

# 饶阳凹陷马西断层封闭性评价

崔殿, 查明, 高长海, 吴兆辉

中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东东营 257061

**摘要** 断层封闭性研究对于确定油气藏的分布具有重要意义。针对断层两盘的岩性配置关系、泥岩涂抹分析、断裂充填物泥质含量分析、断层活动期与油气运移成藏期的配置和断面力学性质等影响因素的特征,对饶阳凹陷马西断层的断层封闭性进行分析,最后应用综合评价方法进行综合判断。结果表明,古近纪中晚期马西断层活动强烈,封闭性较差,正好与本区的油气运移成藏期相配合,为油藏的形成提供了有效的运移通道;新近纪至今,断层长期停止活动,且其封闭性表现出“上好下差”的特点,对本区沙河街组油藏的保存具有重要意义。

**关键词** 马西断层;断层封闭性;泥岩涂抹;断面应力;综合评价

**中图分类号** P542.31

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)19-0030-06

## Study on Fault Sealing of the Maxi Fault in the Raoyang Depression

CUI Dian, ZHA Ming, GAO Changhai, WU Zhaohui

College of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China

**Abstract** Faults can become pathways for migration of hydrocarbons, but they also can be barriers to reservoirs in different geologic epochs. Hence, it is important to study fault sealing performance to determine the distribution of reservoirs. Several factors can influence fault sealing performance, namely, the lithologic associations on two sides of a given fault, mudstone-smearing, the relationship between fault-movement periods and hydrocarbon migration intervals, and the stress of fracture surfaces. This study examined these factors for the fault sealing performance of the Maxi fault in the Raoyang depression. Fault sealing performance was evaluated using the synthesized evaluation method. Results show that the Maxi Fault grew actively in the Middle-late Cenozoic. Fault sealing was poor in this period, while hydrocarbon migration was at a peak during this interval. Thus, it appears the fault became a pathway for hydrocarbon migration. After that, the Maxi fault stopped growing for a long time. At the same time, fault sealing became more dominant, showed the specialties as upper-better and lower-worse. This situation was beneficial in creating a petroleum reservoir in Shahejie strata. However, petroleum could not be trapped in the foot wall of the Maxi Fault.

**Keywords** Maxi Fault; fault sealing; mudstone-smearing; stress of fracture surface; synthesized evaluation

### 0 引言

断层既可作为油气运移的通道,又可作为油气聚集的遮挡。在油气成藏过程中,断层最终起何种作用,关键在于它是封闭的还是开启的。因此,断层封闭性研究对油气的勘探开发有重要作用。断层封闭性是非常复杂的地质问题,受很多地质因素的影响和控制,其中断层两盘岩性配置、泥岩涂抹情况、泥质物充填含量和断层活动期与生、排烃期配置、断面力学性质等都是影响封闭性的重要因素<sup>[1-6]</sup>。对这些影响因素

进行定性与定量研究,可以合理地评价断裂的控油气作用。但是现阶段对部分影响因素的研究还存在一些问题,如受地震分辨率的限制,通常将地震剖面上无法分辨出的一组小断层解释为单一断层,导致断层两盘岩性配置的结论与实际不符,因此断层两盘岩性配置分析面临的一个最大的挑战就是准确确定断层的规模、断层岩的总厚度及小断层分布等。一般情况下统计的泥岩涂抹参数仅能反映纵向上的泥岩涂抹情况,反映不了砂岩研磨所形成的存在于断裂带内的细粒物

收稿日期:2010-08-06;修回日期:2010-09-06

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重点科技攻关项目(HBYT-WTY-2008-JS-1)

作者简介:崔殿,博士研究生,研究方向为油气输导体系,电子信箱:cuidian1982@hotmail.com;查明(通信作者),教授,研究方向为油气成藏机制及油气分布规律,电子信箱:mzha@upc.edu.cn

质,更无法表征断层水平运动对泥岩涂抹的贡献,另外泥岩涂抹研究中普遍忽略的一个问题是断层活动时期与成岩期的时间匹配问题,在成岩早期,泥岩易于塑性流动,当断层活动时,必然会造成泥岩沿断面的大量拖曳现象,导致泥岩更大范围的涂抹断面。除此之外,各影响因素定量表征公式的应用条件研究明显不足,导致计算结果与实际情况明显不符。这是断层封闭性应用中必须要解决的一个重要问题。

