

刘卫彬,张世奇,徐兴友,等.断层相关裂缝的发育模式及分布预测——以东濮凹陷沙三段为例[J].地球科学与环境学报,2018,40(3):308-321.

LIU Wei-bin, ZHANG Shi-qi, XU Xing-you, et al. Development Model and Prediction of Fault-related Fractures—A Case Study of the Third Member of Shahejie Formation in Dongpu Depression[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(3): 308-321.

断层相关裂缝的发育模式及分布预测 ——以东濮凹陷沙三段为例

刘卫彬¹, 张世奇², 徐兴友¹, 周新桂¹, 陈 珊¹, 白 静¹, 李世臻¹

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029; 2. 中国石油大学(华东)

地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘 要:低孔低渗砂岩是东濮凹陷沙三段的主要储层,储层中与断层相关的裂缝十分发育,是形成优质储层甜点区的重要因素。为阐明断层相关裂缝的发育模式和分布规律,利用大量岩芯、地震、成像测井及实验分析等资料,对东濮凹陷沙三段储层中的断层相关裂缝基本特征、主控因素、发育模式及油气地质意义进行了研究,并利用断地比定量预测了裂缝的分布规律。结果表明:东濮凹陷沙三段断层相关裂缝主要走向为 NNE 向、NE 向,形成于沙三晚期和东营晚期,与主控断层在力学性质和形成时间上具有一致性;断层相关裂缝的发育程度随着距断层距离的增大呈指数递减,且断层面上盘裂缝线密度要高于下盘;裂缝的发育程度和裂缝带宽度与主控断层的规模成正相关关系;断层相关裂缝可显著提高储层的物性和含油性;断地比大于 10 的区域为裂缝发育区;采用断地比参数法预测出 5 个致密储层裂缝甜点区。

关键词:油气地质;断层;裂缝;主控因素;断地比;致密砂岩;沙三段;东濮凹陷

中图分类号:P542;TE121.2

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2018)03-0308-14

Development Model and Prediction of Fault-related Fractures

—A Case Study of the Third Member of Shahejie Formation in Dongpu Depression

LIU Wei-bin¹, ZHANG Shi-qi², XU Xing-you¹, ZHOU Xin-gui¹,

CHEN Shan¹, BAI Jing¹, LI Shi-zhen¹

(1. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China; 2. School of Geosciences,

China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China)

Abstract: The sandstone in the third member of Shahejie Formation characterized by low porosity and low permeability is the main reservoir in Dongpu depression, in which the fault-related fractures are well-developed; the fracture is an important factor for the formation of favorable reservoirs. In order to illustrate the development model and distribution law of fault-related fractures, the characteristics, main controlling factors, development model and petroleum geological significance of fault-related fractures were analyzed by utilizing the core overview, seismic interpretation, image logging and experiment; and then, the fault-stratum ratio was raised to forecast the distribution law of fault-related fractures. The results show that the fault-

收稿日期:2018-01-03;修回日期:2018-03-05

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家科技重大专项项目(2011ZX05006-004);中国地质调查局地质调查项目(DD20160165)

作者简介:刘卫彬(1991-),男,河南周口人,工程师,E-mail:ogslwb@126.com。

related fractures are formed mostly towards NNE and NE; the late stage of the third member of Shahejie Period and the late stage of Dongying Period are their major formation periods, which are consistent with mechanical property and formation period of faults; the development of fault-related fractures decreases exponentially with the distance away from the faults as a whole, and the density of fractures in the hanging wall is greater than that in the footwall; the width and intensity of fault-related fractures have a positive correlation with the scale of faults; fault-related fractures can improve the property, oil-bearing probability and capacity of the low-porosity and low-permeability reservoir dramatically; the area with fault-stratum ratio greater than 10 defined is the favorable area of fault-related fractures, and five favorable reservoir areas are predicted by using fault-stratum ratio parameter method.

Key words: petroleum geology; fault; fracture; main controlling factor; fault-stratum ratio; tight sandstone; the third member of Shahejie Formation; Dongpu depression

0 引言

天然裂缝是沉积盆地中广泛分布的一种重要地质构造,对油气勘探和油气藏开发具有极其重要的意义^[1-6]。目前,中国各大含油气盆地浅层油气资源已被很大程度开发,中深部地层逐渐成为增储上产的重要勘探领域^[7]。由于中深部储层埋深较大,压实作用强烈,成岩程度高,易形成以低孔低渗为特征的致密储层,天然裂缝则成为该类储层主要的储存空间和渗流通道^[8-11]。很多学者认为裂缝的发育可以增大储层的储集空间,改善储层有效渗流面积和渗流能力,是致密储层中形成优质储层的主要原因之一^[12-16]。同时,裂缝又是排烃及油气二次运移的主要通道,是中深部油气富集成藏的重要因素^[17]。国内外勘探成果也证实,裂缝型油气藏在已发现的油气藏中占比逐渐增大,探明储量和实际产量也逐年上升^[18-19]。由此可见,天然裂缝在当今世界油气勘探开发中发挥着重要作用,是中深部油气勘探的重点攻关领域。

由于天然裂缝成因复杂,分布不规则,非均质性强,使得裂缝型油气藏的开发成为世界性难题^[20-23]。近年来,随着裂缝型油气藏的不断开发,寻找与高陡构造伴生的大型裂缝系统(褶皱相关裂缝)越来越难,而在褶皱作用弱的致密储层内部,与断层相关的裂缝甜点区则成为勘探的重要新目标。前人对于断层相关裂缝做过一系列定性和定量的研究工作。Cmexob认为随着距断层距离的增大,裂缝发育密度降低^[24];Nelson研究认为断层相关裂缝的密度是岩性、断层面位移、断层面距离、埋藏深度和断层类型等构成的函数^[25]。此后,国内外学者运用断裂效应法、断层应力场强度因子法、F指标法、VSD技

术、古应力场数值模拟、有限元数值模拟等方法对储层裂缝进行评价^[26-32]。这些评价方法从不同角度为中国裂缝型油气藏的勘探开发提供了有效的技术支撑,但由于断层相关裂缝本身的复杂性,不同地区地质条件和勘探程度也不尽相同。目前,尚无一种能够完全有效评价各类型断层相关裂缝的统一技术方法。因此,从不同角度、不同思路去探索定量表征断层相关裂缝分布规律的方法,仍然是今后断层相关裂缝研究的重点方向。

东濮凹陷是中国东部富含油气的盆地之一,以“小而肥”为特点。东濮凹陷的主力产层是古近系沙三段储层,储层岩性以粉砂岩、泥质粉砂岩为主,孔隙度平均为8.4%,渗透率平均为 $9.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为致密砂岩储层,目前面临油气增产难题^[33]。区内发育多条NNE向正断层,岩芯观察及测井资料显示断层附近裂缝较为发育,且与油气的富集具有很好的相关性。然而,前人对东濮凹陷断层相关裂缝的研究十分缺乏,对其分布规律更无针对性预测。基于此,本文利用大量岩芯、地震、测井等资料分析断层相关裂缝发育特征,探讨断层相关裂缝的成因机制和发育模式,同时利用断地比参数法预测断层相关裂缝的分布规律,为油田优质储层甜点区的勘探部署提供依据,也为高效合理开发此类裂缝型油气藏提供科学支撑。

1 裂缝发育特征

通过对东濮凹陷35口取芯井岩芯和薄片资料观察分析,沙三段地层主要发育两种类型的裂缝:一类是与构造作用相关的断层相关裂缝和区域应力型裂缝;另一类是与超压作用、成岩作用相关的超压裂缝、成岩裂缝等非构造裂缝(图1)。其中,以断层相

