

文章编号:1004-5589(2005)03-0259-06

黏土涂抹充填方法评价断层封闭性研究

杨智¹, 何生¹, 李奇艳², 王芙蓉¹

(1. 中国地质大学地球资源学院, 湖北武汉 430074; 2. 中石化河南油田有限责任公司勘探开发研究院, 河南南阳 473132)

摘要: 断层封闭性的评价是研究控制油气运聚的断裂输导体系的核心问题。黏土涂抹充填评价方法是评价断层封闭性的方法之一。断层封闭与否的机理是断裂带及断层两盘存在排驱压力差, 黏土涂抹充填方法将断裂带中的泥质百分含量与排驱压力差的相关关系很好地反映出来。列举影响断层封闭性的诸多要素, 探讨因黏土涂抹充填封闭断层的机理, 进而总结了国内外用黏土涂抹充填方法研究断层封闭性的进展, 重点讨论了断层泥比率法(SGR)及与其相关的定量评价方法。

关键词: 黏土涂抹充填方法; 断层封闭性; 断层泥比率法

中图分类号: P542

文献标识码: A

Fault sealing estimation with method of clay smearing and filling

YANG Zhi¹, HE Sheng¹, LI Qi-yan², WANG Fu-rong¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, Henan Oilfield Ltd Co., SinoPec, Nanyang 473132, Henan, China

Abstract: The estimation of fault sealing is a key subject for studying petroleum migration and accumulation in sedimentary basins. The mechanism of fault sealing is the capillary displacement pressure in fault zone and juxtapositional faulted strata or between them, and the pressure has positive relation to the clay amount in juxtapositional faulted strata or in the fault zone, which can be shown better by the clay smearing and filling method in their relations. The authors summarize the advance of fault sealing evaluation using the clay smearing and filling method, and discuss on the Shale Gouge Ratio method and other related quantitative estimating methods for fault sealing.

Key words: clay smearing and filling method; fault sealing; Shale Gouge Ratio

0 引言

大量的研究成果表明, 断层与油气的运移和聚集关系十分密切, 它既可以成为油气运移的通道, 又可以成为油气聚集的遮挡, 断层起何种作用关键在于其封闭性与开启性^[1,2]。断层封闭性评价的研究在油气运移、聚集、油气开发及油气资源评价过程中具有相当重要的作用^[3]。但是由于其固有的复杂

性和不确定性, 相对于其他石油地质理论, 断层封闭性评价的研究又是一个相对薄弱的方面^[4]。

断层是一个相当复杂的构造现象, 控制其形成演化的因素很多, 因此影响断层封闭性的因素也很多, 基于对不同影响因素的理解程度的不同, 会产生很多评价断层封闭性的方法。虽然每种方法都是在断层封闭机理(断层封闭与否的机理是断裂带及断层两盘存在排驱压力差)的基础上提出来的, 但是

收稿日期: 2005-03-02; 改回日期: 2005-04-19

基金项目: 中石化股份有限公司中南分公司资助项目(XYK-2004-01)

各自的繁简程度、获取评价所需参数数据的难易程度和对研究区断层封闭性的反映程度及角度等差异极大。为此就需要对各种方法进行总结。黏土涂抹充填方法是评价断层封闭性的一种简单实用的方法,它将断裂带中的泥质百分含量与排驱压力差的相关关系很好地反映出来,是一种有效的评价方法。因此,系统地对黏土涂抹充填引起断层封闭这一地质现象进行总结、归纳,对各种黏土涂抹充填方法进行比较,对研究油气运聚非常有意义。

1 断层封闭性的影响因素及概念

评价断层封闭性,就要深入了解影响断层封闭性的诸多变量,包括:①断层两侧岩性的对置关系、断层面的黏土涂抹或嵌入及断裂带充填物的岩性、物性;②断层的力学性质(张性、压性、扭性)及断层分布密集程度;③断层的基本特征,如断层的产状(倾向、走向、倾角)、断距、活动强度、埋深等及其紧闭程度(由上覆岩层的静岩压力和区域主压应力控制);④断层的形成演化与油气演化的关系以及其他方面的一些因素,如断层两侧的水化学条件、断层两侧异常压力分布等(表1)。如此繁多的变量,反映了断层固有的复杂性和不确定性特征,由此产生

