超过6 m,裂缝发育程度急剧降低。

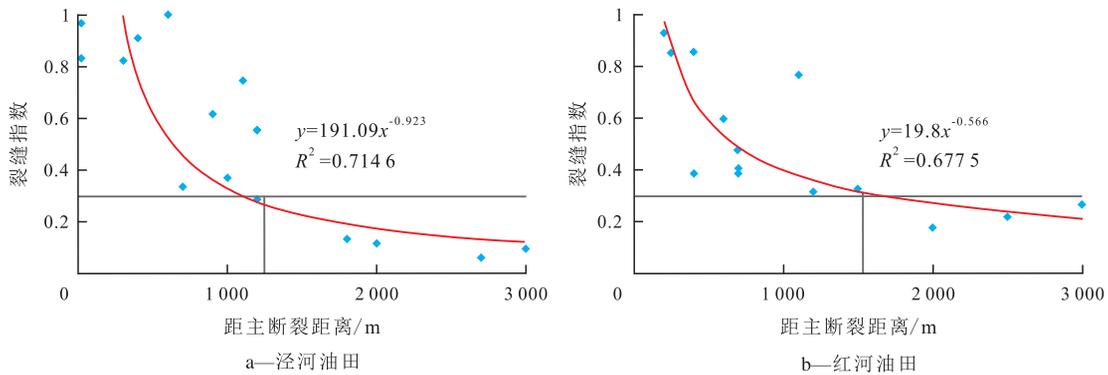


图8 泾河油田及红河油田长8油层组裂缝指数与距主断裂距离的关系

Fig.8 Relationship between fracture index and distances from main fault of Chang 8 Member in Jinghe and Honghe Oilfields

3 断缝体对油藏的调控作用

综合研究提出断缝体对油藏调控作用的三级评价指标分别为沉积(基础)、构造(主导)及裂缝(见效)(表2)。一级评价指标是研究区长8油层组油藏聚集的基础。研究区长8油层组油藏无明显油水界面,多期河道砂体与泥岩相互叠加形成有效岩性圈闭。多期河道即多级砂体,是指在不同沉积时期形成的各单砂体的组合。其随古沉积环境的变化而发生岩性或厚度的变化,直至砂体尖灭^[24-26]。相互叠置的细砂岩具有较好的物性,可形成油气高效运移通道,利于油气大规模聚集。

构造是断缝体区油藏的二级评价指标,目前具有较高产能的井均位于断裂附近(通常距主断裂距离为1.5~2 km),低幅背景条件下断裂一侧宽缓背斜部位可形成断鼻构造,利于油气聚集。同一断裂在不同部位其性质具有差异,主要表现为张扭和压扭性质的转变,因而张扭区和压扭区通常相伴邻近分布。根据断裂组合形式,张扭区断裂组合具有右

表2 鄂尔多斯盆地西南缘断缝体区油藏综合评价指标
Table2 Comprehensive evaluation index of fault-fracture body reservoir in southwestern margin of Ordos Basin

一级评价指标	二级评价指标				三级评价指标					
沉积(基础)	构造(主导)				裂缝(见效)					
油藏控制指标	河道侧翼	构造部位		距主断裂距离	断裂排列方式	裂缝发育程度				
		主河道	背斜				向斜	<2 km	未在主断裂附近	右行右阶
指标权重	0.06	0.04	0.06	0.04	0.08	0.02	0.35	0.05	0.2	0.1
权重加和	0.1		0.6			0.3				

行右阶性质,剖面上则表现为张扭性地堑结构(图9a);而压扭区断裂组合具有右行左阶性质,剖面上则表现为压扭性地垒结构(图9b)。断裂空间分段差异对研究区长8油层组油藏发育特征具有重要的调控作用,张扭区储层物性有一定程度改善或提高,更利于油藏富集,而压扭区储层物性通常较差,不利于油藏富集。张扭区在晚期通常发生较为强烈的构造负反转或伸展活动,基底块断差异升降造