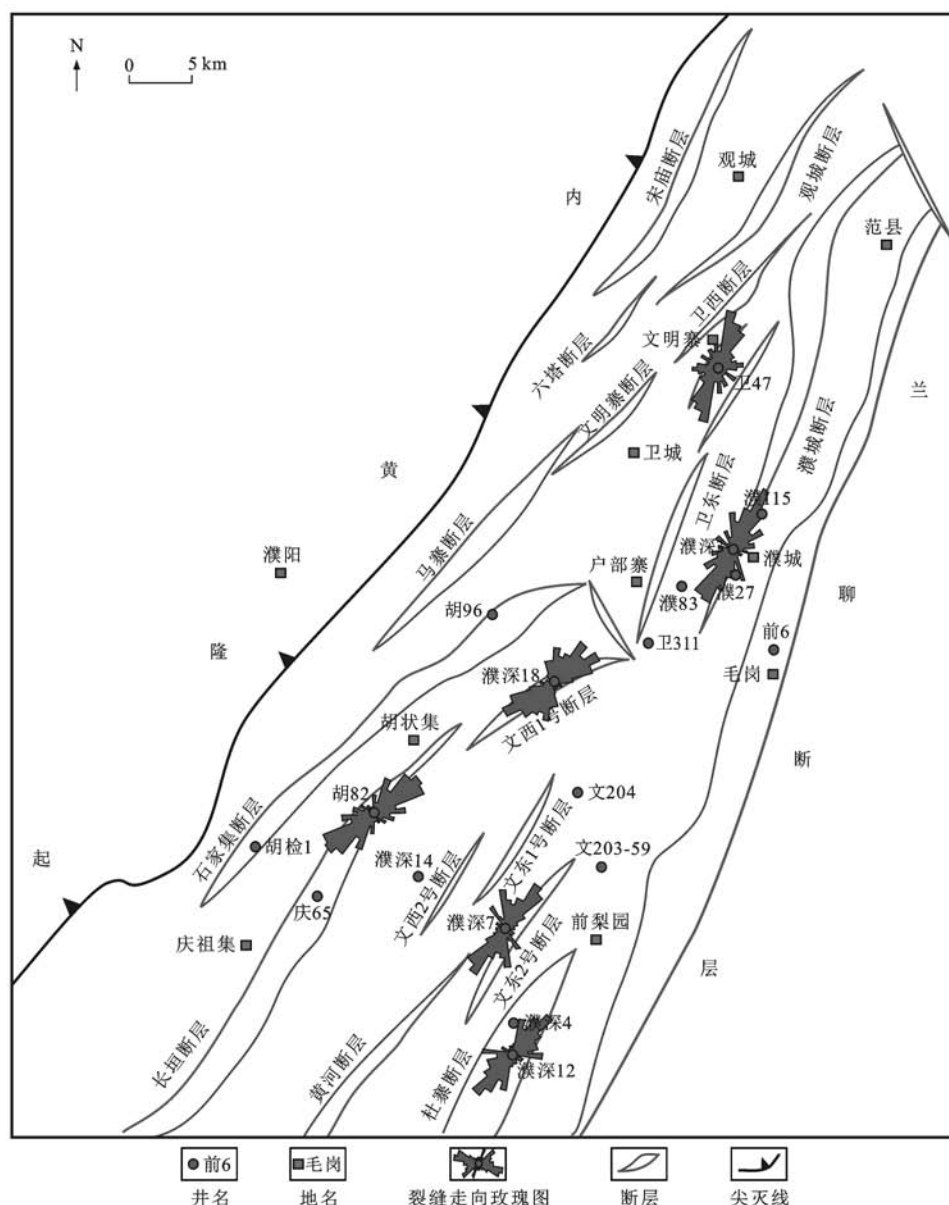


图1 东濮凹陷沙三段断层分布及裂缝发育规律

Fig. 1 Distribution of Faults and Development Law of Fractures in the Third Member of Shahejie Formation, Dongpu Depression

关裂缝占比最高,高达 82%。本次研究选取断层相关裂缝作为具体对象,其可分为剪切裂缝、张性裂缝和张剪裂缝 3 种基本类型(图 2)。其中,剪切裂缝最为发育,约占 78%;其次为张性裂缝,占 18%;张剪裂缝最少,约占 4%。通过对裂缝的倾角进行统计,发现其倾角多分布在 $60^{\circ} \sim 85^{\circ}$,以高角度剪切裂缝为主[图 2(d)],约占 63%。这一现象说明沙三段裂缝的形成主要靠构造挤压应力作用,容易形成高角度剪切裂缝。岩芯古地磁定向及成像测井资料表明,东濮凹陷沙三段储层中主要发育 NNE 向、NE 向 2 组断层相关裂缝,其对应的优势方位分别是 29° 和 47° ,而 NW 向裂缝不发育(图 1)。

根据岩芯测量和成像测井计算结果,沙三段断

层相关裂缝长度主要为 $0.1 \sim 5.0$ m,平均 1.27 m;线密度为 $1 \sim 5$ 条 \cdot m^{-1} ,平均 4.3 条 \cdot m^{-1} ;校正后的地下开度多集中在 $0.2 \sim 1.4$ mm,平均 0.72 mm。裂缝的充填程度较低,未充填裂缝占 37%,半充填裂缝占 22%,全充填裂缝占 41%,充填物以方解石为主[图 2(e)],次为泥质[图 2(f)]、硬石膏[图 2(g)],裂缝的整体有效性较好。裂缝发育处储层物性明显较好,常见油气运移痕迹[图 2(h)]和饱含油级别砂岩[图 2(i)]。而且,运用 Monte Carlo 多次逼近法求得东濮凹陷沙三段断层相关裂缝平均裂缝孔隙度为 0.43%,平均裂缝渗透率为 $186.54 \times 10^{-3} \mu m^2$,说明断层相关裂缝对改善沙三段致密储层有重要作用。



图2 断层相关裂缝发育特征

Fig. 2 Development Characteristics of Fault-related Fractures

2 断层与裂缝的相关性分析

2.1 力学性质

断裂是地层裂缝的宏观表现,断裂和裂缝两者相互伴生,相互促进。与正断层相关的裂缝组系有两种:一种是由拉张应力形成的、近于直立的拉张裂缝,裂缝走向平行于断层面;另一种是两组斜交的剖面共轭“X”剪切裂缝,一组在平面和剖面上均平行于断层面,另一组在平面上平行于断层面,在剖面上与断层面斜交^[34-37]。东濮凹陷沙三段裂缝在拉张应力作用下形成高角度拉张裂缝,又发育大量共轭“X”剪切裂缝,表明裂缝的发育特征与正断层力学特征具有一致性。

此外,受板块运动的影响,东濮凹陷沙三期构造应力表现为NW—SE向拉张应力和稍弱的NNE—SSW向挤压应力(图3),形成了以NNE向、NE向为主要走向的正断层^[38]。从测得的沙三段裂缝产状来看,断层附近井中发育的裂缝主要以NNE向、NE向为主,与东濮凹陷主要断层的总体方位一致

(图1),从另一个角度表明裂缝的形成受断层控制,两者在力学成因方面具有相关性。

2.2 形成时间

东濮凹陷是一个新生代断陷盆地,断裂十分发育。区内断层的形成主要分为3期:第一期次断层为兰聊断层,形成于古生代,下切地层到硅镁层;第二期次断层主要在古近系早期(沙四期)形成,下切地层至古生界;第三期次断层在古近系中期(沙三早期—沙二早期)形成,下切地层至古近系(表1)。由此可见区内主要大断裂基本形成于沙三中期及以前,活动时期集中在沙三中晚期。

断层的活动速率可用来综合判定断层各地质历史时期的活动强弱,结合构造演化史可恢复断层的变形演化序列^[39]。通过分析研究区4条主断裂的断层活动速率,可知东濮凹陷主要断层在沙三晚期和东营晚期活动最为强烈,结合东濮凹陷构造演化史,认为沙三晚期和东营晚期是凹陷内主控断层最主要的时期(图3)。