的评价断层封闭性的方法也必然多种多样。

综合对断层封闭性的解释和理解^[1,2,5,6,12,15,20],所谓断层封闭性是指断层与地层物性的各向异性相配合所形成的能够阻止油、气继续运移,使其聚集起来的新的物性和压力系统。

评价预测断层封闭性,自1966年Smith建立断层封闭性理论模型之后,20世纪70—80年代国内外许多学者做了大量研究工作,近10年来取得了许多进展^[2,15,24,25],其中用黏土涂抹充填方法评价预测厚层碎屑岩层序地区的断层封闭性的地质方法是这一领域研究的主要进展之一。

2 黏土涂抹充填方法研究

2.1 黏土涂抹充填方法研究进展

Smith^[6]从分析断层封闭性的本质入手,建立了断层封闭性理论模型,认为目的盘岩层中的排替压力小于与之对置的断层另一盘地层排替压力时,断层封闭,可以用断层两盘砂泥对置作为断层封闭的主要标准应用于实际断层封闭性的判断^[6]。Smith^[7]利用油田实例证实了断层两侧砂泥对置断层封闭理论的正确性,并通过野外实际观察,证实了断层泥的存在。Smith所建立的理论模型对

表1 断层封闭性影响因素表
Table 1 Influential factors of fault sealing

影响因素	判别标志
岩性因素	1. 同生断层的断移地层砂泥比值 >1.0 ,非同生断层的 >0.8 时,断层不具有封闭性; ^[5]
	2. 封闭断层断移地层的砂泥比值 <0.6 ; ^[5]
	3. 渗透性岩层与上倾方向另一盘非渗透性岩层对置,断层具有封闭性; ^[6-10]
	4. 盖层不断开,断层垂向封闭性好; ^[1,7,8,11]
	5. 断层两盘均为渗透性岩层相对置时,断层泥可提供有效封闭; ^[2,3,9,11,12]
	6. 断裂带充填物泥质含量越高,封闭性越好; ^[2,3,9,13]
	7. 固结良好的岩层或脆性岩层被断移时,断层封闭性较差。 ^[2,3,9,14,15]
力学因素	8. 最大主应力轴 σ_1 方向与断层走向越趋于垂直,断层封闭性越好; ^[16-19]
	9. 张性断层比压性断层的封闭性差,先张后压的断层的封闭性好; ^[14,16-20]
	10. 断层埋深越大,封闭性越好; ^[14,10]
	11. 断层分布的密集程度越大,断层的封闭性越差。 ^[2,3,9,21,22]
	12. 压扭性断层的封闭性比张扭性断层封闭性好。 ^[9,14,16-20]
几何因素	13. 断层倾角越小,断层封闭性越好; ^[9,14,18,19]
	14. 断距不大的断层封闭的可能性大,水平断距越大,封闭性越差; ^[14,18,19]
	15. 与断层有关的裂缝带相穿插的断层,渗透性好,封闭性差; ^[3,18,19]
	16. 大断距的断层增大形成裂缝的可能性大,油气垂向渗漏的可能性增大。 ^[21]
活动性	17. 正在活动的断层具开启性,但横向上易产生流动页岩遮挡; ^[1,3,15,20,22,23]
	18. 停止活动的断层有一定的封闭性,停止活动时间越长,越有利于封闭; ^[1,22,23]
	19. 从下往上断距越来越小的断层,其封闭性从下往上越来越好。 ^[1,20]
其他	20. 断裂带的矿化作用、成岩胶结作用及石油降解作用都可增加其封闭的可能性; ^[6,7,12]
	21. 欠压实泥岩的异常超压会使该层的断层面有封闭性; ^[1,15]
	22. 断层两侧的水化学条件差异较大时,封闭性好。 ^[10]

