

一种生长断层封闭性定量研究方法

——以辽河坳陷辽中凹陷 JX1-1 油田为例

谭丽娟, 解宏泽, 张辉, 赵举举, 郭优优

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘要:通过对生长断层封闭性的封闭机理和影响因素分析和研究,以断层体为研究对象,提出了断层封闭综合指数(F_{ci})的概念,用断面正压力、断层带泥质含量,断层带碎屑物成岩胶结作用三大影响因素量化乘积表示。以辽中凹陷 JX1-1 油田作为研究实例,建立了该区断层的封闭性评价标准,断层封闭综合指数 60 作为临界值,高于该值断层具有较好的封闭性,低于该值断层难以封闭住油气,并分析了经过该区的主要断层——辽中一号主干断裂的控藏作用。

关键词:生长断层;断面正压力;断层封闭综合指数;控藏作用;JX1-1 油田;辽中凹陷;辽河坳陷

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

A quantitative research method on the sealing of growth faults:

A case study of JX1-1 oil field in Liaozhong Sag, Liaohe Depression

TAN Lijuan, XIE Hongze, ZHANG Hui, ZHAO Jujun, GUO Youyou

(School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: Through the analyses of the mechanism and influencing factors of the sealing of growth faults, taking the fault body as the research object, the concept of fault closure composite index (F_{ci}) was put forward, which was the quantified product of three factors including the fault positive pressure, the muddy content of fault zone, and the cementation of debris in fault zone. Taking the JX1-1 oil field in the Liaozhong Sag as an example, a fault sealing evaluation standard was established. The fault closure composite index of 60 is regarded as a critical value. Faults can seal oil and gas well when the index is over 60. The controlling effects on hydrocarbon accumulation of the main fault in the study area, Liaozhong no.1 fault, were analyzed.

Key words: growth fault; fault positive pressure; fault closure composite index; controlling effects on hydrocarbon accumulation; JX1-1 oil field; Liaozhong Sag; Liaohe Depression

在断块油气藏中,断层具有较好的封闭性是油气成藏的关键,目前国内外研究断层封闭性的方法逐渐由定性分析过渡到与定量研究相结合,由地质学科过渡到多种学科相互交叉来综合评判断层的封闭性^[1-12]。断层封闭性定性研究的方法主要有岩性对置法^[13]和储层流体性质法等^[14],定量研究的方法主要有断面泥岩涂抹因子法^[15]、流体包裹体法^[16]、排替压力差法^[17]、断层垂向封闭因子法^[18]和模糊综合评价法等^[19-20],每一种方法都有其侧重点和优缺点,前人已经研究颇深,本文不再赘述。

1 生长断层的封闭机理及影响因素

生长断层为一种三维地质体^[21],若断层体具有较好的封闭性,则断层在垂向和侧向上都能够很好地封闭住油气。在断裂活动过程中,断面由于受到断裂涂抹作用,断层两侧的砂泥岩会“填充”到断裂带中。断层停止生长后,经过相当长时间的成岩胶结作用,再加上断面正压力的作用,使得断面紧闭,断层带封闭性变好,从而油气得以封闭^[22-23]。生长断层封闭性影响因素有很多,总结起

来,主要有断层倾角、断面正压力、断层带内泥质含量以及成岩时间等。一般来说,断面较缓,断面正压力越大,断层带内泥质含量越多,成岩压实作用越强烈,断层封闭性越好^[17,24-26]。

2 生长断层封闭综合指数法

前人在研究断层封闭性的时候,大多只考虑断层压力和断层带泥质含量的影响,往往忽略了断层岩成岩作用的影响。而断层若要封闭住油气,必须具备较大的断层正压力、较多的断层带泥质含量以及足够的成岩时间,三者缺一不可。在此基础上,对每一影响因素进行量化分析,提出了断层封闭综合指数法。