通过裂缝中所含的流体包裹体,可以推测裂缝

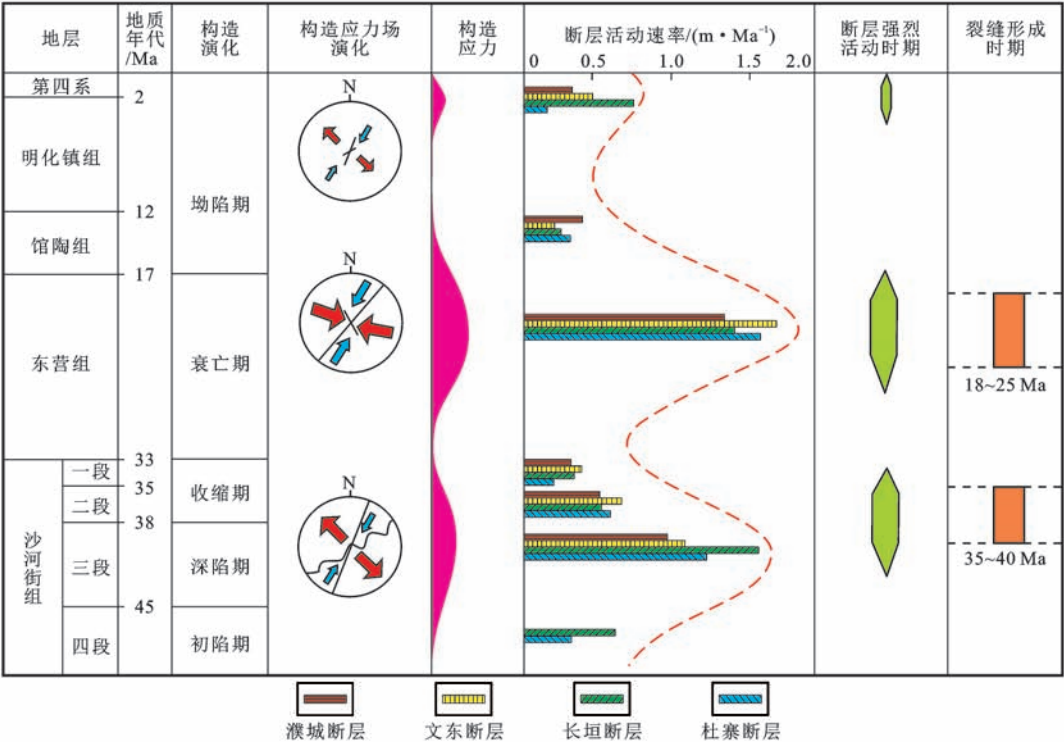


图 3 构造演化、断层活动与裂缝形成关系

Fig. 3 Relationships Among Tectonic Evolution, Fault Activity and Fracture Formation

表 1 各主要断层基本特征

Tab. 1 Basic Characteristics of Major Faults

断层名称	走向	倾向	倾角/(°)	延伸长度/km	最大断距/m	形成时期	活动地层	下切地层
兰聊	NNE	NWW	30~70	140.0	8 350	古生代	K—Q	硅镁层
黄河	NNE	NWW	20~60	75.0	2 400	沙四期	Es—Ed	古生界
长垣	NNE	SEE	25~75	90.0	3 500	沙四期	Es ₄ —Ed	古生界
濮城	NNE	NWW	20~60	28.0	1 200	沙三期	Es ₃ —Ed	古生界
卫西	NNE	NWW	18~70	20.5	1 000	沙三期	Es ₃ —Es ₃	古生界
文西	NNE	NWW	33~70	28.5	2 700	沙三期	Es ₃ —Ed	古生界
卫东	NNE	SEE	25~70	32.0	800	沙三期	Es ₂ —Ed	古生界
文东	NNE	SEE	10~70	30.0	1 400	沙三期	Es ₃ —Ed	古近系
徐楼	NNE	NWW	20~50	28.0	1 000	沙三期	Es ₃ —Ed	古近系
杜寨	NNE	NWW	30~60	35.0	1 600	沙四期	Es ₄ —Es	古生界
石家集	NE	SEE	25~65	38.0	1 450	沙四期	Es ₃ —Ed	古生界
五星集	NE	SEE	40~45	44.0	1 000	沙三期	Es ₄ —Es ₃	古生界

注:K 为白垩系;Es 为古近系沙河街组;Es₄ 为古近系沙河街组四段;Es₃₄ 为古近系沙河街组三段 4 亚段;Es₃₃ 为古近系沙河街组三段 3 亚段;Es₃₂ 为古近系沙河街组三段 2 亚段;Es₂ 为古近系沙河街组二段;Ed 为古近系东营组;Q 为第四系。

的最晚形成时间^[4];通过对断层相关裂缝中所含矿物流体包裹体测温,发现其包裹体均一温度峰值为 80 ℃~125 ℃。结合东濮凹陷沙三段的地温梯度和埋藏史等资料^[40],可以推断断层相关裂缝的形成时间主要为 35~40 Ma 和 18~25 Ma,对应沙三中晚期和东营晚期,与区内主要断层的活动时间一致

(图 3),两者在形成时间上具有相关性。

3 断层相关裂缝发育的影响因素

断裂带附近裂缝的发育规律与断层有着密不可分的关系,断层的发育程度直接决定了裂缝的发育程度^[41-43]。本文通过地震资料解译、岩芯描述、成像

测井解释等手段,获取了大量断层和裂缝的发育参数,定量分析二者之间的关系。为排除地层岩性和厚度对裂缝发育规律的影响^[44-46],本次研究所采用的裂缝参数均限定于同一岩石力学层、相近单层厚度的粉砂岩中,用线密度表示裂缝的发育强度。

3.1 距断层距离

断层活动可以形成应力扰动。根据东濮凹陷8条正断层相关裂缝发育参数统计结果(表2),绘制出沙三段断层相关裂缝发育程度分布规律(图4)。从图4可以看出,距断层距离不同,裂缝发育强度出现了规律性变化。通过裂缝线密度及裂缝长度分布的差异性对比(图4),裂缝线密度和规模与距断层距离成明显负相关关系,相关系数为0.574 8(图5)。长垣断层北段控制着3口裂缝较为发育的钻井,分别是胡82井、庆65井、胡83井。其中,胡82井距长垣断层距离最近,为0.4 km,其裂缝发育

程度最为密集,平均线密度为 $23.60 \text{ 条} \cdot \text{m}^{-1}$;庆65井距长垣断层距离为0.8 km,其裂缝发育程度居中,平均线密度为 $20.40 \text{ 条} \cdot \text{m}^{-1}$;胡83井距长垣断层距离最远,为1.2 km,其裂缝发育程度最差,平均线密度仅为 $7.40 \text{ 条} \cdot \text{m}^{-1}$ [图6(a)]。从断层上盘每口井距断层距离与裂缝线密度的关系(图5)可知,裂缝线密度随距断层距离的增大而成幂函数递减。由此可见,无论从定性还是定量角度,均能表明断层相关裂缝的发育程度随距断层距离的减小而增强。远离断层面,裂缝发育程度在整体上具有减小的趋势;越靠近断层面,裂缝越发育。

3.2 断层上、下盘

断层对裂缝发育的影响还体现在裂缝发育的位置上,即断层上、下盘对裂缝发育强度也有影响。以文东2号断层为例,濮深16井、前参2井分布在文东2号断层的下盘,距文东2号断层的距离分别为