断层封闭性的研究有极大的开创性和指导性,此后人们所做的工作,基本都是从不同角度证实 Smith 模型的正确性。

Weber 等^[11]利用实验模拟了断层泥的形成,证实了在剪切作用下的塑性地层可以形成断层泥,同时描述了德国境内出露的生长断层的黏土涂抹(图1),对所产生的断层泥进行了封闭性能测试,确认断层泥可对流体起遮挡作用。

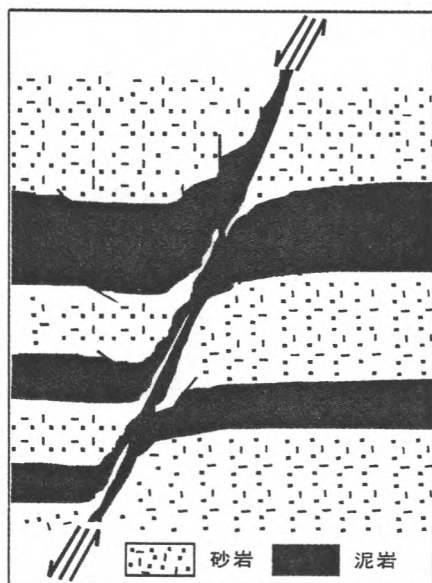


图1 德国弗雷兴褐煤矿区黏土涂抹分隔砂岩层^[11]

Fig. 1 Field example of clay smears separating sandstone from Frechen lignite mines of Germany^[11]

Bouvier等^[20]通过对尼日利亚农河油田断层两盘地层接触情况和断层封闭情况进行研究后指出,断层泥的存在可以阻挡油气穿断层运移。并提出用“泥岩涂抹潜力 CSP (clay smear potential)”判别断层的相对封闭程度。之后,Fulljames 等 (1996) 和 Lehner 等 (1996) 对 CSP 进行了改进,分别提出了新的 CSP 和 SF (smear factor) 公式^[9]。

Allan^[26]提出利用断面剖面上断移地层的对置情况来分析判断断层的侧向封闭能力。该方法假设无断裂充填物,以断层为剖面,将断层两盘各自的岩层按实际地层产状投影到断面剖面上,根据两盘渗透性地层和非渗透性地层的分布状态从油气运移角度分析各点断层的侧向封闭性。

Lindsay 等^[24]观察到在单一页岩错断过程中,页岩逐渐泥化且形成的页岩涂抹厚度随断层位移的

加大而变薄,因此,认为页岩涂抹的空间连续性与页岩厚度比例及断层位移有关,提出了“页岩涂抹因子 SSF (shale smear factor)”来表征页岩涂抹层的连续程度。从而将对断层封闭性的评价研究大大推进了一步。

国内,陈发景等^[1]建立了断层差异排替压力封闭能力判断模型。该模型假设断层封闭能力的大小取决于目的盘储层与对置盘地层、断裂充填物质及盖层内断层裂缝排替压力差的大小,准确地把握了断层封闭的机理,对北大港油田开发区油藏的研究也证实了所建模型是正确可行的。

吕延防等^[5]统计了辽河油田开发区同生断层和非同生断层的砂泥比值,发现两种断层的封闭性与断移地层的砂泥比值有很好的相关关系,为此提出了非线性映射分析法判断断层的封闭性。鉴于我国陆相沉积盆地砂泥岩层单层厚度不大、横向相变快的特点,他又提出了利用砂泥对接概率模拟的方法研究断层两盘砂泥岩层的对置情况^[8]。

付广等^[26-28]提出了一套适合我国断层的黏土涂抹充填的评价方法,并将其应用于松辽盆地和塔里木盆地断层封闭性的研究中,取得了很好的效果。

为很好地解决厚层非均质碎屑岩地层因黏土涂抹充填而造成的断层封闭问题,Yielding 等^[12]提出了断层泥比率 SGR (shale gouge ratio)。该方法准确地把握了厚层非均质碎屑岩地层断层封闭的机理,得到了广泛地应用^[29-31]。