2.1 断面正压力的求取

断面正压力的大小是断层破碎带能否紧闭的关键因素,断层带所受到的正压力越大,断层越紧闭,封堵油气的潜力也越大。断层的正压力大小与断层倾角、上覆地层密度有关,一般来说断层倾角越缓,上覆地层密度越大,断层所受到的正压力也就越大。对于断层面正压力的求取,前人做了大量的工作^[27],并建立了相应的计算公式:

$$P = H(\rho_r - \rho_w) \times 0.009876 \cos\theta \quad (1)$$

式中: P 为断面所受的正压力,MPa; H 为断面埋深,m; ρ_r 为上覆地层的平均密度, g/cm^3 ; ρ_w 为地层水密度, g/cm^3 ; θ 为断面倾角。

上覆地层的平均密度可以通过测井数据获取,或建立实测地层密度与地层埋深关系曲线来获得,断面埋深和地层倾角可以通过地震资料获取。

2.2 断层带泥质含量的量化

断层带泥质含量的估算是影响断层封闭综合指数的重要影响因素,也是断层能否封闭住油气的关键,断层带中含有较多的泥质更能够加强断层的封闭性。由于断层带中的泥岩主要是来源于断层两侧的泥岩地层涂抹,因此用 SGR 来表示断层带的泥质含量较为合理。

$$SGR = \frac{\sum \text{泥岩厚度}}{\text{垂直断距}} \quad (2)$$

2.3 断层岩成岩压实作用的表征

生长断层中的泥质碎屑物必须经过一定时间的成岩胶结作用方可具有封堵油气的能力。吕延防等人认为压实成岩程度可用其所承受的断面正压力(P)和断层停止活动距今时间(T)的乘积表示^[17],承压时间越长,所受断面压力越大,断层岩成岩程

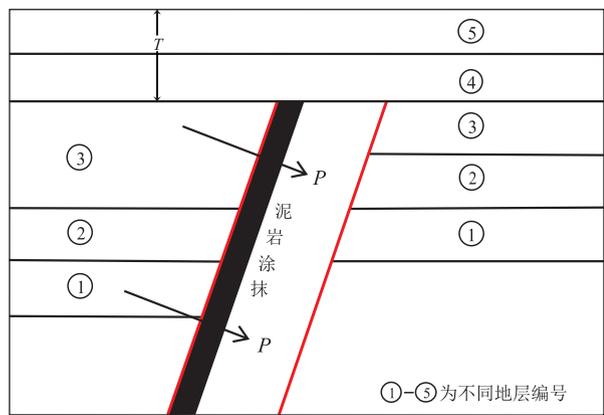


图1 成岩压实作用表征示意

Fig.1 Characterization of diagenetic compaction

度越高,岩石越致密,成岩作用越强,因此成岩压实作用可以用两者的乘积($P \cdot T$)来表征(图1)。

2.4 生长断层封闭综合指数的提出

通过对断层封闭性的影响因素定量分析,笔者认为用断面压力(P)、断层带泥质含量(SGR)以及断层岩成岩作用($P \cdot T$)三者的乘积作为评价生长断层封闭性的标准较为合理,并将其定义为生长断层封闭综合指数(F_{ci})。为了使结果有更好的区分性,引进了常数 C 。该指数综合考虑了影响生长断层封闭性的因素,包括断层倾角、地层密度、断面正压力、断层带泥质含量以及成岩作用的影响,即:

$$F_{ci} = \frac{P^2 \cdot SGR \cdot T}{C} \quad (3)$$

式中: P 为断面压力,MPa; SGR 为断层涂抹因子; T 为生长断层停止活动距今的时间,Ma; C 为常数,不同地区可以稍作修改,一般取值为50。

3 实例应用

本文采用上述方法,以辽东湾辽中凹陷 JX1-1 油田为例,建立了该区的断层封闭性评价标准,并分析了经过该区的辽中一号主干断裂的控藏作用。

3.1 建立 JX1-1 地区断层封闭性评价标准

JX1-1 油田位于辽东湾辽中凹陷中部,被辽中一号主干断层断穿为东西盘2个部分(图2),该断裂在平面上呈 NNE 向展布,主要的次级断层沿辽中一号断裂带两侧呈雁列状或羽状排列,是油气主要的富集带。构造和油气成藏特征比较复杂,从剖面上来看,研究区从南向北在断面上依次呈台阶式断层组合、“Y”字形断层组合和近直立的走滑断层组合^[28-29],主要断层均为生长断层。古近系一新近系自下而上发育的地层主要为孔店组、沙河街组、