今后应从深层次进一步明确断层的封闭机制及其各种影响因素之间的相互关系,并进一步探讨各种封闭机制的控制因素及其半定量一定量的表征方法。本文针对以上影响因素,对马西断层进行封闭性研究,最后应用综合评价方法判断其封闭性。

## 1 地质概况

饶阳凹陷位于冀中拗陷中部,东起献县凸起,西至蠡县斜坡,北接霸县凹陷,南到新河凸起,面积 5800km<sup>2</sup>,是一个具有中央隆起的大型单断凹陷,也是冀中东部勘探程度较高、油气最富集的凹陷之一。马西断层位于饶阳凹陷东部,是正断层,延伸长度较大,根据其走向可分为北段、中段和南段。南段走向近北东东向,中段近南北向,北段近北北西向。马西断层上升盘为南马庄潜山构造带,下降盘是饶阳凹陷最大的生油洼槽——马西洼槽<sup>[7]</sup>,为南马庄潜山构造带与马西洼槽边界控制断层,具有良好的油源条件,因此其断层封闭性的有效性直接影响和控制着本区的油气运聚成藏。为了对马西断层封闭性特征进行较为全面的评价,本次研究在该断层选取了 3 个剖面(图 1)。

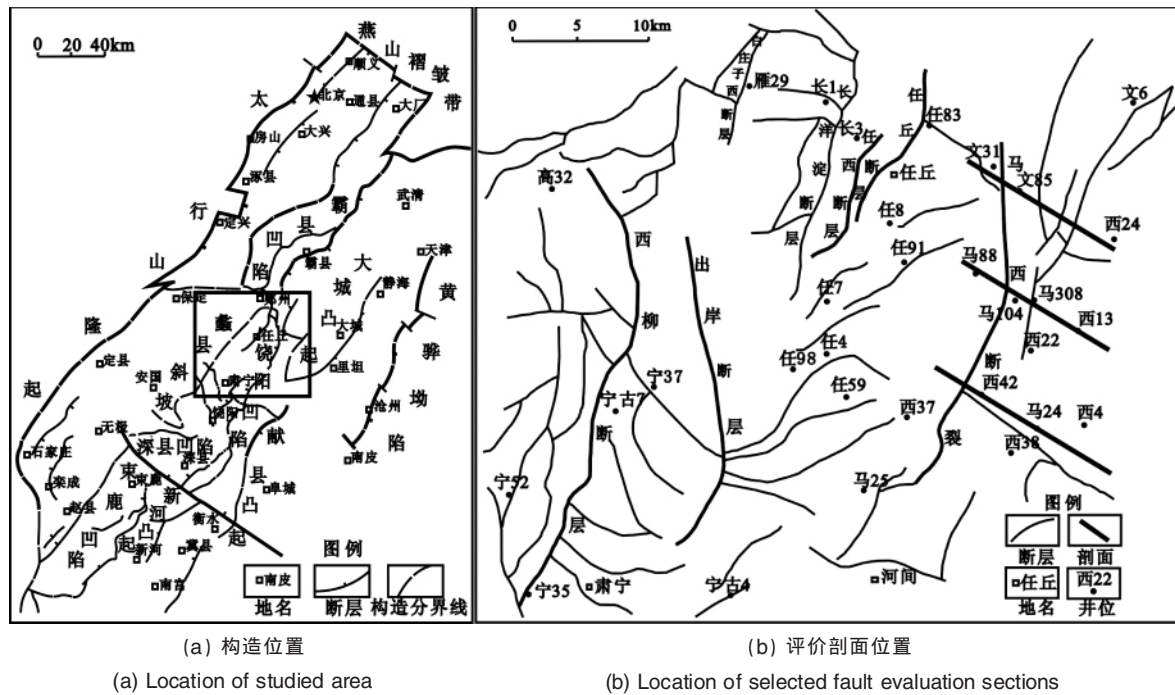


图 1 研究区构造位置和评价剖面位置示意

Fig. 1 Locations of selected fault evaluation sections in the study area

## 2 断层封闭性

### 2.1 断裂发育史与油气运移成藏期的配置

断层活动期与油气运移期的配置指控油断层的活动期和油气运移期之间的时间配置关系,若配置得当,断层可充当油气运移的通道;配置不当,断层对处于运移期的油气起遮挡作用,在断层面一侧可形成一定的油气聚集,特别是停止活动时间较长的断层,在多数情况下有良好的封闭性,这时断层对运移的油气起良好的封堵作用。而在油气大规模运移期,强烈活动的断层纵向常具有开启性,成为有效的运移通道,油气可以沿断裂运移。