上述研究揭示了断层的封闭程度主要取决于断层两侧岩性及其与断裂带充填物质的排替压力差。对断层封闭性的研究经历了从单纯对两盘岩层的对置情况以及黏土对断层面的涂抹或嵌入研究,如 Smith 的理论模型、Allan 的断面对置图、Bouvier 等和 Lindsay 等的涂抹方法及吕延防等的概率模拟方法等,到关注对断裂带充填物物性的预测和评价,如陈发景等和付广等对断裂带物性的评价,Yielding 等的 SGR 等,反映了应用黏土涂抹充填方法评价断层封闭性取得的巨大进展。

2.2 黏土涂抹充填方法机理探讨

实际地质条件下,断层两盘常常不是直接接触的。无论是正断层还是逆断层,在断层两盘相对运动过程中,由于巨大的构造应力作用或重力作用,断层面和断裂带上往往会形成碎裂岩系列的构造岩,或发生塑性物质流动,甚至出现重结晶现象,产

生糜棱岩系列的构造岩。地层错断过程中,黏土对断层封闭所起的作用体现在两个方面:一方面是对目的盘储层的涂抹或嵌入增强其侧向封堵油气的的能力,另一方面是塑性流入或以岩石碎块的形式充填于断裂带中,以其较差的物性而使断裂带具有较强的垂向和侧向遮挡油气的的能力。即黏土的作用体现在涂抹和充填两个方面。

黏土涂抹是指在断层活动过程中,由于泥岩的软塑性大,在挤压应力或重力作用下,泥岩被粉碎成黏土,在其上下盘断壁间被削截的砂岩层上形成的一个致密的黏土隔层。黏土涂抹只能存在于泥岩位移经过的断层部分,由于受断层性质、断层地层泥地比、断层产状及光滑程度的影响,其在空间上的发育部位及发育程度差异较大。

黏土充填是指断层错断过程中,断移地层两盘的岩石破碎成黏土后以各种形式进入断裂带中造成其物性变差而使其具有封闭能力。

在静水压力条件下,控制断层封闭性的主要参数是断层面上或断裂带中的黏土含量。因此,考察可能涂抹于断层面或被拖曳进断裂带的黏土物质的含量就可以预测可能的油气排驱压力。不管是涂抹还是充填,都与断层两盘地层的岩性密切相关,断层两盘是物质来源,很大程度上直接决定了涂抹或充填的效果,为评价由于黏土涂抹或充填而造成的断层封闭提供了理论依据,可以导出相关预测因黏土涂抹充填引起断层封闭的相关公式。

2.3 黏土涂抹充填定量研究方法

基于对断层封闭机理的准确理解,众多学者提出了一些定量评价方法。

Bouvier 等^[22]提出用“黏土涂抹潜力 *CSP* (clay smear potential)”判别断层的相对封闭程度。*CSP* 表示沿断面某点被经过它的某泥岩层涂抹的相对值,其值随某泥岩层厚度的增加呈正相关关系,随涂抹距离的增大呈相反关系^[20]。Jev 等将 *CSP* 方法应用于尼日尔三角洲的 Akaso 油田,推导出 *CSP* > 30% 时断层是封闭的。

Lindsay 等^[24]提出了“页岩涂抹因子 *SSF*”, $SSF = \text{断距} / \text{页岩层厚度}$,即断层的断距越小,断开页岩的厚度越大,页岩涂抹层在空间上的连续性越好,断层的封闭性越好。应用该方法,在研究 80 个断层的封闭性后,得出当 $SSF > 7$ 时,页岩涂抹不再连续,即不再具有封闭性。

一般, *CSP* 适用于断面剪切型的涂抹,而 *SSF* 主要适用于压入型的涂抹,但均不适合非均质的厚层碎屑岩层序。为此, Yielding 等^[12]提出了断层泥比率 *SGR* 及其计算公式(图 2):

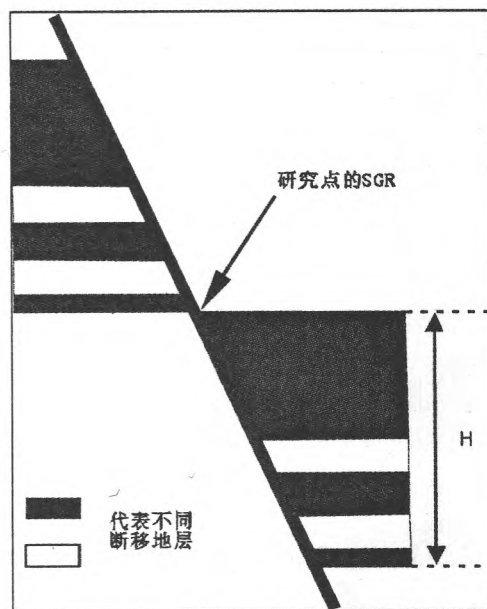


图 2 SGR 公式计算示意图^[12]