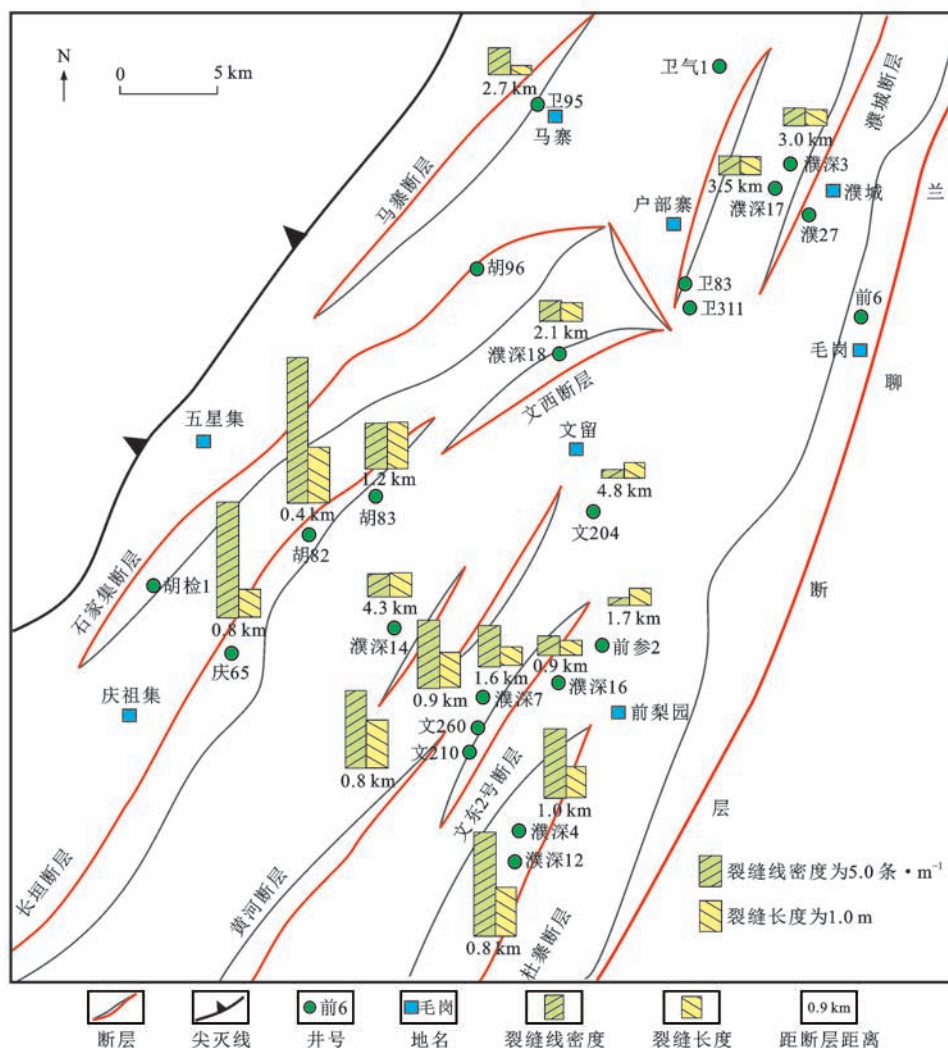


图4 断层相关裂缝分布规律
Fig. 4 Distribution Law of Fault-related Fractures

表 2 断层相关裂缝的发育参数统计结果

Tab. 2 Statistical Results of Development Parameters of Fault-related Fractures

主控断层	井号	发育位置	距断层距离/km	平均线密度/(条·m ⁻¹)	平均延伸长度/m
文东 1 号断层	文 204	上盘	4.8	1.33	0.50
文东 2 号断层	文 210	上盘	0.8	12.50	1.55
	文 260	上盘	0.9	11.00	1.13
	濮深 7	上盘	1.6	6.67	0.60
	前参 2	下盘	1.7	1.25	0.55
	濮深 16	下盘	0.9	3.13	0.48
文西 1 号断层	濮深 18	上盘	2.1	3.33	0.60
文西 2 号断层	濮深 14	上盘	4.3	3.70	0.73
杜寨断层	濮深 4	上盘	1.0	11.20	1.00
	濮深 12	上盘	0.8	18.00	1.58
濮城断层	濮深 3	上盘	3.0	2.86	0.52
	濮深 17	上盘	3.5	3.03	0.58
长垣断层	胡 82	上盘	0.4	23.60	1.80
	胡 83	上盘	1.2	7.40	1.50
	庆 65	上盘	0.8	20.40	0.90
马寨断层	卫 95	上盘	2.7	4.30	0.18

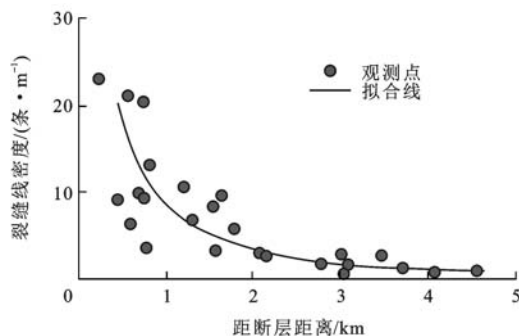
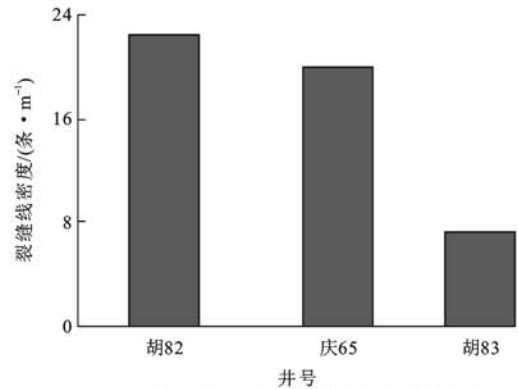


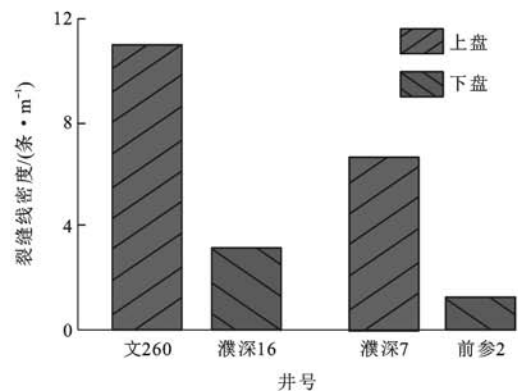
图 5 距断层距离与裂缝线密度之间的关系

Fig. 5 Relationship Between Distance from the Fault and Linear Density of Fractures

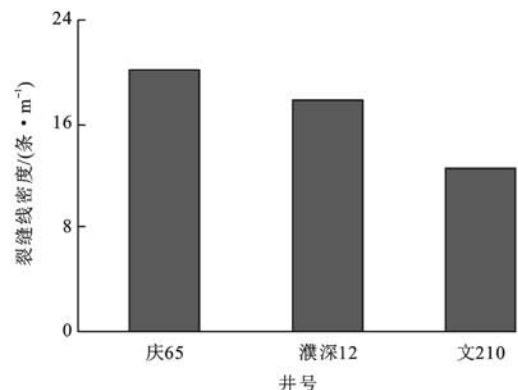
0.9 km 和 1.7 km。同样由文东 2 号断层控制的文 260 井和濮深 7 井位于断层的上盘,距文东 2 号断层的距离分别为 0.9 km 和 1.6 km。由于文 260 井和濮深 16 井、濮深 7 井和前参 2 井分别距离文东 2 号断层的距离大致相等,分两组进行对比分析。结果表明:距断层距离 0.9 km 时,上盘裂缝线密度大致为下盘的 3.6 倍;距断层距离 1.6 km 时,上盘裂缝线密度约为下盘的 5 倍[图 6(b)]。由此可见,受同一断层控制的地层,上盘裂缝的发育程度明显高于下盘,且下盘裂缝线密度的递减速度要快,即随着距断层距离的增大,下盘裂缝线密度的减小幅度明显大于上盘。



(a) 距断层不同距离的裂缝发育程度对比



(b) 断层上、下盘裂缝发育程度对比



(c) 不同规模断层裂缝发育程度对比

图 6 不同条件下断层相关裂缝发育程度对比

Fig. 6 Comparisons of Development of Fault-related Fracture Under Different Conditions

3.3 断层规模

通过观察对比,裂缝的发育程度与控制其发育的主断层规模有很大关系。根据断层长度和落差对比发现,研究区内的断层规模从大到小依次为长垣断层、杜寨断层、文东 2 号断层(表 2),在距断层距离相近(0.8 km)且均位于断层上盘的条件下,长垣断层控制的庆 65 井裂缝线密度高于杜寨断层控制的濮深 12 井,文东 2 号断层控制的文 210 井裂缝线密度最低[图 6(c)]。由此可见,裂缝发育的平均线密度随着断层规模的增大呈递增趋势。

4 断层相关裂缝的发育模式

基于大量样本定性对比和实测数据定量分析,本次研究总结出东濮凹陷沙三段致密储层中断层相关裂缝的发育模式(图7)。从图7可知,裂缝的发育程度和发育范围与断层密切相关,在断层附近存在强变形带、弱变形带和无变形带3个裂缝发育带。强变形带为主要的造缝区域,裂缝线密度整体较高;弱变形带裂缝发育程度较差,呈透入性弥散分布,主要受非断层因素控制,与区域应力有关。

断层相关裂缝带内,裂缝线密度通常较高,且越靠近断层带,裂缝越密集。相同深度、相近岩性条件下,断裂带附近的致密储层孔隙度要明显高于距断层距离较远的储层,且裂缝发育密集带与深部致密储层异常高孔带密切相关,深度上呈对应关系(图8);微观上,裂缝发育段储层的物性和含油性均好于一般储层(图9)。由此可见,断层相关裂缝带的存在可显著提高致密储层的储集性和渗透性,形成致密砂岩储层油气勘探的裂缝甜点区,这对断层相关裂缝带分布的预测具有重要意义。

5 断地比参数法预测裂缝带分布

5.1 断地比参数法理论依据

断地比是指断层的断距在平面上的投影占研究区网格化后单元格面积的比例,与断层断距成正相关关系,可定量描述断层在局部区域的断裂程度。计算断地比,首先需对研究区进行网格化处理^[47-48],然后计算每个单元格内断层断距的平面投影面积与单元格面积比值。