古近纪早期,冀中拗陷受喜马拉雅运动 I 幕的影响,开始拉张断陷,饶阳凹陷东缘在前期构造薄弱带的基础上形成新

的西倾正断层或利用早期的逆冲断面发生构造反转,进入强烈的伸展断陷期。对下降盘的沉积地层进行分析认为,马西断裂带的主升降段发育时间相对较早(孔店中晚期),活动强烈且持续时间长;沙三期—沙一期(E<sub>s3</sub>—E<sub>s1</sub>),马西断层活动逐渐强烈,致使潜山以上的地层发生不同程度的翘倾或弯曲;古近纪末期、新近纪之前,渤海湾盆地发生了一次强烈的左旋剪压作用,引起马西断层古近纪末期强烈的断层活动,北部走滑段贯通,并发生统一的构造运动;在东营期(Ed),该潜山构造带逐渐定型;新近纪为渤海湾盆地区域拗陷阶段,该潜山构造带进入深埋期,马西断层停止活动<sup>[8-11]</sup>。

对任 28 井和任 813 井岩心样品进行流体包裹体均一温度测试,分析结果表明,饶阳凹陷北部潜山油气运移成藏期

主要在沙二段—沙三段沉积时期、东营组沉积晚期和馆陶组沉积晚期—明化镇组沉积期(图 2)。将断层活动与成藏期进行对比分析(图 3),结果表明,沙河街组四段和孔店组沉积期断层活动发生在油气大规模运移之前,对本区油气运聚成藏无效;而沙河街组三段—沙河街组二段和东营组沉积期开始的断层活动与主要油气运聚成藏期的配置关系好,是本区油气运聚成藏的最有效时期。

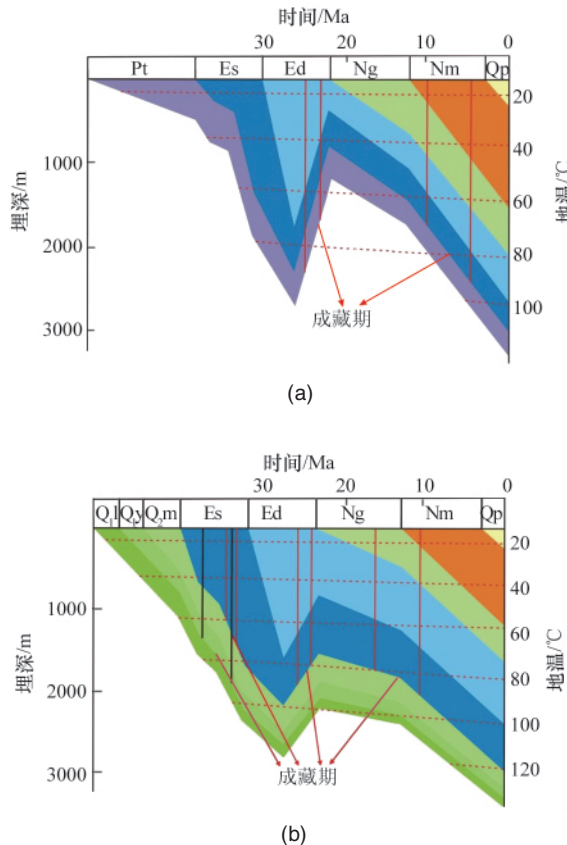


图 2 任 28 井(a)和任 813 井(b)埋藏史与成藏期次图  
Fig. 2 Burial history and hydrocarbon accumulation periods of Ren28 well (a) and Ren813 well (b)

时代	地层	马西断层活动期	油气主要运聚期	匹配关系
第四纪	平原组	Q		调整保存期
新近纪	明化镇组	Nm		
	馆陶组	Ng		
古近纪	东营组	Ed	●	运聚成藏期
	沙河街组沙一段	Es <sub>1</sub>		
	沙河街组沙二段	Es <sub>2</sub>		
	沙河街组沙三段	Es <sub>3</sub>		
	沙河街组沙四段	Es <sub>4</sub>		无效期
孔店组	Ek	●		