Fig. 2 Sketch map showing the Shale Gouge Ratio equation^[12]

$$SGR = \frac{\sum (H_i \times P_i)}{H} \times 100\% \quad (1)$$

SGR 表示通过各种机理涂抹或嵌入断层面上的黏土以及挤入断裂带的泥页岩的概率, H_i 代表断移地层 i 的厚度 (m); P_i 代表断移地层 i 的黏土百分含量 (%); H 代表经过研究点的断移地层的总断距 (m)。围岩中泥页岩含量越高,断裂带中泥页岩、断层泥泥化的可能性就越大,其孔渗性就越差,毛细管排替压力就越高,形成封闭的可能性就越大;反之越小^[12]。

封闭性参数 *SGR*, 必须用一种压力数据来对应以作为判断断层封闭能力的标准, 烃柱高度无疑是最佳的选择, 为此建立了与断裂带排驱压力 *FZP* (fault zone capillary entry pressure) 之间的关系, 公式如下:

$$FZP = 10^{(SGR/27 - C)} \quad (2)$$

深度 < 3 000 m, C 取 0.5; 3 000 ~ 3 500 m, C 取 0.25; > 3 500 m, C 取 0^[29]。

提供了一种预测断层能够封闭的最大烃柱高

度的方法。当浮力超过断层的排驱压力时,油气将发生侧向渗漏,而不必限制于构造的顶部或是SGR值最小的地方。

SGR与FZP之间的经验公式可用于导出两盘断层能够支撑的烃柱高度:

$$H = \frac{FZP}{g(\rho_w - \rho_h)} \quad (3)$$

H为烃柱高度(m),FZP为断裂带排驱压力(MPa), ρ_w 为孔隙水的密度(kg/m^3), ρ_h 为烃的密度(kg/m^3),g为重力加速度(m/s^2)^[29]。

Gibson等在特立尼达岛近海的哥伦布盆地^[30], Davies等在墨西哥湾的南沼泽岛36区^[31]应用SGR法分析取得了很好的效果。

3 结束语

(1)用黏土涂抹充填方法评价断层封闭性,理解了断层封闭性的实质,将断移地层的泥地比作为评价要素,有效地揭示了断层封闭与否的客观实际,尤其是SGR法,更能有效地反映厚层碎屑岩区的断层封闭情况,对于我国大多数盆地是陆相沉积盆地的实际情况具有重大应用价值。

(2)黏土涂抹充填方法反映的不是断层面上和断裂带充填物中真正的泥质含量,只是一个预测值。除了受断移地层岩性和断距大小的影响,断层面上和断裂带充填物中的泥质含量只有在两盘断移地层岩性均匀涂抹于断层面或均匀充填于断裂带时,才能准确地反映它们的泥质含量。而实际地质条件下,断层两盘岩性并非能均匀破碎填充于断裂带中,因此黏土涂抹充填方法与实际结果存在一定的偏差。再者,该方法是在断裂带后期没有成岩作用的前提下进行的,有一定的局限性。另外,作为断层封闭性评价的另一关键要素断距来说,它与断层封闭情况的对应关系非常复杂,需要结合研究区的实际情况做具体探讨。

(3)用黏土涂抹充填方法评价断层的封闭性,虽在一定程度上可以反映断层封闭的实际情况,但由于断层是一个极其复杂的地质现象,断层封闭与否有很大的随机性,若要全面、准确地反映它的封闭情况,需广泛结合其他方法和资料,比如构造应力紧闭指数、断层两侧地层水参数对比、地层压力对比、油水界面对比等等。