根据本文建立的断层相关裂缝的发育模式,可以看出东濮凹陷沙三段断层的应力扰动临界宽度与断层断距具有密切的关系。根据东濮凹陷沙三段8处地震解释的断层相关裂缝带宽度与主控断层断距之间的关系,可以得出两者成显著正相关关系,相关系数为0.962 2(图10)。断层断距越大,其应力扰动范围越大,断层相关裂缝带宽度就越大。

为研究断地比能否较精确地反映裂缝的发育程度,本次研究将断层的断地比与已知井的裂缝线密度进行相关性分析。结果显示,断地比越大,断层相关裂缝发育程度越好,二者成明显正相关关系,且相关系数为0.817(图11)。

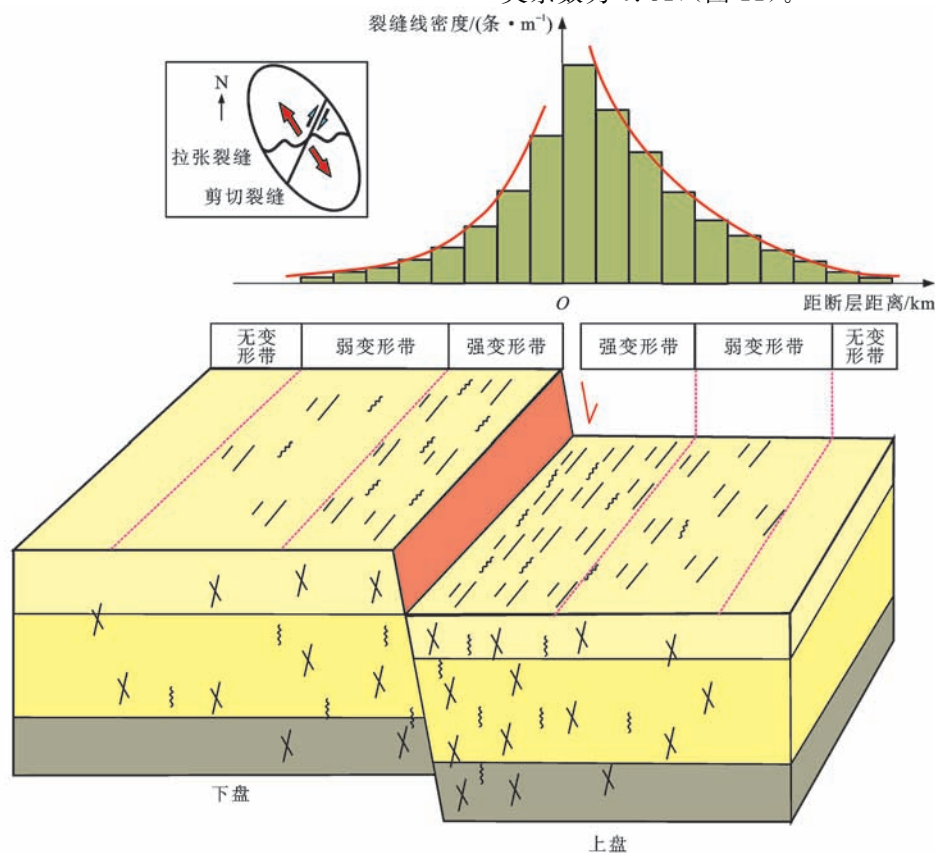


图7 断层相关裂缝的发育模式

Fig. 7 Development Model of Fault-related Fractures

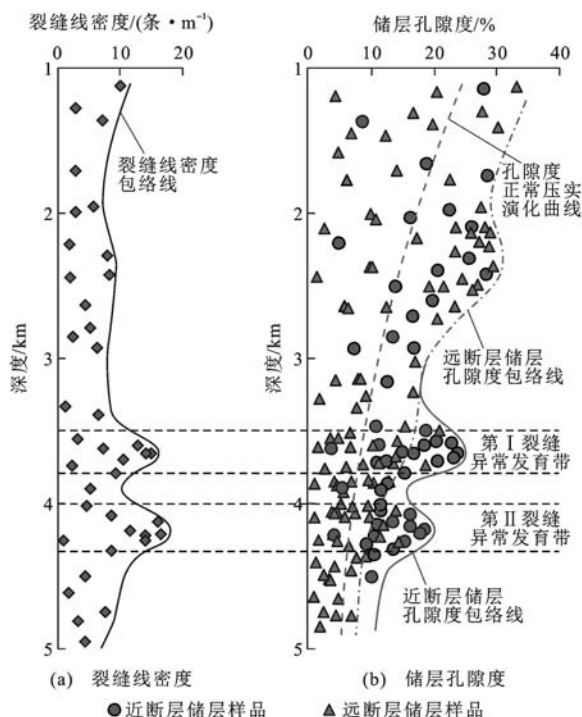


图 8 断层相关裂缝发育与储层物性之间的关系

Fig. 8 Relationships Between Development of Fault-related Fracture and Reservoir Physical Properties

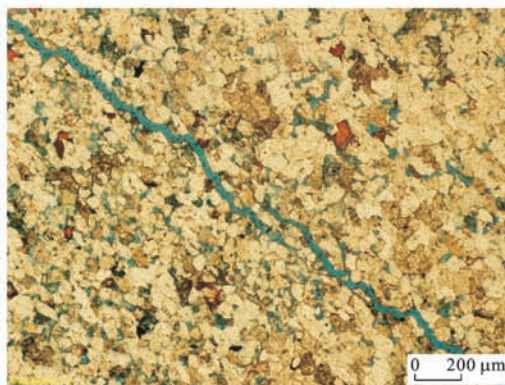
综上所述,断地比既能反映断层相关裂缝带宽,又能代表裂缝发育程度。利用断地比参数法预测东濮凹陷断层相关裂缝发育程度具有一定的可行性,可以达到间接定量预测裂缝分布情况。

5.2 致密储层裂缝甜点区分布预测

根据东濮凹陷沙三段断地比的统计分析,作出其平面等值线图(图 12)。从图 12 可以看出,受断层的影响,断地比分布呈现明显的分区分带性,整体呈 NNE 向展布,与断裂的发育方向平行。按照地区分布,断地比可划为 5 个高值区:第一个高值区位于庆祖集地区以东,以庆 65 井为代表,主要受长垣断层的控制;第二个高值区位于前梨园地区,以濮深 4 井为代表,主要受杜寨断层与兰聊断层的控制,此外该区二级断裂较发育(如文东断层等),断地比最高可达 40%;第三个高值区位于胡状集地区以北,以胡 96 井、濮深 18 井为代表,主要受石家集断层、文西断层、马寨断层的控制;第四个高值区位于濮城地区,以濮 27 井、濮深 3 井为代表,主要受兰聊断层和濮城断层的控制;第五个高值区位于文明寨地区以东,主要受濮城断层和卫西断层的控制。



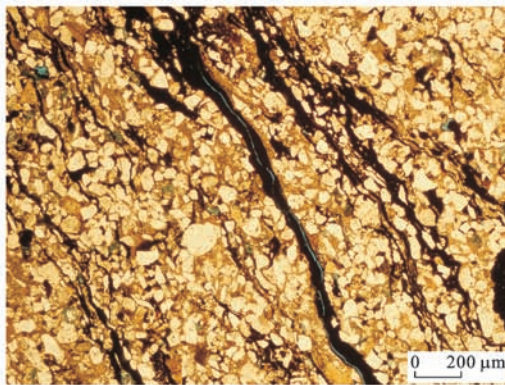
(a) 第 I 裂缝异常发育带(濮深12井3596.4 m 深度处),岩芯上发育两组共轭裂缝