图 3 断层活动期与油气运聚期的配置关系  
Fig. 3 Relation of fault active periods and hydrocarbon accumulation periods

2.2 断层两盘岩性配置、泥岩涂抹分析和断裂泥质物充填量  
断层两盘的岩性配置是决定断层是否具有侧向封堵性的重要评价标准之一。若岩性配置较好,断层多具有较好的封闭性,若配置不好,断层封闭性较差,在断层面一侧很难形成油气藏。

泥岩涂抹是指断层在活动时期由于一盘泥岩的滑动对断面形成的涂抹。但实际的地层往往是非均质的,很难将其区分为泥页岩与砂岩。于是 Yielding 等<sup>[12-19]</sup>提出了泥岩削刮比 SGR,从整体上评价涂抹效应,计算公式为

$$SGR = \frac{\sum \text{泥岩层厚度}}{\text{断距}} \times 100\% \quad (1)$$

其中,泥岩层厚度指对盘地层中滑过某点的所有泥岩厚度总和,断距指断层两盘上对应层之间的垂直距离。

在实际地质条件下,受断裂错动过程巨大构造应力作用,断层两盘岩石发生破碎,填充在断层两盘之间,形成断裂充填物,分隔断层两盘。断裂充填物中泥质含量大小是影响断层在垂向和侧向封闭性的最主要因素,断裂充填物中泥质含量越高,其孔渗性越差,排替压力越高,形成封闭的可能性越大;反之越小。付广等<sup>[20-22]</sup>提出了预测断裂充填物中的泥质含量  $R_m$  的方法,计算公式为

$$R_m = \frac{h}{H+L} = \frac{1}{2(H+L)} \left( \sum_{i=1}^{n_1} h_{1i} + \sum_{j=1}^{n_2} h_{2j} \right) \quad (2)$$

其中, $L$  为垂直断距, $m$ ;  $h_{1i}, h_{2j}$  分别为断层上、下两盘第  $i, j$  层泥岩的厚度, $m$ ;  $n_1, n_2$  分别为断层两盘被错断的泥岩层数; $h$  为断层两盘目的层之间的泥岩累积平均厚度, $m$ ;  $H$  为断移地层厚度, $m$ 。

从断层产状与岩层产状配置关系看,马西断层的侧向封闭性较好。剖面上泥质岩占岩层厚度的 60% 以上,砂泥对接的概率较大,且侧向封闭的可能性也较大<sup>[23]</sup>。同时该断层倾角较陡,影响其垂向封闭性,但断距较大,断开泥岩层厚度大,断面易形成断层泥质充填物。

从油藏剖面图上看,马西断层上盘东营组和沙河街组主要砂层基本上都与对盘的泥岩或碳酸盐岩对接(图 4~图 6),从计算的 SGR 值上看,整体上具有较好的侧向封闭性。从岩性对置关系上看,断层下盘沙河街组砂层整体上具有很好的侧向封闭性,且 SGR 值基本在 0.70 以上。上盘泥岩对下盘雾迷山组主要岩层,涂抹的 SGR 值均大于封闭的下限值,表明断层封闭性较好。总体上呈现随深度增加马西断层侧向封闭性变差的趋势。

从断裂充填物泥质含量  $R_m$  的分布看(图 4~图 6),马西断层的  $R_m$  基本在 0.5 以上,断层泥质物充填效果较好,但随着深度的增加, $R_m$  有逐渐减小的趋势,呈现上好下差的特点。

通过上述分析可知,即使是相对较低的部位,SGR、 $R_m$  也大于断层封闭的下限值,可以对油气起到封堵作用。但马西断层封闭性“上好下差”的特点,使断层下盘南马庄潜山的圈闭条件较其上覆的古近系地层差,油气藏更可能分布在圈闭