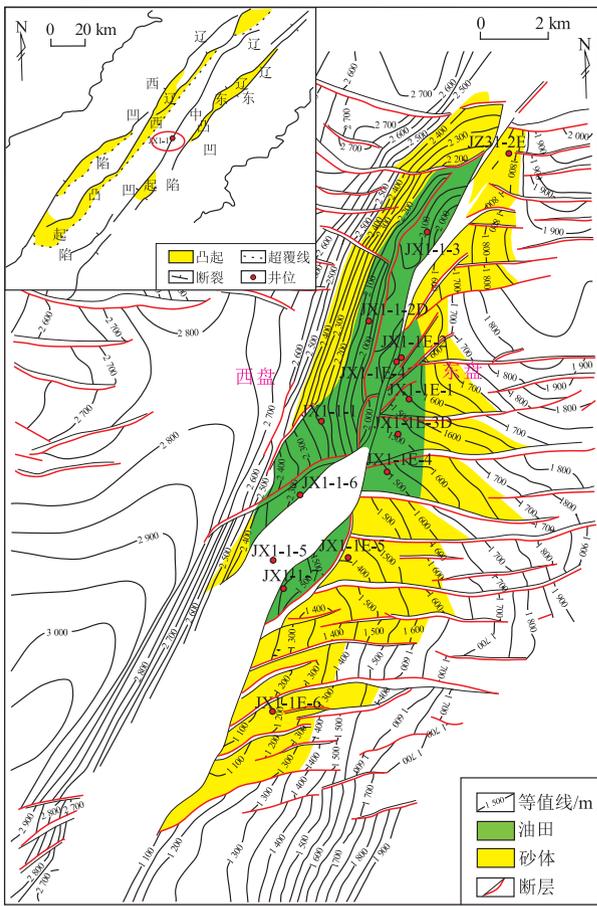


图2 辽河拗陷辽中凹陷 JX1-1 油田平面位置及沙河街组顶面构造

Fig.2 Location of JX1-1 oil field and plane structure of Shahejie top surface, Liaozhong Sag, Liaohede Depression

东营组、馆陶组和明化镇组,该区主要发育有东三段、沙一段、沙三段3套生油岩,西盘在东三段进

表1 辽河拗陷辽中凹陷 JX1-1 油田断层封闭综合指数

Table 1 Fault closure comprehensive index of JX1-1 oil field, Liaozhong Sag, Liaohede Depression

编号	深度/ m	时间/ Ma	地层密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	断层倾角/ ($^{\circ}$)	断面压力/ MPa	SGR	F_{ci}	油气显示
1	1 780	27.6	2.421	43.11	18.26	0.83	152.76	油
2	1 650	27.6	2.322	43.15	16.85	0.43	67.39	油
3	1 755	27.2	2.214	42.95	15.40	0.58	74.83	气
4	1 910	32.2	2.468	56.30	16.43	0.55	95.61	油
5	1 180	31.8	2.279	45.95	10.36	0.53	35.84	稠油
6	1 840	27.9	2.416	34.40	21.23	0.36	90.54	油
7	1 600	31.2	2.187	44.30	13.43	0.72	81.26	油
8	2 222	32.5	2.273	57.86	14.86	0.88	125.59	气
9	1 620	27.8	2.295	47.89	13.89	0.88	94.40	气
10	1 850	20.1	2.419	37.46	20.58	0.30	51.08	水
11	2 080	31.0	2.327	57.10	14.81	0.30	40.80	水
12	1 600	21.2	2.187	88.52	0.48	0.32	0.03	水
13	2 100	21.4	2.407	57.78	15.56	0.17	17.62	水
14	1 300	17.3	2.211	59.66	7.85	0.93	19.83	水
15	1 300	15.4	2.199	80.05	2.54	0.56	1.11	水
16	1 550	20.1	2.143	54.96	10.04	0.62	25.12	水