(b) 第 I 裂缝异常发育带(濮深12井3594.1 m 深度处),显微镜下微裂缝发育且附近存在次生孔隙带



(c) 第 II 裂缝异常发育带(濮深18井4070.89 m 深度处),岩芯上发育多条高角度裂缝



(d) 第 II 裂缝异常发育带(濮深18井4082.64 m 深度处),显微镜下微裂缝发育且普遍见油气充注

图 9 裂缝异常发育带储层微观特征

Fig. 9 Microcosmic Characteristics of Fracture-abnormal Development Zones

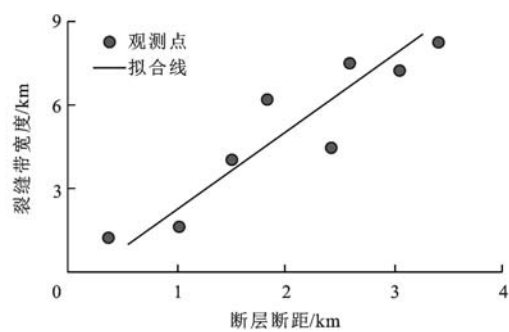


图 10 断层断距与裂缝带宽度之间的关系

Fig. 10 Relationship Between Fault Displacement and Width of Fracture Zones

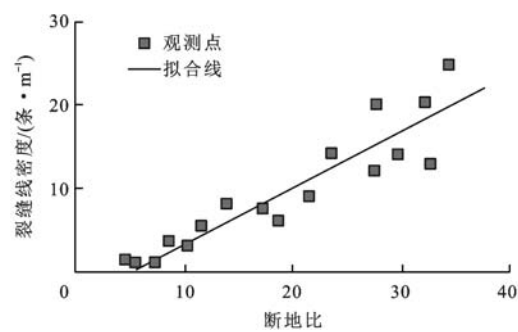


图 11 断地比与裂缝线密度之间的关系

Fig. 11 Relationship Between Fault-stratum Ratio and Linear Density of Fractures

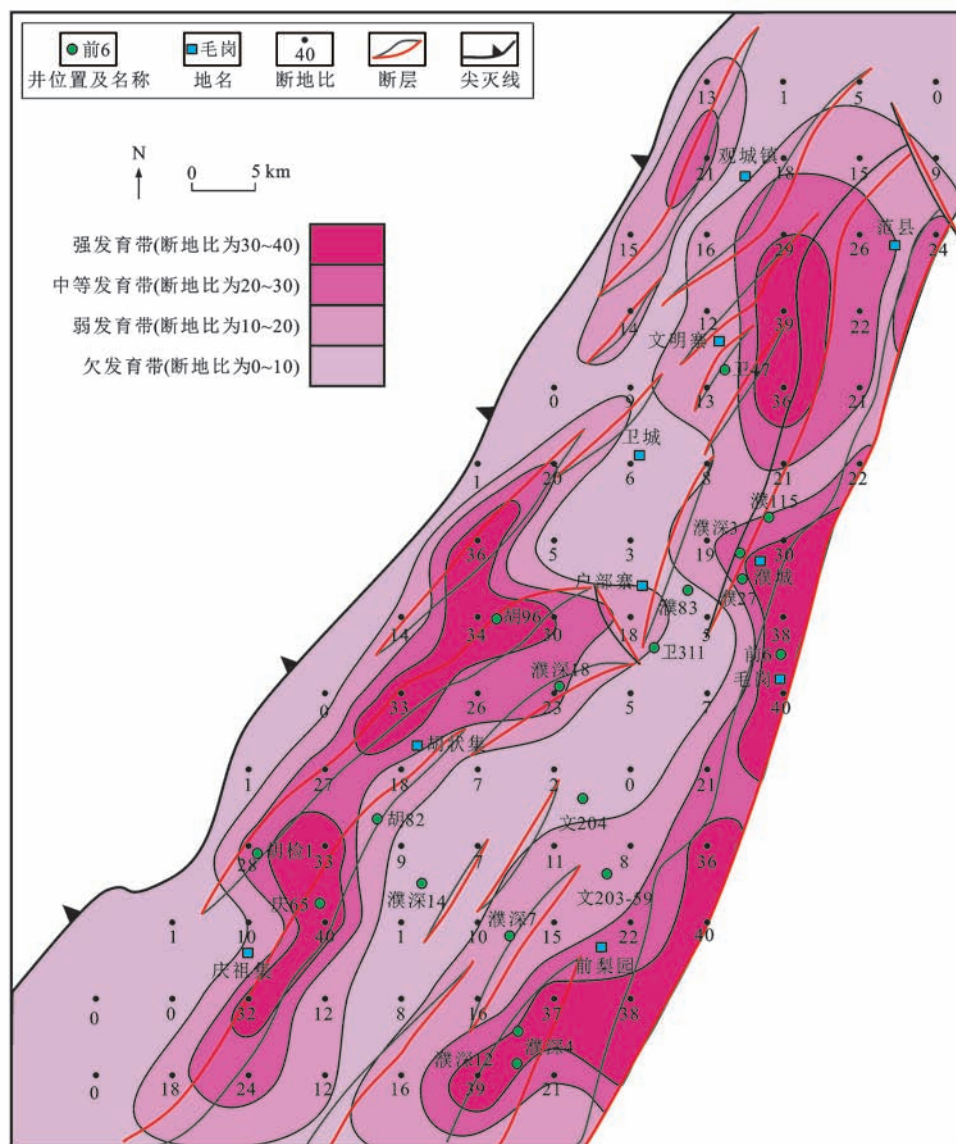


图 12 致密储层裂缝甜点区分布预测

Fig. 12 Distribution Prediction of Fracture Favorable Areas for Tight Reservoir

对比分析研究区断地比分布情况和单井裂缝实际发育情况,发现断地比小于 10 的区域断层相关裂缝几乎不发育,因此,本次研究将断地比等于 10 作为断层相关裂缝的发育下限。同时,根据实际情况,把东濮凹陷沙三段裂缝的分布划分为 4 个带:断地比为 0~10 的区域为裂缝欠发育带;断地比为 10~

20 的区域为裂缝弱发育带;断地比为 20~30 的区域为裂缝中等发育带;断地比大于 30 的区域为裂缝强发育带。

东濮凹陷沙三段可以划分出 5 个致密储层裂缝甜点区,分别为庆祖集地区东部、前梨园地区、胡状集地区北部、濮城地区、文明寨地区东部,其中以前梨园地区裂缝带最为发育(图 12)。该预测结果与东濮凹陷沙三段已探明油气储量分布情况和单井油气产能情况具有很好的匹配性(图 13),证明断地比参数法预测裂缝带和本次研究的预测结果在该区具有很好的适用性,对研究区低勘探程度区裂缝的预测和致密砂岩储层裂缝甜点区的预测具有一定的指导意义。

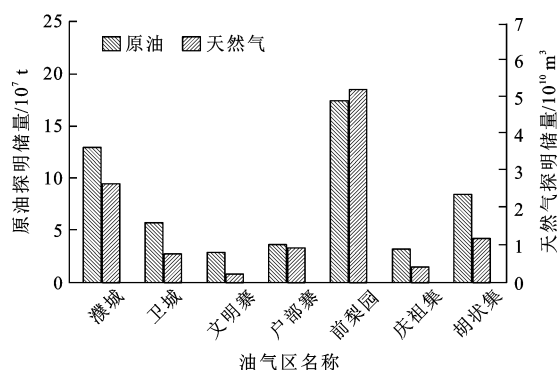


图 13 主要含油气区储量分布

Fig. 13 Distribution of Reserves in the Main Petroleum-bearing Areas

6 结 语

(1)东濮凹陷沙三段发育剪切裂缝、张性裂缝和张剪裂缝 3 种基本类型的断层相关裂缝,主要走向为 NNE 向、NE 向。裂缝与断层在力学性质、力学成因及主要形成时间方面具有相关性,沙三晚期和东营晚期为区内主控断层和裂缝的主要形成时期。

(2)正断层相关的裂缝既可以是拉张裂缝,也可以为剪切裂缝,但由于受地下围压作用的影响,拉张裂缝发育较差,主要形成高角度共轭“X”剪切裂缝。断层相关裂缝的发育强度随着距断层距离的增大而逐渐减小,越靠近断层面,裂缝越发育。正断层上盘裂缝的发育程度要高于下盘,且随着距断层距离的增加,上、下盘裂缝线密度均呈指数递减,但是下盘裂缝线密度的减小速度要明显大于上盘。裂缝的发育程度与断层的规模也成正相关关系。

(3)断层相关裂缝带可显著提高致密储层的物性,对致密砂岩储层裂缝甜点区的预测具有重要意义。断层相关裂缝发育程度与断层的发育程度密切

相关,断地比可以定量描述断层的发育程度,且与裂缝发育程度具有很好的正相关性。采用断地比参数法预测出庆祖集地区东部、前梨园地区、胡状集地区北部、濮城地区、文明寨地区东部等 5 个致密储层裂缝甜点区。

参考文献:

References:

- [1] 周 文. 裂缝性油气储集层评价方法[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1998.
ZHOU Wen. Evaluation Method of Fractured Hydrocarbon Reservoir[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1998.
- [2] 周新桂, 张林炎, 黄臣军, 等. 华庆地区长 6³ 储层裂缝分布模型与裂缝有效性[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(3): 689-697.
ZHOU Xin-gui, ZHANG Lin-yan, HUANG Chen-jun, et al. Distraction Network Conceptual Model and Validity of Fractures in Chang-6³ Low Permeable Reservoir in Huaqing Area[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(3): 689-697.
- [3] 邓虎成, 周 文, 彭 军, 等. 鄂尔多斯麻黄山地区裂缝与油气成藏关系[J]. 新疆地质, 2010, 28(1): 81-85.
DENG Hu-cheng, ZHOU Wen, PENG Jun, et al. Relationship Between Fracture and Hydrocarbon Accumulation of Mahuangshan Area in Ordos Basin[J]. Xinjiang Geology, 2010, 28(1): 81-85.
- [4] ZENG L B, SU H, TANG X M, et al. Fractured Tight Sandstone Oil and Gas Reservoirs: A New Play Type in the Dongpu Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(3): 363-377.
- [5] 赵向原, 曾联波, 祖克威, 等. 致密储层脆性特征及对天然裂缝的控制作用: 以鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 致密储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 62-71.
ZHAO Xiang-yuan, ZENG Lian-bo, ZU Ke-wei, et al. Brittleness Characteristics and Its Control on Natural Fractures in Tight Reservoirs: A Case Study from Chang-7 Tight Reservoir in Longdong Area of the Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2016, 37(1): 62-71.
- [6] 樊建明, 屈雪峰, 王 冲, 等. 鄂尔多斯盆地致密储层天然裂缝分布特征及有效裂缝预测新方法[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(5): 740-748.
FAN Jian-ming, QU Xue-feng, WANG Chong, et al. Natural Fracture Distribution and a New Method Predicting Effective Fractures in Tight Oil Reservoirs of

- Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(5): 740-748.
- [7] 操应长,远光辉,李晓艳,等. 东营凹陷北带古近系中深层异常高孔带类型及特征[J]. *石油学报*, 2013, 34(4): 683-691.
- CAO Ying-chang, YUAN Guang-hui, LI Xiao-yan, et al. Types and Characteristics of Anomalously High Porosity Zones in Paleogene Mid-deep Buried Reservoirs in the Northern Slope, Dongying Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(4): 683-691.
- [8] 曾联波. 低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- ZENG Lian-bo. Formation and Distribution of Fractures in Low-permeability Sandstone Reservoirs[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [9] 巩磊,曾联波,陈树民,等. 致密砾岩储层微观裂缝特征及对储层的贡献[J]. *大地构造与成矿学*, 2016, 40(1): 38-46.
- GONG Lei, ZENG Lian-bo, CHEN Shu-min, et al. Characteristics of Micro-fractures and Contribution to the Compact Conglomerate Reservoirs[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 40(1): 38-46.
- [10] 巩磊,高铭泽,曾联波,等. 影响致密砂岩储层裂缝分布的主控因素分析: 以库车前陆盆地侏罗系—新近系为例[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(2): 199-208.
- GONG Lei, GAO Ming-ze, ZENG Lian-bo, et al. Controlling Factors on Fracture Development in the Tight Sandstone Reservoirs: A Case Study of Jurassic-Neogene in the Kuqa Foreland Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(2): 199-208.
- [11] 李荣西,段立志,张少妮,等. 鄂尔多斯盆地低渗透油气藏形成研究现状与展望[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(4): 364-372.
- LI Rong-xi, DUAN Li-zhi, ZHANG Shao-ni, et al. Review on Oil/Gas Accumulation with Low Permeability in Ordos Basin[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(4): 364-372.
- [12] 王珂,张惠良,张荣虎,等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝定量表征与分布预测: 以塔里木盆地库车坳陷克深5气藏为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2017, 39(5): 652-668.
- WANG Ke, ZHANG Hui-liang, ZHANG Rong-hu, et al. Quantitative Characterization and Distribution Prediction of Structural Fracture in Ultra-deep Tight Sandstone Reservoir: A Case Study of Keshen-5 Gas Pool in Kuqa Depression of Tarim Basin[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2017, 39(5): 652-668.
- [13] 韦青,李治平,王香增,等. 裂缝性致密砂岩储层渗吸机理及影响因素: 以鄂尔多斯盆地吴起地区长8储层为例[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(4): 102-107.
- WEI Qing, LI Zhi-ping, WANG Xiang-zeng, et al. Mechanism and Influence Factors of Imbibition in Fractured Tight Sandstone Reservoir: An Example from Chang-8 Reservoir of Wuqi Area in Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(4): 102-107.
- [14] ORTGEA O, MARRETT R, LAUBACH S E. A Scale-independent Approach to Fracture Intensity and Average Spacing Measurement[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(3): 193-208.
- [15] ZENG L B, TANG X M, WANG T C, et al. The Influence of Fracture Cements in Tight Paleogene Saline Lacustrine Carbonate Reservoirs, Western Qaidam Basin, Northwest China[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(11): 2003-2017.
- [16] 刘卫彬,周新桂,李世臻,等. 构造裂缝对低孔低渗储层的影响作用研究: 以东濮凹陷沙三段为例[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(11): 1993-2004.
- LIU Wei-bin, ZHOU Xin-gui, LI Shi-zhen, et al. The Influences of Tectonic Fractures on Low-porosity and Low-permeability Sandstone Reservoirs: A Case Study of the Third Member of Shahejie Formation in Dongpu Depression[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(11): 1993-2004.
- [17] 巩磊,高帅,吴佳朋,等. 徐家围子断陷营城组火山岩裂缝与天然气成藏[J]. *大地构造与成矿学*, 2017, 41(2): 283-290.
- GONG Lei, GAO Shuai, WU Jia-peng, et al. Natural Gas Accumulation and Fractures in Volcanic Rocks of Yingcheng Formation in Xujiaweizi Fault Depression[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2017, 41(2): 283-290.
- [18] 张博为,付广,张居和,等. 油源断裂转换带裂缝发育及其对油气控制作用: 以冀中坳陷文安斜坡议论堡地区沙二段为例[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2017, 47(2): 370-381.
- ZHANG Bo-wei, FU Guang, ZHANG Ju-he, et al. Fracture Development in Oil-migrating Fault Transition Zones and Its Control on Hydrocarbon Migration and Accumulation: A Case Study of Es₂ Oil Formation of Yilunpu Structure of Wen'an Slope of Jizhong Depression[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2017, 47(2): 370-381.
- [19] 朱喜,张庆莲,侯贵廷. 新疆柯坪—巴楚地区碳酸盐岩构造裂缝发育的控制因素及油气勘探意义[J]. *地质学报*, 2017, 91(6): 1181-1191.