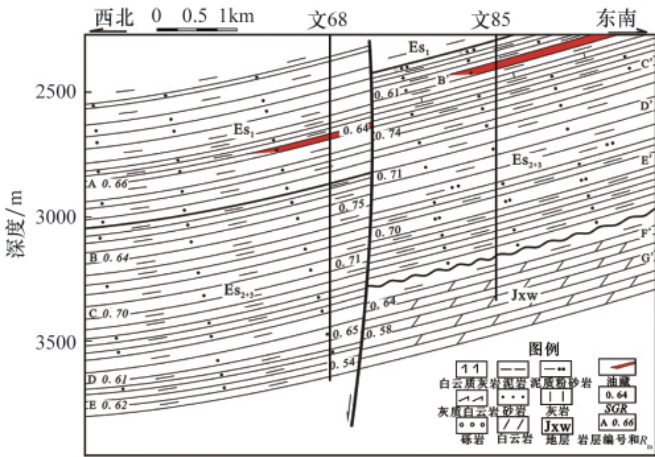


图4 马西断层北段油藏剖面  
Fig. 4 Oil reservoir section of northern Maxi Fault

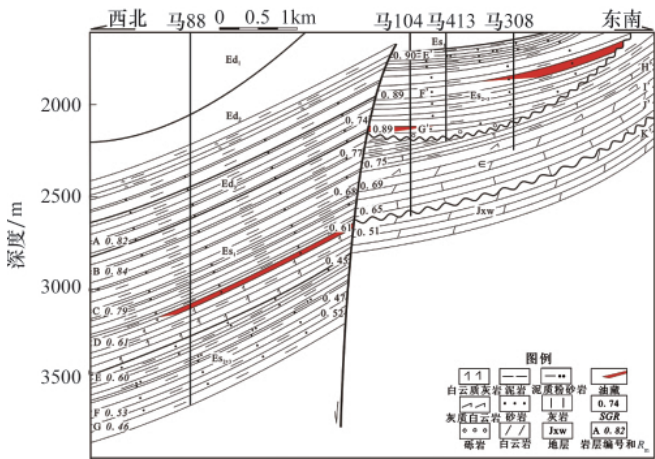


图5 马西断层中段油藏剖面  
Fig. 5 Oil reservoir section of middle Maxi Fault

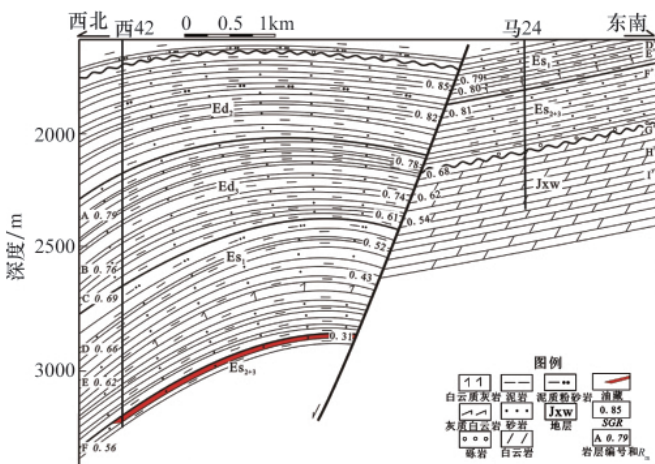


图6 马西断层南段油藏剖面  
Fig. 6 Oil reservoir section of southern Maxi Fault

条件更好的古近系地层中。

### 2.3 断面承受应力与断层封闭性

单独应用  $R_m$  值判断断层的垂向封闭性具有一定的局限性。虽然断裂充填物的泥质含量较高,但如果断面的紧闭程度不够,断面之间会形成缝隙,使油气沿断层面散逸,不利于断层的垂向封闭。因此,影响断层垂向封闭性好坏的另一个关键因素是断面的紧闭程度,若断面紧闭,断层垂向封闭性好,油气不能沿断面作垂向运移。否则,断层开启,断层成为油气运移的通道。断面紧闭程度可用断面所受的压应力衡量。断面所承受的正压力为

$$P = H_p(\rho_r - \rho_w)g \cos\theta + \sigma \sin\theta \sin\beta \quad (3)$$

其中,  $H_p$  为断面埋深, m;  $\rho_r$  为上覆地层平均密度,  $g/cm^3$ ;  $\rho_w$  为地层水密度,  $g/cm^3$ ;  $g$  为重力加速度;  $\sigma$  为水平地应力, MPa;  $\theta$  为断面倾角;  $\beta$  为地应力与断层走向之间的夹角。

根据油藏剖面图,测算参数后,由式(3)可计算出马西断层各主要岩层所受断面压应力。由表1~表3可知,马西断层北段沙河街组上部由于断层倾角过大,断面应力值很低,影响其垂向封闭性,沙河街组下部和雾迷山组断层倾角趋缓,封闭性变好,连通性变差;马西断层中段上部主要岩层承受了中等程度以上的断面应力,封闭性较好。断层下部由于断层倾角变大,断面应力偏低,封闭性较差;马西断层南段各主岩层承受了较大的断面应力,断层具有较好的封闭性。