人生烃门限,沙三段和沙一段的烃源岩进入大量生烃阶段^[30]。

该区断层非常发育,统计并研究了十几个断层发育特征,所研究断层处封闭性已经按编号从剖面图中标出(图3),并分别对其主要影响断层封闭性的因素进行量化。通过式(1)求出各个断点的断面正压力,并通过式(2)计算出对应深度的SGR,结合相应的地震剖面资料,计算出断层活动距今的时间 T ,最后根据式(3)计算出断层综合封闭指数 F_{ci} (表1)。

通过对研究区断层的综合分析,油气和水层的断层封闭综合指数分化较为明显。能够封堵住油气的断层封闭综合指数较大,水层以及稠油的封闭综合指数较小。从两者的分化情况来看,确定该区

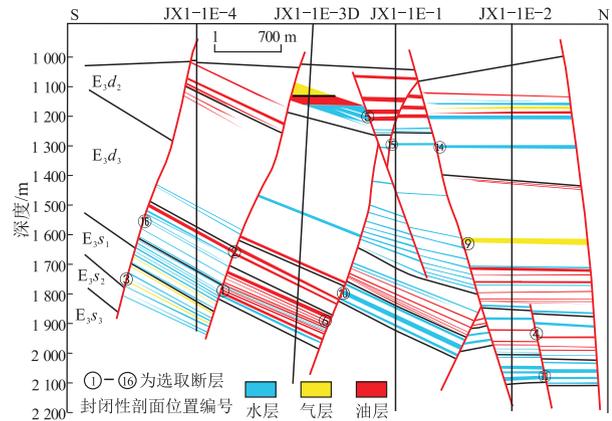


图3 辽河拗陷辽中凹陷 JX1-1 油田油藏剖面

Fig.3 Reservoir section of JX1-1 oil field, Liaozhong Sag, Liaohede Depression

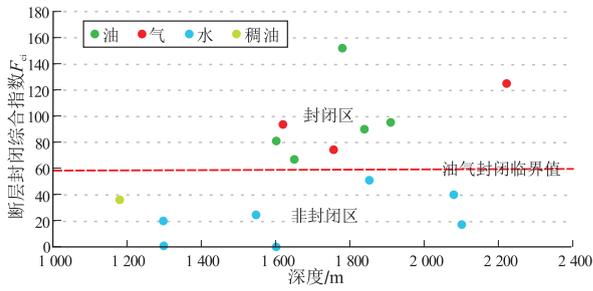


图 4 辽河拗陷辽中凹陷 JX1-1 油田断层封闭性评价

Fig.4 Fault sealing evaluation of JX1-1 oil field, Liaozhong Sag, Liaohe Depression

域的断层封闭综合指数临界值为 60(图 4),并将 60 作为该区的生长断层封闭性评价标准。在该临界值之上,油气才有被断层封闭的可能性;在临界值之下,断层很难具备封堵油气的可能性。研究区大部分稠油由于生物降解作用导致稠油的黏度和相对密度增大,部分稠油相对密度可以达到 0.98 以上,不易流动,因此稠油对于断层的封闭性要求相对较低。

3.2 JX1-1 地区辽中一号断层封闭性

通过之前建立的 JX1-1 油田的断层封闭性评价标准,对经过该区的辽中一号断层进行断层封闭性评价,判断该评价标准的可靠性,并分析其主要的控藏作用。

辽中一号断层在 JX1-1 地区构造剖面上呈现“Y”字组合构造样式(图 5)。JX1-1 地区生烃门限为 2 500 m,油气主要来自于沙三段烃源岩,极少部分来自于沙一段烃源岩^[30]。该断层从孔店组时期至今,一直活动较强烈,东营组时期最为强烈(图 6),进入第四系以来活动较弱或者几乎不活动^[31-32],因此将断层停止活动距今的时间(T)表示为第四系距今的时间(2.48 Ma)较为合理。