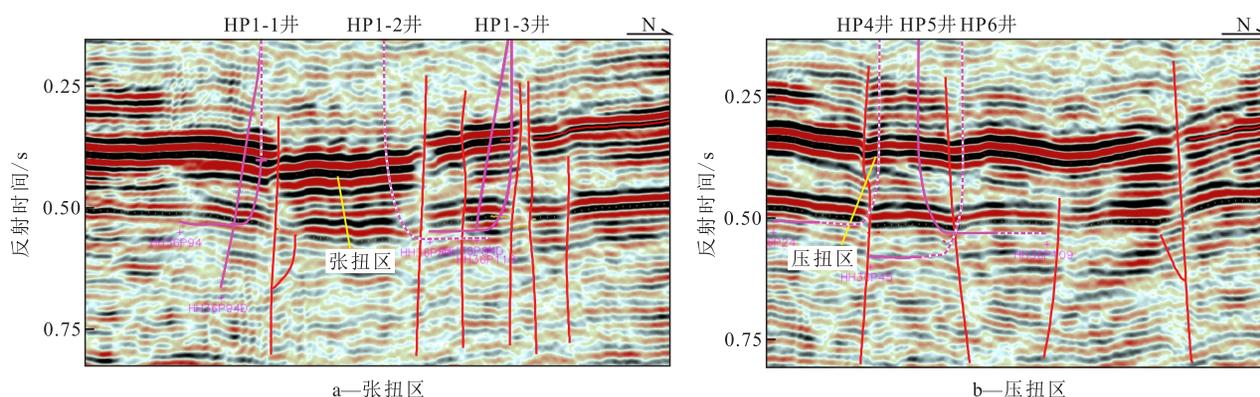


图9 鄂尔多斯盆地西南缘张扭区及压扭区地震剖面特征

Fig.9 Seismic profile characteristics of tension-torsion zone and compression-torsion zone in southwestern margin of Ordos Basin

成断裂两侧地层等高面位置及构造样式具有显著差异。张扭性断裂两侧常表现为背斜宽缓、向斜窄闭的构造特征。一系列走滑断裂将地层有序切割,产生了“两垒夹一堑”或“两堑夹一垒”的规则地质结构,发育堑垒式、阶梯式、地堑式、花状、紧闭平移式5类断缝体结构^[8]。整体而言,断缝体的构造样式、走滑断裂规模、组合形式及分段差异等均对油藏分布具有一定的调控作用(表2)。

裂缝作为三级评价指标对研究区断缝体区油藏发育也有明显的调控作用。研究发现,裂缝指数与目前日产油量具有一定的正相关性(图10)。但其相关性系数相对偏低,表明裂缝虽然对油藏产能具有重要影响,但并不是控制油藏产能的唯一因素^[27-31]。研究区延长组油藏的产能还受断裂发育规模、组合类型及工程施工等因素影响。

通过沉积、构造及裂缝综合研究,对研究区长8油层组油藏产能三级评价指标及权重进行赋值,结果(表2)表明,构造是断缝体区油藏调控的主导因素,该评价方案综合考虑了构造部位、距主断裂距离及断裂排列方式。定义油藏综合评价指数(P)为

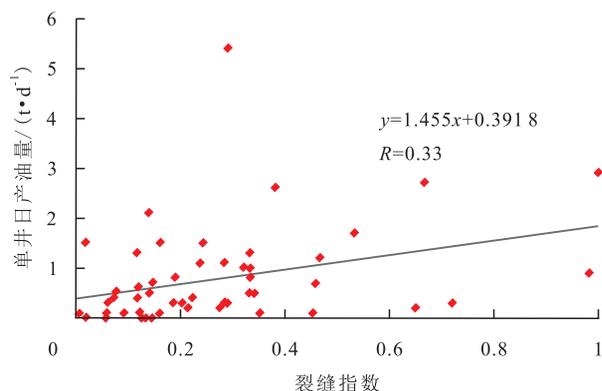


图10 鄂尔多斯盆地西南缘长8油层组裂缝指数与单井日产油量的关系

Fig.10 Relationship between fracture index and daily oil production of single well of Chang 8 Member in southwestern margin of Ordos Basin

各匹配项要素权重的加和(表2),通过将综合评价指数 P 与单井实际产能对比分析发现,当 $P \leq 0.4$ 时通常对应低产或无效井(不匹配);当 $0.4 < P \leq 0.6$ 时单井产能较为稳定(匹配);而当 $P > 0.6$ 时通常对应高产井(强匹配)。