从断面应力值的分布上看,马西断层南段断面受正应力相对较大,并且随深度增加应力值逐渐变大,使断层南段下部的 SGR、 $R_m$  值虽然相对较低,但仍具有很好的封闭性,这是该部位具有油藏分布的重要原因。马西断层北段上部断面受正应力相对较小,但由于泥岩涂抹和断裂充填物泥质含量较大,其封闭性仍然较好,油藏得以保存。北段下部由于断层倾角的变化,断面应力值变大,封闭性较好。马西断层中段上部断面受正应力较大,且泥岩涂抹和断裂充填物泥质含量较大,对油藏的保存极为有利。中段下部由于断层倾角的变化,断面应力值降低,断层封闭性逐渐变差。

表1 马西断层北段主要岩层断面应力值  
Table 1 Stress values of main strata at northern Maxi Fault

岩层编号	层位	H/m	$\theta/(^\circ)$	P/MPa
B'	ES <sub>2+3</sub>	2510	88	1.0
A	ES <sub>1</sub>	2640	88	1.1
C'	ES <sub>2+3</sub>	2680	86	2.2
D'	ES <sub>2+3</sub>	2830	86	2.3
B	ES <sub>2+3</sub>	2920	86	2.4
E'	ES <sub>2+3</sub>	3070	86	2.5
C	ES <sub>2+3</sub>	3150	81	5.8
F'	Jxw	3370	81	7.3
D	ES <sub>2+3</sub>	3460	81	6.4
G'	Jxw	3480	81	7.5
E	ES <sub>2+3</sub>	3560	81	6.6

表 2 马西断层中段主要岩层断面应力值

Table 2 Stress values of main strata at middle Maxi Fault

岩层编号	层位	H/m	$\theta/(\circ)$	P/MPa
E'	Es <sub>2+3</sub>	1720	74	5.6
F'	Es <sub>2+3</sub>	1940	74	6.3
A	Es <sub>1</sub>	2070	74	6.8
G'	Es <sub>2+3</sub>	2130	74	7.0
B	Es <sub>1</sub>	2230	74	7.3
H'	C	2320	74	8.8
I'	C	2440	86	2.4
C	Es <sub>1</sub>	2470	86	2.0
J'	C	2575	86	2.5
D	Es <sub>1</sub>	2660	86	2.2
K'	Jxw	2690	86	3.2
E	Es <sub>2+3</sub>	2710	86	2.2
F	Es <sub>2+3</sub>	3020	86	2.5
G	Es <sub>2+3</sub>	3110	86	2.8

表 3 马西断层南段主要岩层断面应力值

Table 3 Stress values of main strata at southern Maxi Fault

岩层编号	层位	H/m	$\theta/(\circ)$	P/MPa
D'	Es <sub>1</sub>	1730	70	7.0
E'	Es <sub>1</sub>	1790	70	7.9
F'	Es <sub>2+3</sub>	1910	70	7.7
A	Ed <sub>3</sub>	2150	69	9.1
G'	Jxw	2180	69	9.3
B	Ed <sub>3</sub>	2280	69	9.7
H'	Jxw	2290	69	11.3
C	Ed <sub>3</sub>	2380	69	10.1
I'	Jxw	2410	69	11.9
D	Es <sub>1</sub>	2520	68	11.2
E	Es <sub>1</sub>	2640	68	11.7
F	Es <sub>2+3</sub>	2890	68	12.1

#### 2.4 断层封闭性综合评价

根据断层封闭性影响因素的分析,选取断层的活动性、断层断面图(即产状配置关系)、断层两盘地层中泥岩的对置关系、泥岩削刮比、断裂填充物泥质含量和断面承受应力6个参数作为断层封闭性研究综合评价指标。在总结前人研究成果的基础上,依据这6个参数的不同取值,对断层的封闭性的影响进行等级划分<sup>[24-26]</sup>,分为3个等级(表4),但各影响因素对断层封闭性分析的作用并不相同,应采取下列步骤对断层的封闭性进行综合评价:①若断层活动强烈, $SGR \leq 0.20$ ,断层面上缺乏泥岩剪切带,垂向封闭性一定差,综合评价结果为封闭性差;②若断层不活动或弱活动,但在断层剖面图上显示泥岩对置区域在断面上呈同向分布,那么该断层在侧向和垂向上都不具有封闭性,综合评价结果为封闭性差;③对于应用上述方法判断有可能构成封闭的断层,采用