黏土涂抹充填方法反映了断层封闭的实质,是

评价断层封闭性的一种有效而重要的参照,随着钻探、测试技术的提高,尤其是地震测井解释和反演软件模型反映地质问题能力的提高,将会更加准确地获取黏土涂抹充填方法所需的参数数据,从而增强这种方法的评价能力。

参考文献:

- [1] 陈发景,田世澄. 压实与油气运移[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1989:136-163.
CHEN Fa-jing, TIAN Shi-cheng. Compaction and hydrocarbon migration [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1989: 136-163.
- [2] 吕延防,付广. 断层封闭性研究[M]. 北京:石油工业出版社,2002:1-157.
LÜ Yan-fang, FU Guang. Fault sealing study [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 1-157.
- [3] 金之钧,张一伟. 油气成藏条件及主要控制因素[M]. 北京:石油工业出版社,2002:65-79.
JIN Zhi-jun, ZHANG Yi-wei. Conditions and key controlling factors for oil/gas accumulation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 65-79.
- [4] Davies R K. Introduction to AAPG Bulletin thematic issue on fault seals [J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87: 377-380.
- [5] 吕延防,陈章明,陈发景. 非线性映射分析断层封闭性评价方法[J]. 石油学报,1995,10(2):7-12.
LÜ Yan-fang, CHEN Zhang-ming, CHEN Fa-jing. Fault sealing estimation method using nonlinearity mapping analysis [J]. *Acta Petroli Sinica*, 1995, 10(2): 7-12.
- [6] Smith D A. The theoretical consideration of sealing and nonsealing faults [J]. *AAPG Bulletin*, 1966, 50: 363-374.
- [7] Smith D A. Sealing and nonsealing faults in Louisiana Gulf Coast salt basin [J]. *AAPG Bulletin*, 1980, 64: 145-172.
- [8] 吕延防,付广,高大岭,等. 油气藏封盖研究[M]. 北京:石油工业出版社,1996:4-30.
LÜ Yan-fang, FU Guang, GAO Da-ling, et al. Hydrocarbon reservoir sealing study [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 4-30.
- [9] 白新华,罗群. 断层封闭性评价研究[J]. 大庆石油学院学报,1998,22:89-102.
BAI Xin-hua, LUO Qun. Fault sealing estimation study [J]. *Acta Daqing Petroleum Institute*, 1998, 22: 89-102.
- [10] 吕延防,马福建. 断层封闭性影响因素及类型划分[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2003,33:163-166.
LÜ Yan-fang, MA Fu-jian. Fault sealing influential factors and style branch [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2003, 33: 163-166.