由过研究区P1—P5井长8₁¹—长8₁²油藏剖面(图11)可以看出,从沉积角度分析,P1和P5井区为分流河道中部砂体,P2,P4和P3井区为河道侧翼,且P3井区砂体逐渐尖灭,主要发育薄砂体(图11)。P1,P3和P4井区产能较好,这些区域既有主河道,也有河道侧翼。从断裂组合类型角度分析,该剖面断裂组合类型包括相间分布的右行右阶式及右行左阶式2种。右行右阶式断裂组合区的P1,P3和P4井的产能较好,这3口井均靠近主断裂,沟通油源利于成藏;P3和P4井裂缝较为发育,裂缝指数均大于0.4,而其他井的裂缝不发育。P3和P4井产能最高,裂缝促进了油气聚集。虽然P3井位于构造低部位,但其产能依然较高,说明构造低部位薄砂体油藏的勘探不容忽视。在良好油源及储层配置条件下,低部位薄砂体裂缝较发育,也可以成藏,特别对于靠近半深湖-深湖区烃源岩的“凹中隆”构造要引起重视,其为“近源找油”的重点勘探区域。位于右行左阶式断裂组合区的P2和P5井的产能较低。根据表2评价指标及其组合方案,P1—P5井的 P 值分别为0.65,0.4,0.71,0.65和0.4。P1,P3和P4井为高产井,其 P 值均高于0.6,综合评价指数与产能具有良好的匹配度。值得注意的是,P3井虽然位于构造低部位且仅发育薄砂体,但裂缝发育、含油度高,位于右行右阶区,良好的构造-裂缝配置弥补了薄砂体及低部位的劣势,也能取得良好的开发效果。目前来看,所制定的鄂尔多斯盆地西南缘长8油层组断缝体区油藏综合评价指标体系是有效可行的,大大提高了对于断缝体油藏有利区的优选能力。

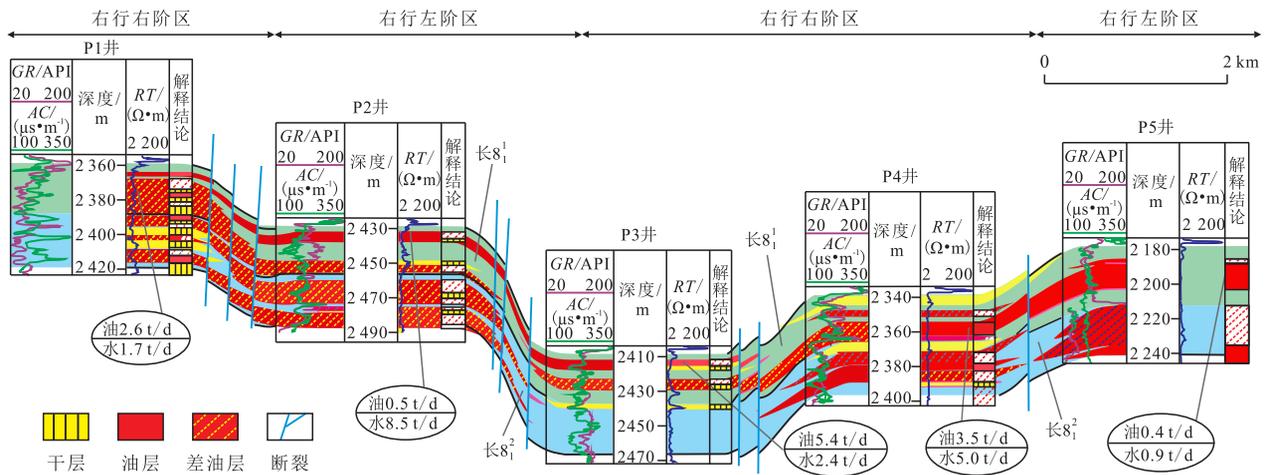


图 11 鄂尔多斯盆地西南缘过 P1—P5 井长 8₁¹—长 8₂² 油藏剖面
 Fig.11 Oil reservoir profile of Chang 8₁¹-Chang 8₂² members through wells P1-P5 in southwestern margin of Ordos Basin