表 4 断层封闭性综合评价参数划分

Table 4 Division of fault seal evaluation parameters

评价参数	好(封闭)	中等(半闭半开)	差(开启)
断层活动性	不活动或活动性很强(有泥岩剪切带)	活动弱(无泥岩剪切带)	活动强烈(无泥岩剪切带)
断层剖面图	泥岩对置区域在断面上两侧向下弯曲	泥岩对置区域在断面上两侧向下微弯曲	泥岩对置区域在断面上呈同向分布
断层两盘泥岩对置	多处对置	少数对置	基本不对置
$SGR$	$>0.60$	$0.20 \sim 0.60$	$<0.20$
$R_m$	$>0.50$	$0.25 \sim 0.50$	$<0.25$
$P/MPa$	$>7.50$	$3.50 \sim 7.50$	$<3.50$

断层两盘地层中泥岩的对置关系、泥岩涂沫的方法予以判断;④若③的评价结果为好或中等,再采用断裂填充物泥质含量和断面应力的方法予以综合判断。

#### 2.5 综合评价结果

根据上述断层封闭性综合评价参数和步骤,对马西断层封闭性进行综合评价。评价结果表明,马西断层封闭性存在较大差异性,不同部位、不同层位的封闭特征不同;马西断层北段上部断面应力较差但断裂填充物泥质含量较大,封闭性仍较好,下部断面应力值逐渐增大,断层封闭性较好;断层中段上部封闭性很好,下部由于断面应力较差,封闭性逐渐变差;断层南段封闭性整体较好。综合认为马西断层两侧古近系地层封闭性较好,对沙河街组油藏的保存具有重要意义,总体显示出上好下差的特点。

### 3 结论

针对断层两盘的岩性配置关系、泥岩涂抹、断裂填充物泥质含量、断面承受应力、断裂活动期、油气运移成藏期的配置关系等参数特征,利用综合评价方法,对饶阳凹陷马西断层的封闭性进行了详细评价。

结果表明,马西断层在古近纪中晚期的活动与该地区油气的运聚成藏期相配合,作为油气的运移通道沟通了油源与圈闭即马西洼槽与南马庄潜山;之后,由于断层构造运动的减弱,断层逐渐封闭,且表现出“上好下差”的封闭特点,使下盘南马庄潜山油藏形成较少,反而上覆沙河街组地层形成了一套古近系油藏。因此,在类似的潜山油藏的勘探中,不应仅着眼于潜山本身,还应关注控油断层控制的其他地层。

#### 参考文献 (References)

- [1] 刘泽容, 信荃麟, 邓俊国, 等. 断块群油气藏形成机制和构造模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.  
Liu Zerong, Xin Quanlin, Deng Junguo, et al. Formation mechanism and