- ZHU Xi, ZHANG Qing-lian, HOU Gui-ting. The Controlling Factor Study of Development of Carbonatic Rock Fractures in the Kelping-Bachu Area, Xinjiang and Its Petroleum Exploration Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(6): 1181-1191.
- [20] MURRAY G. Quantitative Fracture Study: Sanish Pool, McKenzie County, North Dakota[J]. *AAPG Bulletin*, 1968, 52(1): 57-65.
- [21] ZENG L B. Microfracturing in the Upper Triassic Sichuan Basin Tight-gas Sandstones: Tectonic, Overpressure, and Diagenetic Origins[J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(12): 1811-1825.
- [22] 鞠 玮, 侯贵廷, 黄少英, 等. 库车坳陷依南—吐孜地区下侏罗统阿合组砂岩构造裂缝分布预测[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(4): 592-602.
- JU Wei, HOU Gui-ting, HUANG Shao-ying, et al. Structural Fracture Distribution and Prediction of the Lower Jurassic Ahe Formation Sandstone in the Yinan-Tuzi Area, Kuqa Depression[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(4): 592-602.
- [23] 王 珂, 张荣虎, 戴俊生, 等. 库车坳陷克深2气田低渗透砂岩储层裂缝发育特征[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(1): 53-60.
- WANG Ke, ZHANG Rong-hu, DAI Jun-sheng, et al. Fracture Characteristics of Low Permeability Sandstone Reservoir of Keshen-2 Gas Field, Kuqa Depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(1): 53-60.
- [24] CMEXOB E. Basic Theory and Method of Reservoir Exploration of Fractured Oil and Gas Reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985.
- [25] NELSON R A. Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs[M]. 2nd ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 1985.
- [26] 戴俊生, 徐建春, 孟召平, 等. 有限变形法在火山岩裂缝预测中的应用[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2003, 27(1): 1-3, 10.
- DAI Jun-sheng, XU Jian-chun, MENG Zhao-ping, et al. Prediction of Volcanic Rock Fissure with Finite Deformation Method[J]. *Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science*, 2003, 27(1): 1-3, 10.
- [27] 童亨茂. 储层裂缝综合预测方法在GBEIBE油田的应用[J]. *中国石油勘探*, 2007, 12(3): 77-80.
- TONG Heng-mao. Application of Synthetic Approach for Predicting Reservoir Fractures in GBEIBE Oilfield[J]. *China Petroleum Exploration*, 2007, 12(3): 77-80.
- [28] 周新桂, 张林炎, 屈雪峰, 等. 沿河湾探区低渗透储层构造裂缝特征及分布规律定量预测[J]. *石油学报*, 2009, 30(2): 195-200.
- ZHOU Xin-gui, ZHANG Lin-yan, QU Xue-feng, et al. Characteristics and Quantitative Prediction of Distribution Laws of Tectonic Fractures of Low-permeability Reservoirs in Yanhewan Area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(2): 195-200.
- [29] SMART K J, FERRILL D A, MORRIS A, et al. Geomechanical Modeling of Stress and Strain Evolution During Contractional Fault-related Folding[J]. *Tectonophysics*, 2012, 576/577: 171-196.
- [30] 黄小娟, 李治平, 周光亮, 等. 裂缝性致密砂岩储层裂缝孔隙度建模: 以四川盆地平落坝构造须家河组二段储层为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(5): 570-577.
- HUANG Xiao-juan, LI Zhi-ping, ZHOU Guang-liang, et al. Fracture Porosity Modeling of Fractured Tight Sandstone Reservoir: A Case Study of the Reservoir in Member 2 of Xujiache Formation, Pingluoba Structure, Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(5): 570-577.
- [31] JU W, HOU G T, ZHANG B. Insights into the Damage Zones in Fault-bend Folds from Geomechanical Models and Field Data [J]. *Tectonophysics*, 2014, 610: 182-194.
- [32] 能 源, 李 勇, 徐丽丽, 等. 克拉苏构造带盐下超深层断背斜裂缝带发育模式及预测方法[J]. *大地构造与成矿学*, 2017, 41(1): 61-68.
- NENG Yuan, LI Yong, XU Li-li, et al. Patterns of Fracture Zone in the Deep Subsalt Layer of Kelasu Structural Belt and Prospecting Method[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2017, 41(1): 61-68.
- [33] 刘卫彬, 张世奇, 李世臻, 等. 东濮凹陷沙三段异常高孔带发育特征及成因机制[J]. *地质论评*, 2017, 63(增): 77-78.
- LIU Wei-bin, ZHANG Shi-qi, LI Shi-zhen, et al. Characteristics and Origin of Anomously High Porosity Zones in the 3rd Member of Eocene Shahejie Formation (E_{s3}) in the Dongpu Depression[J]. *Geological Review*, 2017, 63(S): 77-78.
- [34] 戴俊生, 汪必峰, 马占荣. 脆性低渗透砂岩破裂准则研究[J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(4): 393-395.
- DAI Jun-sheng, WANG Bi-feng, MA Zhan-rong. Research on Cracking Principles of Brittle Low-permeability Sands[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(4): 393-395.
- [35] 曾联波, 漆家福, 王永秀. 低渗透储层构造裂缝的成因类型及其形成地质条件[J]. *石油学报*, 2007, 28(4): 52-56.

- ZENG Lian-bo, QI Jia-fu, WANG Yong-xiu. Origin Type of Tectonic Fractures and Geological Conditions in Low-permeability Reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 52-56.
- [36] 周文, 邓虎成, 赵国良, 等. 阿曼 Daleel 油田下白垩统 Shuaiba 组上段走滑正断裂带裂缝分布定量评价[J]. *矿物岩石*, 2009, 29(4): 53-59.
- ZHOU Wen, DENG Hu-cheng, ZHAO Guo-liang, et al. Quantitative Evaluation of Fracture Distribution in the Down Strike-slip Fault Zone of Upper Shuaiba Formation of Lower Cretaceous, Daleel, Oman[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2009, 29(4): 53-59.
- [37] 高孝巧, 张达. 逆断层控制构造裂缝发育的力学机制模拟[J]. *地质力学学报*, 2015, 21(1): 47-55.
- GAO Xiao-qiao, ZHANG Da. Numerical Simulation of Structural Fractures Controlled by Reverse Fault[J]. *Journal of Geomechanics*, 2015, 21(1): 47-55.
- [38] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中—新生代构造演化研究[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2001, 37(6): 845-851.
- HOU Gui-ting, QIAN Xiang-lin, CAI Dong-sheng. The Tectonic Evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic Time[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2001, 37(6): 845-851.
- [39] 孙永河, 陈艺博, 孙继刚, 等. 松辽盆地北部断裂演化序列与反转构造带形成机制[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(3): 275-283.
- SUN Yong-he, CHEN Yi-bo, SUN Ji-gang, et al. Evolutionary Sequence of Faults and the Formation of Inversion Structural Belts in the Northern Songliao Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 275-283.
- [40] 马鹏杰, 张世奇, 刘卫彬. 濮卫地区沙三段储层成岩环境演化史[J]. *大庆石油地质与开发*, 2015, 34(3): 16-22.
- MA Peng-jie, ZHANG Shi-qi, LIU Wei-bin. Evolution History of the Diagenetic Environment for Es³ Reservoir in Puwei Area[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2015, 34(3): 16-22.
- [41] 李小刚, 徐国强, 戚志林, 等. 断层相关裂缝定性识别: 原理与应用[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2013, 43(6): 1779-1786.
- LI Xiao-gang, XU Guo-qiang, QI Zhi-lin, et al. Qualitative Identification of Fault-related Fracture: Principle and Its Application[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2013, 43(6): 1779-1786.
- [42] 张云峰, 赵旭光, 王宇, 等. 正断层伴生裂缝物理模拟实验研究[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(36): 8975-8979.
- ZHANG Yun-feng, ZHAO Xu-guang, WANG Yu, et al. Physical Simulation Experiment of Normal Faults Associated Fractures[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(36): 8975-8979.
- [43] 祖克威, 曾联波, 赵向原, 等. 断层转折褶皱剪切裂缝发育模式探讨[J]. *地质力学学报*, 2014, 20(1): 16-24.
- ZU Ke-wei, ZENG Lian-bo, ZHAO Xiang-yuan, et al. Discussion on Development Models of the Shearing Fractures in Fault Bend Folds[J]. *Journal of Geomechanics*, 2014, 20(1): 16-24.
- [44] 赵文韬, 侯贵廷, 孙雄伟, 等. 库车东部碎屑岩层厚和岩性对裂缝发育的影响[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(4): 603-610.
- ZHAO Wen-tao, HOU Gui-ting, SUN Xiong-wei, et al. Influence of Layer Thickness and Lithology on the Fracture Growth of Clastic Rock in East Kuqa[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(4): 603-610.
- [45] 王珂, 张惠良, 张荣虎, 等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝特征及影响因素: 以塔里木盆地克深2气田为例[J]. *石油学报*, 2016, 37(6): 715-727.
- WANG Ke, ZHANG Hui-liang, ZHANG Rong-hu, et al. Characteristics and Influencing Factors of Ultra-deep Tight Sandstone Reservoir Structural Fracture: A Case Study of Keshen-2 Gas Field, Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(6): 715-727.
- [46] 王珂, 张荣虎, 戴俊生, 等. 低渗透储层裂缝研究进展[J]. *地球科学与环境学报*, 2015, 37(2): 44-58.
- WANG Ke, ZHANG Rong-hu, DAI Jun-sheng, et al. Review on Low-permeability Reservoir Fracture[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2015, 37(2): 44-58.
- [47] 刘景新. 火成岩油气储层构造裂缝发育程度预测研究[J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 2014, 44(2): 279-284.
- LIU Jing-xin. The Method of Forecasting the Developmental Characteristics of Tectoclase in Igneous Reservoir[J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2014, 44(2): 279-284.
- [48] 刘金华. 油气储层裂缝形成、分布及有效性研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2009.
- LIU Jin-hua. Study on the Formation, Distribution and Effectiveness of Reservoir Fractures with Oil and Gas [D]. Dongying: China University of Petroleum, 2009.