4 结论

通过研究精细刻画了鄂尔多斯盆地西南缘延长组断裂样式及发育特征,主要发育直立走滑断裂,断裂多具有“Y”字型、花状及负花状结构,且断裂常穿过 T3, T5 和 T6c 等界面,向下则断穿基底。部分断裂保留了早期逆断性质,表明后期反转程度不彻底。主断裂在不同部位具有不同的形态及偏移量,剖面上表现为张扭及压扭性质的循环转变,平面上则表现为不同断裂组合类型的交替出现。进而,阐明了该地区断缝体走滑断裂发育模式,具有典型的多期活动、继承发育的特征。所构建的走滑断裂生长发育模式在鄂尔多斯盆地西缘具有普适性,而单条走滑断裂的旋转性质仍为研究难点。此外,本研究阐明了断缝体走滑断裂与裂缝的耦合关系,平面上当距主断裂距离为 1.25 ~ 1.5 km 时,裂缝发育程度急剧降低,因而存在断缝体边界;纵向上,断缝体边界范围内,当单砂体厚度小于 6 m 时裂缝较发育,而当单砂体厚度超过 6 m,裂缝发育程度急剧降低。进而提出长 8 油层组断缝体油藏三级评价指标,即沉积(基础)、构造(主导)及裂缝(见效)。该指标体系是在总结前人诸多关于断缝体研究成果认识基础上首次提出,对制定断缝体油藏勘探开发策略、提高采收率具有重要意义。笔者制定的基于沉积-构造-裂缝三级指标的断缝体油藏综合评价指标体系可以有效指导该类区域的油气勘探开发。

参考文献

[1] GUO R, XIE Q, QU X, et al. Fractal characteristics of pore-throat structure and permeability estimation of tight sandstone

reservoirs: A case study of Chang 7 of the Upper Triassic Yan-chang Formation in Longdong area, Ordos Basin, China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 184: 106555.

[2] 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):710-717.

HE Faqi, LIANG Chengchun, LU Cheng, et al. Identification and description of fault-fracture bodies in tight and low permeability reservoirs in transitional zone at the south margin of Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 710-717.

[3] 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——以四川盆地川西拗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):973-979.

LIU Zhenfeng, LIU Zhongqun, GUO Yuanling, et al. Concept and geological model of fault-fracture reservoir and their application in seismic fracture prediction: A case study on the Xu2 Member tight sandstone gas pool in Xinchang area, Western Sichuan Depression in Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 973-979.

[4] 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 of Xujiahe Formation fault-fracture reservoirs in the northern Sichuan Basin and its exploration significance [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2019, 46(5): 541-548.

[5] PEI Y, PATON D, KNIPE R, et al. A review of fault sealing behaviour and its evaluation in siliciclastic rocks [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 150: 121-138.

[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):873-881.

HUANG Renchun, LIU Ruobing, LIU Ming, et al. Reservoir characteristics and origin of fault fracture of Xujiahe Formation