- tectonic model of fault block group hydrocarbon pool [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [2] 吕延防, 付广. 断层封闭性研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.  
Lu Yanfang, Fu Guang. The research of fault seal[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [3] 刘伟, 贾中, 李丽. 复杂断块油气田断层封闭性综合分析方法[J]. 断块油气田, 2002, 9(1): 25-28.  
Liu Wei, Jia Zhong, Li Li. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2002, 9(1): 25-28.
- [4] 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.  
Lu Yanfang, Li Guohui, Wang Yuewen, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 1996, 17(3): 39-45.
- [5] 张永华, 贾曙光, 杨春峰, 等. 断层封堵性的应用研究 [J]. 石油物探, 2001, 40(4): 83-88.  
Zhang Yonghua, Jia Shuguang, Yang Chunfeng, et al. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2001, 40(4): 83-88.
- [6] 高先志, 杜玉民, 张宝收. 夏口断层封闭性及对油气成藏的控制作用模式[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 76-78.  
Gao Xianzhi, Du Yumin, Zhang Baoshou. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(3): 76-78.
- [7] 卢明国, 刘俊, 沈华. 饶阳凹陷马西断裂分段性研究 [J]. 中国矿业, 2007, 16(11): 91-93.  
Lu Mingguo, Liu Jun, Shen Hua. *China Mining Magazine*, 2007, 16(11): 91-93.
- [8] 孙东胜, 刘池阳, 杨明慧, 等. 冀中拗陷马西断裂带分段特征及其与油气的关系[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 238-244.  
Sun Dongsheng, Liu Chiyang, Yang Minghui, et al. *Oil & Gas Geology*, 2003, 24(3): 238-244.
- [9] 赵重远. 渤海湾盆地的构造格局及其演化[J]. 石油学报, 1984, 5(1): 1-8.  
Zhao Zhongyuan. *Acta Petrolei Sinica*, 1984, 5(1): 1-8.
- [10] 任建业, 胡祥云, 张俊霞. 中国东部晚中生代构造活化及其演化过程 [J]. 大地构造与成矿学, 1998, 22(2): 89-96.  
Ren Jianye, Hu Xiangyun, Zhang Junxia. *Geotectonica et Metallogenia*, 1998, 22(2): 89-96.
- [11] 唐智, 吴华元. 中国石油地质志: 第5卷 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1988: 20-85.  
Tang Zhi, Wu Huayuan. *Petroleum geology of China: Vol. 5*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988: 20-85.
- [12] Yielding G, Freeman B, Needham D T. Quantitative fault seal pre-diction[J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81: 897-917.
- [13] Smith D A. Theoretical consideration of sealing and non-sealing faults [J]. *AAPG Bulletin*, 1966, 50(2): 363-371.
- [14] Smith D A. Sealing and non-sealing faults in Louisiana Gulf Coast Salt Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 1980, 64(2): 145-172.
- [15] Warts N. Theoretical aspects of cap-rock and fault seals for single and two phase hydrocarbon columns [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1987, 4(4): 274-307.
- [16] Allan U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures[J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(7): 803-811.
- [17] Bouvier J D, Kaars -Sijpesteijn C H, van der Pal R C. Three dimensional seismic interpretation and fault sealing investigations, Nun River Field, Nigeria[J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(11): 1397-1414.
- [18] Knipe R J. Deformation mechanisms—recognition from natural tectonites [J]. *Journal of Structural Geology*, 1989, 27(3): 127-146.
- [19] Weber K J. The role of faults in hydrocarbon migration and trapping in Nigerian growth faults structures[C]. Tenth Annual Offshore Technology Conference, Houston, 1978.
- [20] Gibson R G. Fault-zone Seals in siliciclastic strata of the Columbus Basin, Offshore Trinidad[J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(9): 1372-1385
- [21] 付广, 薛永超, 杨勉. 利用断裂充填物中的泥质含量研究断裂封闭性的方法[J]. 断块油气田, 1999, 6(1): 9-12.  
Fu Guang, Xue Yongchao, Yang Mian. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 1998, 6(1): 9-12.
- [22] 吕延防, 陈章明, 陈发景. 非线性映射分析判断断层封闭性 [J]. 石油学报, 1995, 16(2): 36-41.  
Lu Yanfang, Chen Zhangming, Chen Fajing. *Acta Petrolei Sinica*, 1995, 16(2): 36-41.
- [23] 赵密福, 李阳, 张煜, 等. 断层两盘岩性配置关系及断层的封闭性[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(1): 7-11.  
Zhao Mifu, Li Yang, Zhang Yu, et al. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition*, 2006, 30(1): 7-11.
- [24] 杨勇, 邱贻博, 查明. 用模糊综合评判方法研究断层封闭 [J]. 新疆石油地质, 2005, 26(1): 102-104.  
Yang Yong, Qiu Yibo, Zha Ming. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2005, 26(1): 102-104.
- [25] 李储华, 罗龙玉, 陈平原. 断层封闭模糊评判中权重系数及隶属函数的分析应用[J]. 复杂油气藏, 2009, 2(1): 5-13.  
Li Chuhua, Luo Longyu, Chen Pingyuan, et al. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2009, 2(1): 5-13.
- [26] 付广, 陈章明, 吕延防, 等. 断层封闭性综合评价方法探讨及其应用 [J]. 河南石油, 1996, 10(2): 7-12.  
Fu guang, Chen Zhangming, Lu Yanfang, et al. *Henan Petroleum*, 1996, 10(2): 7-12.

(责任编辑 刘志远)

本期好玩的数学——添棋子答案