利用生长断层封闭综合指数 F_{ci} 对辽中一号断层进行封闭性分析评价,通过式(1)求出各个断点

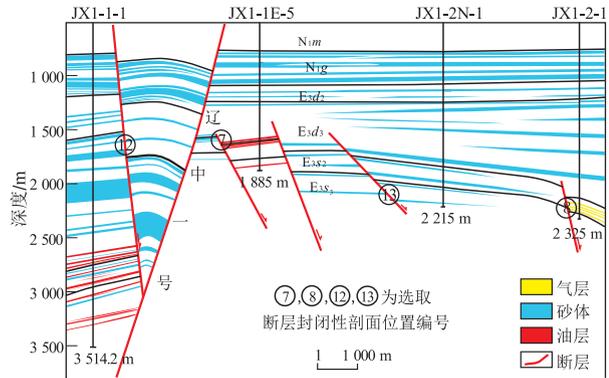


图 5 辽河拗陷辽中凹陷 JX1-1 地区辽中一号断层剖面

Fig.5 Section of Liaozhong no.1 fault in JX1-1 oil field, Liaozhong Sag, Liaohe Depression

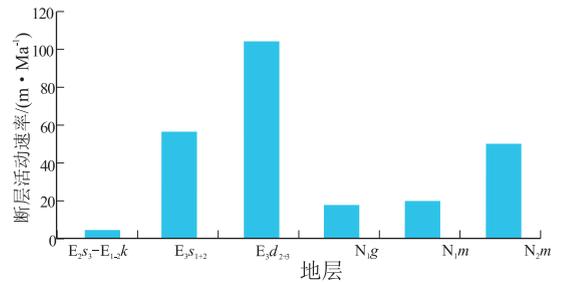


图 6 辽河拗陷辽中凹陷 JX1-1 地区辽中一号断层活动速率示意

Fig.6 Fault activity rate of Liaozhong no.1 fault in JX1-1 oil field, Liaozhong Sag, Liaohe Depression

的断面正压力,并通过式(2)计算出对应深度的 SGR ,断层活动距今的时间 T 为 2.48 Ma,最后根据式(3)计算出辽中一号断层封闭综合指数 F_{ci} (表 2)。

利用断层封闭综合指数法分析得出辽中一号断层的封闭综合指数普遍小于 60(图 7),处于非封闭区,说明该断层难以封闭住油气,封闭性差。这也是该地区油气可以源源不断地从西盘深层运移到东盘,然后在两侧浅层次级断层成藏的主要原因,与前人的认识相吻合^[30]。因此辽中一号断层在 JX1-1 地区油气成藏过程中主要起输导作用,对

表 2 辽河拗陷辽中凹陷 JX1-1 地区辽中一号断层封闭综合指数

Table 2 Closure composite index of Liaozhong no.1 fault in JX1-1 oil field, Liaozhong Sag, Liaohe Depression

编号	深度/ m	时间/ Ma	地层密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	断层倾角/ ($^{\circ}$)	断面压力/ MPa	SGR	断层封闭 综合指数 F_{ci}
1	750	2.48	2.012	73.17	2.17	0.25	0.06
2	1 020	2.48	2.160	75.22	2.98	0.33	0.15
3	1 280	2.48	2.224	75.89	3.77	0.72	0.51
4	2 160	2.48	2.306	73.07	8.11	0.30	0.97
5	2 630	2.48	2.405	70.72	12.05	0.70	5.04
6	2 830	2.48	2.474	68.25	15.26	0.68	7.90
7	2 900	2.48	2.458	66.29	16.79	0.70	9.78
8	3 021	2.48	2.465	65.16	18.36	0.70	11.69