- in Tongjiang-Mabei area, northeast Sichuan [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4): 873-881.
- [7] 尹帅,孙晓光,邬忠虎,等.鄂尔多斯盆地东北缘上古生界构造演化及裂缝耦合控气作用[J].*中南大学学报:自然科学版*, 2022, 53(9): 3 724-3 736.
- YIN Shuai, SUN Xiaoguang, WU Zhonghu, et al. Coupling control of tectonic evolution and fractures on the Upper Paleozoic gas reservoirs in the northeastern margin of the Ordos Basin [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2022, 53(9): 3 724-3 736.
- [8] 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): 1 382-1 394.
- YANG Guilin, REN Zhanli, HE Faqi, et al. Development characteristics and hydrocarbon enrichment law of faulted fractures in Zhenjing area, southwest margin of Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1 382-1 394.
- [9] 陈刚,孙建博,周立发,等.鄂尔多斯盆地西南缘中生代构造事件的裂变径迹年龄记录[J].*中国科学:D辑 地球科学*, 2007, 37(1): 110-118.
- CHEN Gang, SUN Jianbo, ZHOU Lifa, et al. Fission track age records of Mesozoic tectonic events in the southwestern margin of Ordos Basin [J]. *Science in China: Series D Earth Sciences* 2007, 37(1): 110-118.
- [10] 马静辉,何登发,开百泽,等.贺兰山构造带构造—地层层序及构造演化[J].*地质科学*, 2020, 55(3): 852-876.
- MA Jinghui, HE Dengfa, KAI Baize, et al. Tectono-stratigraphic sequence and tectonic evolution in the Helanshan Mountains tectonic belt [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55(3): 852-876.
- [11] 彭恒,刘显阳,刘池洋,等.鄂尔多斯盆地西南缘中生代中晚期构造体制转化过程及其动力学背景[J].*地质学报*, 2022, 96(2): 387-397.
- PENG Heng, LIU Xianyang, LIU Chiyang, et al. Spatial-temporal evolution and the dynamic background of the translation of Mid-Late Mesozoic regimes of the southwest Ordos Basin margin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(2): 387-397.
- [12] 包洪平,郭玮,刘刚,等.鄂尔多斯地块南缘构造演化及其对盆地腹部的构造—沉积分异的效应[J].*地质科学*, 2020, 55(3): 703-725.
- BAO Hongping, GUO Wei, LIU Gang, et al. Tectonic evolution in the southern Ordos block and its significance in the tectono-depositional differentiation in the interior of the Ordos Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55(3): 703-725.
- [13] 何登发,包洪平,开百泽,等.鄂尔多斯盆地及其邻区关键构造变革期次及其特征[J].*石油学报*, 2021, 42(10): 1 255-1 266.
- HE Dengfa, BAO Hongping, KAI Baize, et al. Critical tectonic modification periods and its geologic features of Ordos Basin and adjacent area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(10): 1 255-1 266.
- [14] 冯烁,李胜利,于兴河,等.四级层序格架内浊流沉积特征及演化模式——以鄂尔多斯盆地镇泾地区三叠系延长组7段为例[J].*石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 859-875.
- FENG Shuo, LI Shengli, YU Xinghe, et al. Sedimentary characteristics and evolution model of turbidites within a fourth-order sequence stratigraphic framework: A case study of the Triassic Chang 7 Member in Zhenjing area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 859-875.
- [15] SUN T, FU G, WANG F, et al. Control effect of transporting ridge in hydrocarbon accumulation in uplift area outside of source area: A case study of Fuyu oil layer in Xingbei Region, Daqing placanticline [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2014, 45(12): 4 308-4 316.
- [16] 尹帅,丁文龙,林利飞,等.鄂尔多斯盆地西部志丹—吴起地区延长组裂缝特征及其控藏作用[J].*地球科学*, 2023, 48(7): 1-10.
- YIN Shuai, DING Wenlong, LIN Lifei, et al. Characteristics and controlling effect on hydrocarbon accumulation of fractures in Yanchang Formation in Zhidan-Wuqi Area, Western Ordos Basin [J]. *Earth Science*, 2023, 48(7): 1-10.
- [17] 尹帅,邬忠虎,吴晓明,等.鄂尔多斯盆地陇东洪德地区侏罗系延安组油藏富集规律研究[J].*石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1 167-1 179.
- YIN Shuai, WU Zhonghu, WU Xiaoming, et al. Oil enrichment law of the Jurassic Yan'an Formation, Hongde block, Longdong area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1 167-1 179.
- [18] YUAN Hui, YIN Shuai, DONG Li, et al. Restoration of the pre-Jurassic paleogeomorphology and its control on hydrocarbon distribution in western Ordos Basin [J]. *Energy Geoscience*, 2022, 3(4): 485-494.
- [19] 何登发,孙方源,翟咏荷,等.鄂尔多斯盆地西缘石沟驿向斜的形成演化与致密砂岩气成藏模式[J].*石油与天然气地质*, 2021, 42(2): 370-387.
- HE Dengfa, SUN Fangyuan, ZHAI Yonghe, et al. Syncline development and tight sandstone gas accumulation model in Shigouyi area at western margin of Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(2): 370-387.
- [20] 欧阳征健,陈洪德,冯娟萍.鄂尔多斯盆地西缘中南段构造特征与演化[J].*现代地质*, 2012, 26(4): 691-695.
- OUYANG Zhengjian, CHEN Hongde, FENG Juanping. Structural characters and evolution of the mid-south section at the west margin of Ordos Basin [J]. *Geoscience*, 2012, 26(4): 691-695.
- [21] 沈骋,范宇,曾波,等.渝西区块页岩气储层改造优化对策与适应性分析[J].*油气地质与采收率*, 2022, 29(2): 131-139.
- SHEN Cheng, FAN Yu, ZENG Bo, et al. Optimization strategies and adaptability analysis of shale gas reservoir stimulation in western Chongqing Block [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(2): 131-139.
- [22] 尹帅,丁文龙,王凤琴,等.沁水盆地南部构造负反转、应力机制及油气意义[J].*成都理工大学学报:自然科学版*, 2017, 44(6): 676-690.
- YIN Shuai, DING Wenlong, WANG Fengqin, et al. Stress mechanism of negative inversion structures and its implication for oil and gas in Southern Qinshui Basin, China [J]. *Journal of*

- Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2017, 44(6): 676-690.
- [23] 李军亮. 柴北缘马海东地区元古界基岩储层发育特征及控制因素[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(2): 15-22.
- LI Junliang. Characteristics and controlling factors of reservoirs in Proterozoic bedrock in Mahaidong area, northern margin of Qaidam Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(2): 15-22.
- [24] 高毅, 林立飞, 尹帅, 等. 致密油储层地应力特征及其对物性的影响——以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 250-258.
- GAO Yi, LIN Lifei, YIN Shuai, et al. Characteristics of in situ stress of tight oil reservoirs and its influence on petrophysical properties: a case study of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(2): 250-258.
- [25] 尹帅, 李爱荣, 陈梦娜, 等. 强变形区走滑断裂带伸展—聚敛应力效应构造解析及控气作用[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(11): 1568-1574.
- YIN Shuai, LI Airong, CHEN Mengna, et al. Stretch-convergence stress effect tectonic analysis and gas controlling of strike-slip fault zone in strong deformed zone [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(11): 1568-1574.
- [26] 李斌, 赵星星, 邬光辉, 等. 塔里木盆地塔中II区奥陶系油气差异富集模式[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 308-320.
- LI Bin, ZHAO Xingxing, WU Guanghui, et al. Differential hydrocarbon accumulation model of the Ordovician in Tazhong II block, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 308-320.
- [27] 王香增, 张建锋, 郝世彦. 延安地区陆相页岩气勘探开发关键技术[J]. 非常规油气, 2023, 10(1): 1-10.
- WANG Xiangzeng, ZHANG Jianfeng, HAO Shiyan. Key technologies of continental shale gas exploration and development in Yan'an Area [J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(1): 1-10.
- [28] 胡浩浩, 鞠玮, 郭伟, 等. 川南海坝区块页岩气储层裂缝发育特征与预测[J]. 非常规油气, 2023, 10(1): 61-68.
- HU Haohao, JU Wei, GUO Wei, et al. Development characteristics and prediction of natural fractures within shale gas reservoirs, Haiba Block of southern Sichuan Basin [J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(1): 61-68.
- [29] 尹帅, 刘翰林, 何建华, 等. 动静态地质力学方法约束的致密油砂岩地应力综合评估[J]. 地球科学进展, 2023, 38(12): 1-10.
- YIN Shuai, LIU Hanlin, HE Jianhua, et al. Comprehensive geostress assessment of tight oil sandstones constrained by dynamic and static geomechanics [J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(12): 1-10.
- [30] 郭旭升, 胡东风, 俞凌杰, 等. 页岩自封闭性与页岩气保存的微观机理研究[J]. 石油实验地质, 2023, 45(5): 821-831.
- GUO Xusheng, HU Dongfeng, YU Lingjie, et al. Study on the micro mechanism of shale self-sealing and shale gas preservation [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(5): 821-831.
- [31] 王勇, 熊伟, 秦峰, 等. 碳酸盐岩地层断裂结构特征及油气地质意义——以青州云门山地区下古生界断裂为例[J]. 断块油气田, 2023, 30(5): 751-757.
- WANG Yong, XIONG Wei, QIN Feng, et al. Fault structure characteristics of carbonate strata and petroleum geological significance: a case study of Lower Paleozoic fault in Yunmenshan area of Qingzhou [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2023, 30(5): 751-757.

编辑 邹澍滢