

断层封闭性定量评价

——以安哥拉Sangos油田为例

张文彪, 陈志海, 许华明, 刘志强, 王静伟, 李洁梅

(中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 针对深水油田复杂断块油藏开发方案实施风险较大的特点, 以安哥拉Sangos油田为例, 综合测井、地震以及动态资料, 利用油藏地质建模方法对断层封闭性的主控因素进行定量评价。首先明确研究区的断层发育模式为盐底辟和盐刺穿的盐相关构造; 其次根据构造和沉积特征, 认为泥岩涂抹为研究区断层封闭性的主控因素, 并对泥岩涂抹的3个计算参数(泥岩涂抹势、泥岩涂抹因子和断层泥比率)进行对比、分析及组合应用, 选用泥岩涂抹势和断层泥比率, 采用逐步判别思路, 以网格为计算单元得到断层传导因子; 最后提出断层连通度的概念, 并对研究区的断层连通度进行计算和分析, 以量化指标合理表征断层传导能力。研究结果表明, 安哥拉Sangos油田5条断层的传导能力由强到弱依次为F5、F4、F3、F2和F1, 其中F1完全封闭, 并已得到后续开发井实际动态数据的验证。

关键词: 断层封闭性 定量评价 断层传导因子 断层连通度 泥岩涂抹

中图分类号: TE111.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2015)06-0021-06

Quantitative evaluation of fault seal: A case study of Sangos oilfield in Angola

Zhang Wenbiao, Chen Zhihai, Xu Huaming, Liu Zhiqiang, Wang Jingwei, Li Jiemei

(Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing City, 100083, China)

Abstract: Since it is risk to implement scheme of deep water fault block reservoir development, Sangos oilfield of west Africa is taken as an example. Based on the reservoir geological modeling process, well logging, seismic and dynamic data were used comprehensively for the quantitative evaluation of fault seal. Firstly, salt diapir and salt piercing were identified here as two main fault modes which are salt related structure. Secondly, according to the characteristics of tectonic and sedimentary, shale smear was thought to be the main control factors of fault sealing and its three parameters (*SSF*, *CSP*, *SGR*) were analyzed and compared, and *CSP* and *SGR* were finally used step-by-step to calculate the transmission multiplier for each fault based on grid model. Finally, the concept of fault connectivity was defined as a quantitative and reasonable parameter of fault evaluation, and it was used to characterize the transmission capacity of each fault. The research shows that: the connectivity of five faults can be ordered as $F5 > F4 > F3 > F2 > F1$, and $F1$ is sealing completely. The research result is validated by the actual dynamic data of subsequent development wells.

Key words: fault seal; quantitative evaluation; fault transmission factor; fault connectivity; shale smear

关于断层封闭性的研究, 目前中外学者主要侧重于勘探阶段, 研究对象主要为较大规模的断层, 而对于油田开发阶段封闭性的小规模断层, 还未引起重视。针对断层封闭性的研究方法经历了从最初的定性、半定量到现在的定量化研究, 对其影响

因素的分析随着研究的深入也越来越完善^[1-3]。断层在地质历史时期处于一种动态的过程, 对油气藏的作用具有双重性^[4]。成藏期断层开启可以作为油气运移通道, 在油田开发阶段, 断层封闭与否决定着流体的连通状态, 直接影响开发方案的实施, 尤

收稿日期: 2015-09-10。

作者简介: 张文彪(1984—), 男, 河北廊坊人, 工程师, 硕士, 从事开发地质和三维地质建模研究。联系电话: 13466750669, E-mail: zwb.syky@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“安哥拉深水油田浊积岩油藏开发技术政策界限研究”(P12100)。