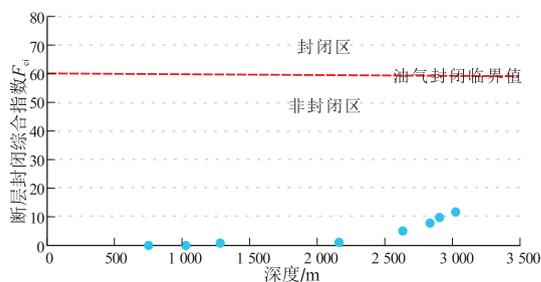


图 7 辽河坳陷辽中凹陷辽中一号断层封闭综合指数

Fig.7 Closure composite index of Liaozhong no.1 fault in JX1-1 oil field, Liaozhong Sag, Liaohe Depression

整个 JX1-1 地区油气成藏具有重要的意义。

4 结论

(1) 对断层封闭性的评价必须综合考虑断层岩的成岩作用、断面压力以及断裂带泥质含量这 3 个重要的影响因素,缺一不可。任何单一影响因素的缺失,都可能使得断层封闭性变差,难以封堵油气,而断层封闭综合指数 F_{ci} 同时兼顾了这 3 种因素,实用性较强。

(2) 通过计算 JX1-1 地区的断层现今封闭综合指数,建立了该区的断层封闭评价标准。该区的断层封闭综合指数临界值为 60,能封闭住油气的断层封闭综合指数普遍高于 60,低于该值不能封闭住油气。辽中一号断裂封闭综合指数普遍小于 60,封闭性差,在油气的成藏过程中主要起输导作用。

(3) JX1-1 地区辽中一号断层为主控断层,次级断层主要是一些伴随辽中一号主干断裂的走滑伴生断层。导致两者封闭性差异的主要因素是辽中一号断层倾角相对较大,所受断面压力较小,并且断层距今活动时间较短,活动性大,难以封闭油气。而大多数次级断裂倾角较缓,所受断面压力较大,成岩时间久,具有封闭油气的能力。

参考文献:

- [1] HARPER T R, LUNDIN E R. Fault seal analysis: Reducing our dependence on empiricism [J]. Norwegian Petroleum Society Special Publications, 1997, 7: 149-164.
- [2] OBEAHON P P, YPMA G, ONYEAGORO O U, et al. Dynamic fault seal breakdown investigation: A study of Egret field in the North Sea [C]//Proceedings of 2014 SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Amsterdam, Netherlands: Society of Petroleum Engineers, 2014.
- [3] HOU Yawei, ZHAO Chunming, SU Yanchun, et al. Evaluation of fault sealing ability and prediction of fault critical reactivation pressure in water flooding reservoir [C]//Proceedings of 2014 SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Amsterdam, Netherlands: Society of Petroleum Engineers, 2014.
- [4] VERMOTE E F, TANRÉ D, DEUZÉ J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(3): 675-686.
- [5] 武云云, 马立驰, 杨贵丽, 等. 渤海湾盆地垦东地区新近系断裂特征及其控藏作用 [J]. 石油实验地质, 2017, 39(1): 65-70.
WU Yunyun, MA Lichi, YANG Guili, et al. Fault characteristics and their controls on hydrocarbon accumulations in Neogene, Kandong area, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(1): 65-70.
- [6] 王龙, 孙福亭, 何娟, 等. 海上复杂断块油田断层封闭性综合评价: 以 PL 油田为例 [J]. 断块油气田, 2017, 24(6): 760-765.
WANG Long, SUN Futing, HE Juan, et al. Integrative evaluation of fault sealing property for complex offshore block oilfield: Taking PL Oilfield as an example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2017, 24(6): 760-765.
- [7] 孟庆洋, 贾茹, 陈琰, 等. 逆冲断裂断层侧向封闭性评价: 以柴达木盆地英东一号油气田为例 [J]. 断块油气田, 2016, 23(2): 142-145, 150.
MENG Qingyang, JIA Ru, CHEN Yan, et al. Evaluation on lateral fault sealing capacity in thrust fault: Taking No.1 Yingdong Oilfield, Qaidam Basin as an example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2016, 23(2): 142-145, 150.
- [8] 赵乐强, 贾凡建, 曹剑, 等. 准噶尔盆地西北地区断层内流体活动过程及对断层启闭性的影响 [J]. 石油实验地质, 2017, 39(4): 461-466.
ZHAO Leqiang, JIA Fanjian, CAO Jian, et al. Fluid activity in faults in the northwestern Junggar Basin and its influence on fault opening and sealing [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(4): 461-466.
- [9] 魏星, 孙寅森. 东营凹陷青西地区断裂特征及其控油气作用 [J]. 断块油气田, 2017, 24(2): 154-158.
WEI Xing, SUN Yinsen. Fault characteristics and controlling factors of hydrocarbon accumulation in Qingxi Area of Dongying Depression [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2017, 24(2): 154-158.
- [10] 张文彪, 陈志海, 许华明, 等. 断层封闭性定量评价: 以安哥拉 Sangos 油田为例 [J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(6): 21-26.
ZHANG Wenbiao, CHEN Zhihai, XU Huaming, et al. Quantitative evaluation of fault seal: A case study of Sangos oilfield in Angola [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(6): 21-26.
- [11] 李虹霖, 吴奎, 张如才, 等. 辽中南洼西斜坡断—盖耦合类型及其控藏作用: 以旅大 A 油田为例 [J]. 断块油气田, 2017, 24(2): 137-141.
LI Honglin, WU Kui, ZHANG Rucai, et al. Spatial matching types between faults and caprock and their controlling effects on hydrocarbon accumulation of western slope in southern Liaozhong Sag: Taking Lyuda A Oilfield as an example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2017, 24(2): 137-141.
- [12] 徐春华, 王亚琳. 基于无机二氧化碳成藏期探讨博兴断层启闭性: 兼论断层活动性与启闭性的关系 [J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(5): 30-36.