- [11] Weber K J, Mandl G, Lehner W F, *et al.* The role of faults in hydrocarbon migration and trapping in Nigerian growth fault structures [C]// Offshore Technology Conference Proceedings of 10th Annual Society of Petroleum Engineers of American Institute of Mechanical Engineers, 1978, 4: 2643-2653.
- [12] Yielding G, Freeman B, Needham D T. Quantitative fault seal prediction [J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81: 897-917.
- [13] 鲁兵, 陈章明, 关德范. 断面活动特征及其对油气的封闭作用 [J]. 石油学报, 1996, 17 (3): 33-37.
LU Bing, CHEN Zhang-ming, GUAN De-fan. Fractured surface movement characteristics and its sealing to petroleum [J]. *Acta Petroli Sinica*, 1996, 17 (3): 33-37.
- [14] 王志欣, 信荃麟. 关于地下断层封闭性的讨论—以东营凹陷为例 [J]. 高校地质学报, 1997, 3: 293-300.
WANG Zhi-xin, XIN Quan-lin. Discussion on fault sealing—an example from Dongying depression in Bohai Gulf Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 1997, 3: 293-300.
- [15] 吕延防, 张发强, 吴春霞, 等. 断层涂抹层分布规律的物理模拟实验研究 [J]. 石油勘探与开发, 2001, 28: 30-34.
LÜ Yan-fang, ZHANG Fa-qiang, WU Chun-xia, *et al.* Physical modeling study on distribution rule of fault smearing layers [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28: 30-34.
- [16] 童亨茂. 断层开启与封闭的定量分析 [J]. 石油与天然气地质, 1998, 19: 215-220.
TONG Heng-mao. Quantitative analysis in fault open or seal [J]. *Oil and Gas Geology*, 1998, 19: 215-220.
- [17] 陈永娟, 周新桂, 于兴河, 等. 断层封闭性要素与封闭效应 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30: 38-40.
CHEN Yong-jiao, ZHOU Xin-gui, YU Xin-he, *et al.* Fault sealing factors and effect [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30: 38-40.
- [18] 周新桂. 利用排驱压力研究断裂封闭性及其在塔里木盆地北部地区的应用 [J]. 地质力学学报, 1997, 3: 47-53.
ZHOU Xin-gui. Fault sealing study using capillary displacement pressure and its application in the northern Tarim Basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 1997, 3: 47-53.
- [19] 周新桂. 笔架岭油田断层封闭性定量研究 [J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25: 32-34.
ZHOU Xin-gui. Fault sealing quantitative study in Bijialing Oilfield in Liaohe depression [J]. *Acta Jianghan Petroleum Institute*, 2003, 25: 32-34.
- [20] Bouvier J D, Kaars-Sijpesteijn C H, Kluesner D F, *et al.* Three-dimensional seismic interpretation and fault sealing investigations, Nun river field, Nigeria [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73 (11): 1397-1414.
- [21] Harding T P, Tuminas A C. Interpretation of footwall fault traps sealed by reverse faulted and convergent wrench faults [J]. *AAPG Bulletin*, 1988, 72: 738-757.
- [22] 王平, 李纪辅, 李幼琼. 复杂断块油田详探与开发 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 24-26.
WANG Ping, LI Ji-fu, LI You-qiong. Detailed prospecting and development in complex faulted block oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 24-26.
- [23] 陈碧珏. 油矿地质学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1987: 1-103.
CHEN Bi-jue. Petroleum ore geoscience [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987: 1-103.
- [24] Lindsay N G, Murphy F C, Walsh J J, *et al.* Outcrop studies of shale smears on fault surfaces [C]// Flint S S, Bryant I D. The geological modeling of hydrocarbon reservoir and outcrop analogues. International Association of Sedimentologists, 1993, 15: 113-123.
- [25] 付广, 曹成润, 陈章明. 泥岩涂抹系数及其在断层封闭性研究中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 1996, 23: 38-41.
FU Guang, CAO Cheng-run, CHEN Zhang-ming. Clay smear factor and its application in fault sealing study [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1996, 23: 38-41.
- [26] Allan U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73: 803-811.
- [27] 付广, 薛永超, 杨勉. 利用断裂填充物中泥质含量研究断层封闭性的方法 [J]. 断块油气田, 1999, 6: 9-12.
FU Guang, XUE Yong-chao, YANG Mian. A method on fault sealing study using shale content of filling material in the fault zone [J]. *Journal of Faulted Block Petroleum Field*, 1999, 6: 9-12.
- [28] 付广, 杨勉. 利用断裂填充物中泥质含量研究断层封闭性的改进方法 [J]. 江汉石油学院学报, 2002, 24 (1): 1-4.
FU Guang, YANG Mian. A modified method on fault sealing study using shale content of filling material in the fault zone [J]. *Acta Jianghan Petroleum Institute*, 2002, 24 (1): 1-4.
- [29] Bretan P, Yielding G, Jones H. Using calibrated shale gouge ratio to estimate hydrocarbon column heights [J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87 (3): 383-397.
- [30] Gibson R G, Bentham P A. Use of fault-seal analysis in understanding petroleum migration in a complexly faulted anticlinal trap, Columbus Basin, Offshore Trinidad [J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87 (3): 446-465.
- [31] Davies R K, AN Lin-ji, Jones P, *et al.* Fault-seal analysis South Marsh Island 36 field, Gulf of Mexico [J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87 (3): 466-479.
- [32] Jev B I, Kaars-Sijpesteijn C H, Peters M P, *et al.* Akaso field, Nigeria: use of integrated 3-D seismic, fault-slicing, clay smearing and RFT pressure data on fault trapping and dynamic leakage [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77: 1389-1404.