其在深海油田钻井成本很高的形势下,更需要提高对油藏的认识,以便于评价开发的经济性。

西非安哥拉海上油气藏受盐岩滑脱运动影响导致断层极其发育,尤其在盐底辟顶部以及盐刺穿周边,经常呈现出类似“开花馒头”的断裂构造,形成复杂断块,而这些位置恰是油气聚集成藏的有利部位;从目前统计的已开发油田来看,至少有65%的油气藏分布于该类构造。与陆上油田相比,海上油田的钻井成本高,开发方案一旦实施,后续调整的空间很小,难以获得足够的动态数据支撑断层封闭性的研究。因此,针对这种深水复杂断块油藏,须在开发方案设计初期充分利用动、静态资料明确断层封闭能力,指导开发方案优化。断层封闭性研究一直是安哥拉Sangos油田的薄弱环节,前人提出的定性和定量计算方法较多,定量方法目前还是以泥岩涂抹参数(泥岩涂抹势、泥岩涂抹因子和断层泥比率)最为常用^[5-11],但最终都是通过单一参数进行判别,未考虑将参数进行组合形成合理有效的综合指标来定量评价整个断面的传导能力。为此,笔者综合3种泥岩涂抹参数的优缺点,优选出主要参数,采用逐步判别的方式对断层封闭能力进行分析并归类,并提出断层连通度的概念,对单条断层的启闭能力进行合理表征,以期对研究区下步的油气勘探开发提供参考。

1 地质概况

安哥拉Sangos油田位于西非安哥拉海上,大西洋东海岸下刚果盆地,水深为1 300~1 800 m(图1),主要目的层为中新统和渐新统。以发育强烈的

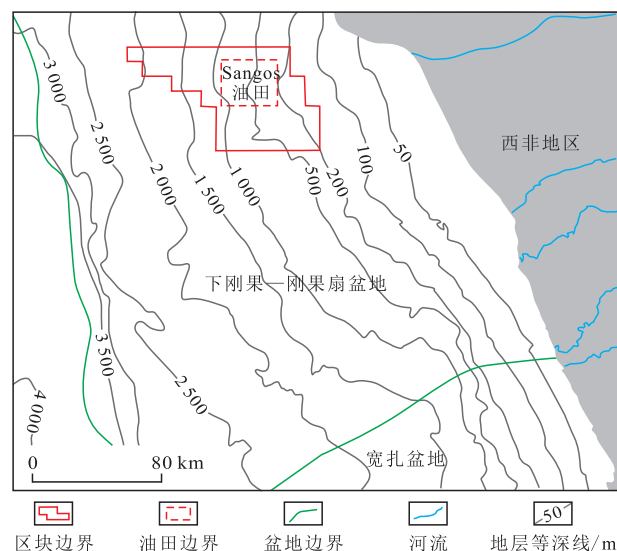


图1 安哥拉Sangos油田区域构造位置
Fig.1 Location of Sangos oilfield in Angola

盐运动形成的盐相关构造为主,沉积类型为整体海退环境下形成的浊积水道深水沉积,属于典型的深水水区。安哥拉已发现多个油田,均为盐相关构造-岩性油藏,具有可观的石油及天然气储量,目前处于开发方案的实施阶段。

2 断层发育模式

安哥拉Sangos油田以区域上广泛分布的厚-巨厚层盐岩作为构造滑脱层,其构造变形具有明显的垂向分层特征,可划分为前裂谷阶段(晚古生代—早中生代)、裂谷阶段(中—晚中生代)、过渡阶段(盐岩形成期)和被动陆缘阶段(中生代末期—古近纪)共4个演化阶段。其盐下裂谷构造变形层属于陆内构造变形,以地堑和地垒构造发育为主要特征,表现为典型的基底卷入型构造;盐上古近系重力滑动构造变形层形成于大陆破裂、海底扩张和被动大陆边缘沉降背景,其典型构造样式为盐相关构造,包括盐筏、龟背斜、盐丘、盐刺穿和盐株等,属于盖层滑脱型构造。

研究区发育典型的盐丘和盐刺穿构造,正常沉积的古近系受后期盐岩的塑性凸起作用,在张应力作用下形成围绕盐岩分布的一系列正断层,形状类似“开花馒头”,构成研究区主要的断层发育模式(图2)。与传统受地层构造应力形成的断层不同,