- XU Chunhua, WANG Yalin. Discussion on the opening and sealing properties of the Boxing Fault based on the accumulation time of inorganic CO₂: Also discussing the relationship between fault activity and sealing property [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(5): 30-36.
- [13] KNIFE R J. Juxtaposition and seal diagrams to help analyze fault seals in hydrocarbon reservoirs [J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(2): 187-195.
- [14] 陈世加, 冉乙钧, 路俊刚, 等. 红车断裂带断层封闭性的地球化学研究 [J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2008, 30(1): 21-24.
CHEN Shijia, RAN Yijun, LU Jungang, et al. The geochemistry research on the sealing feature of fault in Hongche faults [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2008, 30(1): 21-24.
- [15] YIELDING G, FREEMAN B, NEEDHAM D T. Quantitative fault seal prediction [J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(6): 897-917.
- [16] 任森林, 刘琳, 徐雷. 断层封闭性研究方法 [J]. *岩性油气藏*, 2011, 23(5): 101-105.
REN Senlin, LIU Lin, XU Lei. Research methods of fault sealing [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2011, 23(5): 101-105.
- [17] 吕延防, 王伟, 胡欣蕾, 等. 断层侧向封闭性定量评价方法 [J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(2): 310-316.
LÜ Yanfang, WANG Wei, HU Xinlei, et al. Quantitative evaluation method of fault lateral sealing [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(2): 340-347.
- [18] 梁全胜, 刘震, 何小胡, 等. 断层垂向封闭性定量研究方法及其在准噶尔盆地白家海凸起东道海子断裂带应用 [J]. *现代地质*, 2008, 22(5): 803-809.
LIANG Quansheng, LIU Zhen, HE Xiaohu, et al. The quantitative study method and its application to Dongdaohaizi fracture belt in Baijiahai Uplift, Junggar Basin [J]. *Geoscience*, 2008, 22(5): 803-809.
- [19] 王东晔, 查明, 杨勇. 运用模糊综合评判方法定量研究断层封闭性 [J]. *断块油气田*, 2006, 13(4): 5-7.
WANG Donghua, ZHA Ming, YANG Yong. Quantitative study of fault sealing with synthetic fuzzy judgment [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2006, 13(4): 5-7.
- [20] 付晓飞, 贾茹, 王海学, 等. 断层—盖层封闭性定量评价: 以塔里木盆地库车坳陷大北—克拉苏构造带为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(3): 300-309.
FU Xiaofei, JIA Ru, WANG Haixue, et al. Quantitative evaluation of fault-caprock sealing capacity: A case from Dabei-Kelasu structural belt in Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(3): 300-309.
- [21] 罗群. 断裂带的输导与封闭性及其控藏特征 [J]. *石油实验地质*, 2011, 33(5): 474-479.
LUO Qun. Transporting and sealing capacity of fault belt and its controlling on reservoir [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33(5): 474-479.
- [22] 吕延防, 李国会, 王跃文, 等. 断层封闭性的定量研究方法 [J]. *石油学报*, 1996, 17(3): 39-45.
LÜ Yanfang, LI Guohui, WANG Yuewen, et al. Quantitative analyses in fault sealing properties [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1996, 17(3): 39-45.
- [23] 董大伟, 李理, 刘建, 等. 准噶尔西缘车排子凸起东北部断层封闭性 [J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(5): 639-645.
DONG Dawei, LI Li, LIU Jian, et al. Sealing ability of faults in north-eastern Chepaizi Uplift at western margin of Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(5): 639-645.
- [24] 吕延防, 沙子萱, 付晓飞, 等. 断层垂向封闭性定量评价方法及其应用 [J]. *石油学报*, 2007, 28(5): 34-38.
LÜ Yanfang, SHA Zixuan, FU Xiaofei, et al. Quantitative evaluation method for fault vertical sealing ability and its application [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(5): 34-38.
- [25] 付广, 孟庆芬. 断层封闭性影响因素的理论分析 [J]. *天然气地球科学*, 2002, 13(3/4): 40-44.
FU Guang, MENG Qingfen. Theoretical analysis of the influencing factors of fault sealing [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2002, 13(3/4): 40-44.
- [26] 王珂, 戴俊生. 地应力与断层封闭性之间的定量关系 [J]. *石油学报*, 2012, 33(1): 74-81.
WANG Ke, DAI Junsheng. A quantitative relationship between the crustal stress and fault sealing ability [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 74-81.
- [27] SMITH D A. Theoretical considerations of sealing and non-sealing faults [J]. *AAPG Bulletin*, 1966, 50(2): 363-374.
- [28] 肖锦泉, 李坤, 胡贺伟, 等. 辽东湾坳陷辽中凹陷金县 1-1 油田构造特征与油气成藏 [J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(3): 333-340.
XIAO Jinquan, LI Kun, HU Hewei, et al. Tectonic feature and hydrocarbon accumulation of Jinxian-1 oil field at Liaozhong Sag in Liaodongwan Depression [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(3): 333-340.
- [29] 强昆生, 吕修祥, 周心怀, 等. 渤海海域北部 JX1-1 反转构造与油气成藏关系 [J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(2): 329-334.
QIANG Kunsheng, LÜ Xiuxiang, ZHOU Xinhua, et al. Relationship between JX1-1 inversion tectonics and hydrocarbon accumulation of the northern offshore Bohai Bay Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(2): 329-334.
- [30] 梁家驹. 辽中凹陷 JX1-1 油田油气成藏规律研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
LIANG Jiaju. Study on hydrocarbon accumulation rules of JX1-1 oilfield, Liaozhong Sag [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [31] 李西双, 赵月霞, 刘保华, 等. 郯庐断裂带渤海段晚更新世以来的浅层构造变形和活动性 [J]. *科学通报*, 2010, 55(8): 684-692.
LI Xishuang, ZHAO Yuexia, LIU Baohua, et al. Structural deformation and fault activity of the Tan-Lu fault zone in the Bohai Sea since the Late Pleistocene [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(18): 1908-1916.
- [32] 胡惟, 朱光, 宋利宏, 等. 郯庐断裂带渤海段第四纪活动规律探讨 [J]. *地学前缘*, 2013, 20(4): 137-150.
HU Wei, ZHU Guang, Song Lihong, et al. Analysis of Quaternary activity along the Bohai segment of the Tan-Lu Fault Zone [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(4): 137-150.