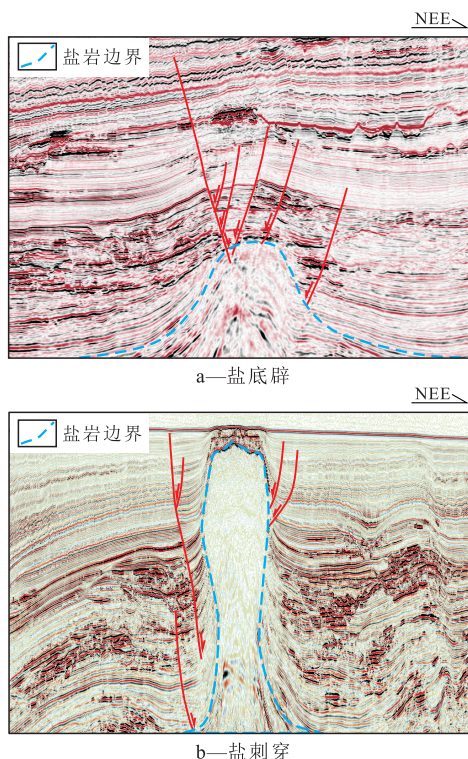


图2 安哥拉Sangos油田断层发育模式
Fig.2 Typical fault modes of Sangos oilfield in Angola

该类断层一般断距较小,平均为5~8 m,难以断穿盐岩层成为油源通道,因此主要对油藏开发阶段产生影响。

3 断层封闭性评价

目前断层封闭性的研究方法主要分为4类^[12],分别为断层岩封闭法、断层两侧流体相关参数对比法、岩性对接封闭法以及综合法;且每种研究方法都是基于特定地质环境提出的,须针对研究区的特点进行优选。对于勘探开发的不同阶段,其断层封闭性研究存在差异,针对开发阶段的小规模断层,应主要考虑断层两盘岩性的配置关系、泥岩涂抹以及断面正应力与孔隙压力的关系等影响因素^[13-15]。安哥拉Sangos油田的构造发育受盐岩活动影响,处于滑脱运动下的张应力环境,其沉积类型为深海泥岩背景下的浊积水道沉积,具有泥包砂的特征,且固结程度较弱导致泥岩的塑性较强;影响其断层封闭性的最直接因素为泥岩涂抹,因此将泥岩涂抹作为主控因素,而应力特征等次要因素则未参与研究区断层封闭性的定量评价。

3.1 泥岩涂抹参数评价

3.1.1 泥岩涂抹参数分析

目前主要将泥岩涂抹分为剪切、研磨和注入3种涂抹类型^[16-21],针对这3种类型分别提出相应的计算参数,即泥岩涂抹势(CSP)、泥岩涂抹因子(SSF)和断层泥比率(SGR)。这3种泥岩涂抹参数是目前较常用的断层封闭性计算方法,在实际应用中都存在一定的适用条件^[22-24]。其中,CSP为泥岩层厚度的平方与泥岩涂抹距离的比值,是针对成岩研磨型泥岩涂抹,主要考虑断层活动导致的岩石破碎,一些粗的碎屑变成较细碎屑对油气封堵起到一定作用,但对其定量表征的难度比较大,而且在遇到复合涂抹(多层泥岩)的情况下,泥岩厚度不相加,仅考虑断层某一点处最厚泥岩单层的计算结果。SSF为断距与泥岩层厚度的比值,为某处泥岩层沿断面发生涂抹的粘土相对含量,常用于计算未成岩塑性剪切型泥岩涂抹;其涂抹层的厚度主要取决于砂岩与泥岩厚度比以及单层泥岩厚度和断距,一般情况下,离粘土泥质层越远,粘土涂抹厚度越薄;该参数考虑了泥岩涂抹层厚度随断距的变化,而且可以计算多层泥岩涂抹的情况。SGR为泥岩层厚度与垂直断距的比值,是目前较常用的断层侧向封闭性定量评价参数,对于成岩研磨型和塑性剪切型均适用;由于断层岩是由泥岩碎屑和不同泥质含

量的砂岩碎屑混杂堆积而成,其侧向封闭能力主要取决于断层岩的泥质含量,该参数考虑了地层的非均质性,计算方法相对更科学。

3.1.2 泥岩涂抹参数优选

岩石的流变性是泥岩涂抹研究中比较重要却容易被忽略的问题。在成岩早期阶段,泥岩易于塑性流动,断层活动时必然会造成泥岩沿断面的大量拖曳现象^[16],导致泥岩更大范围地涂抹在断面上,即剪切涂抹更可能发生在泥岩欠压实的浅层地层^[25]。针对研究区地层固结弱和塑性强的特点,选择泥岩涂抹势和断层泥比率作为断层封闭性的计算参数,采用逐步判别的思路对断层封闭性进行分析,具体操作步骤为:①通过已有的断层封闭性研究结果对泥岩涂抹势进行标定,确定断层封闭临界值;②通过该临界值对各断层计算的泥岩涂抹势进行判断并归类,若泥岩涂抹势大于断层封闭临界值,则定义该断层为封闭,否则为开启或部分开启;③对于确定为封闭的断层认为其不存在传导能力,而对于开启性断层若要确定其开启程度,则须进一步通过断层泥比率来分析;断层泥比率可以定量表征断层在三维空间的封闭强度,同时还可以借助已有的经验公式^[16]计算得到断裂带渗透率及断层传导因子,为快速有效地实现油藏历史拟合提供地质基础。

3.1.3 泥岩涂抹参数计算

利用油藏地质建模软件RMS分析安哥拉Sangos油田的断层封闭性。准确的构造模型和泥质含量模型是断层封闭性定量评价的基础,由于海上的油气井较少,因此地震资料成为研究的核心。研究区目的层的地震资料为高密度采集,面元为6.25 m×6.25 m,主频为40 Hz,成像效果较好,多属性自然伽马反演预测的泥质含量与测井曲线的相关性达89%,保证了油藏模拟过程中断层的准确落实以及网格属性的精度。

由于断层封闭性分析过程中都是以网格作为基本单元,因此可以精细表征沿断面三维空间的泥岩涂抹参数分布。计算泥岩涂抹势需要得到每层泥岩的厚度,通过泥质含量模型用cutoff值截断得到三维砂泥岩网格模型,利用泥岩涂抹参数计算公式^[16]对研究区发育的F1,F2,F3,F4和F5共5条断层的泥岩涂抹势进行计算。由于断面两侧存在岩相以及断距的变化,导致不同部位的泥岩涂抹程度存在差异;泥岩涂抹势越低表示粘土涂抹能力越弱,封堵油气的概率越小,所以必然存在表征断层封闭与否的泥岩涂抹势下限值。由于尼日尔三角

洲盆地 Akaso 油田与安哥拉 Sangos 油田的区域位置、构造特征以及沉积类型等均很相似,具有较强的类比性;因此借鉴 Akaso 油田的标定结果^[26-27],根据研究区油藏模拟结果确定泥岩涂抹势为 10 作为断层封闭临界值。当泥岩涂抹势小于等于 10 时,断层为非封闭;当泥岩涂抹势大于 10 时,则断层为封闭。据此对研究区的 5 条断层进行封闭性判断,结果表明,F1 的泥岩涂抹势为 11~46,平均值为 16,断层为完全封闭;F2 和 F3 的泥岩涂抹势分别为 1~12 和 1~11,平均值分别为 8 和 6,断层为部分开启;F4 和 F5 的泥岩涂抹势分别为 1~8 和 1~7,平均值分别为 4 和 2,断层为完全开启。

根据泥岩涂抹势判别结果,将研究区 5 条断层分为完全封闭、部分开启和完全开启 3 类。对于完全封闭的 F1,认为其不具有断层传导能力,因此对其断层传导因子赋值为 0;对于部分开启或完全开启的断层,则根据已有的泥质含量网格模型计算断层泥比率,断层泥比率越高反映泥岩涂抹能力越强,断层传导能力越弱。

利用与断层泥比率相关的应用较成熟的经验公式^[28]可进一步计算得出各条断层的断裂带渗透率和断层传导因子(图 3)。断裂带渗透率是反映断裂带内部地层渗流能力的重要参数,由于受到构造

挤压和破碎作用,断裂带内部地层的岩石空间体积发生变化,并导致其渗透率发生变化。断层传导因子是反映断层启闭程度的重要参数,与断面每个网格的渗透率和面积相关;如果断层传导因子为 0,表明断层封闭,流体不能通过,否则表明断层开启;断层传导因子越大,表明断层传导能力越强。

3.2 断层连通度分析

断层连通度为断面上针对所有网格的断层传导因子与相应网格面积的加权平均值,其表达式为

$$T = \frac{\sum T_{ij} A_{ij}}{\sum A_{ij}} \quad (1)$$

式中: T 为断层连通度; T_{ij} 为断面某网格的断层传导因子; A_{ij} 为断面某网格的面积, m^2 ; i 为网格相对位置的横坐标; j 为网格相对位置的纵坐标。

断层连通度的提出是基于对地质评价参数的认识和延伸,主要用于定量评价某条断层的整体传导能力。其含义包括断面上每个网格的信息,是定量描述断层启闭特征的无量纲参数,取值范围为 0~1。断层连通度越大,表明断层传导能力越强。

通过对安哥拉 Sangos 油田断层传导因子以网格为单元进行统计,分别求取其平均值;同时依据断层连通度的概念,对断面网格的断层传导因子进行面积加权平均,得到研究区的断层连通度,并根据其计算结果对研究区的 5 条断层进行分析。结果(表 1)表明,F1, F2, F3, F4 和 F5 的断层传导因子平均值分别为 0, 0.032, 0.053, 0.147 和 0.413;断层连通度分别为 0, 0.031, 0.053, 0.147 和 0.403。其中, F1 不具有传导能力;其他 4 条断层连通度由大到小依次为 F5, F4, F3 和 F2, 反映其断层传导能力由强到弱。由于针对研究区设计的断层网格为均匀网格,所以断层连通度的计算结果与断层传导因子的平均结果一致;但在断面为非均匀网格的情况下,二者的计算结果是不一致的,因此用断层连通度表征断层的封闭能力更为科学、合理。

3.3 评价结果验证

研究区断层封闭性评价结果得到了实际钻探数据的验证。Sangos101 井为已完钻开发井,穿过 F4 和 F5 共 2 条断层;MDT 地层测试结果表明,断层两侧同一埋深的地层压力没有明显变化,均约为 33 MPa,据此认为 F4 和 F5 为连通断层(图 4)。Sangos104 井为穿过 F1 的开发井,MDT 地层测试结果显示 F1 两侧的地层压力相差近 0.69 MPa,表明其为不同的压力系统,地震烃类检测也显示 F1 两侧具有不同的油水界面,表明 F1 为封闭断层。安哥拉 Sangos

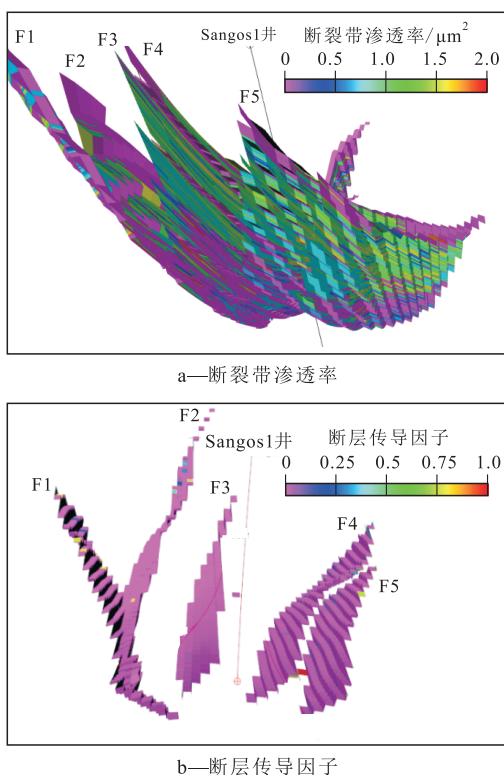


图 3 安哥拉 Sangos 油田断裂带渗透率以及断层传导因子计算结果

Fig.3 Fault zone permeability and fault transmission factor results calculated in Sangos oilfield, Angola

表1 安哥拉 Sangos 油田断层传导因子及断层连通度统计结果
Table1 Statistical results of fault transmission factor and fault connectivity in Sangos oilfield, Angola

断层	断 层 传 导 因 子											断层 连通度
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	
F1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
F2	0.032	0.023	0.034	0.027	0.036	0.025	0.032	0.041	0.02	0.031	...	0.031
F3	0.046	0.05	0.032	0.055	0.057	0.056	0.051	0.048	0.077	0.061	...	0.053
F4	0.051	0.087	0.104	0.153	0.114	0.151	0.187	0.174	0.193	0.264	...	0.147
F5	0.134	0.203	0.32	0.268	0.234	0.303	0.432	0.668	0.587	0.876	...	0.403

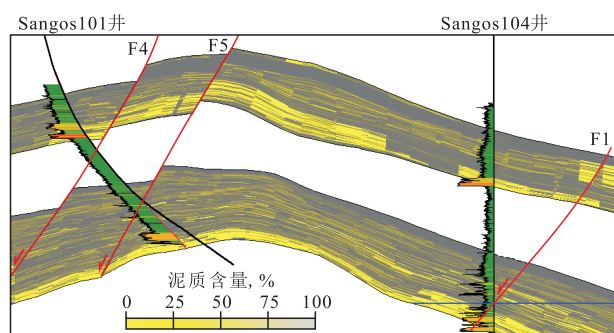


图4 安哥拉 Sangos 油田断层封闭性评价验证

Fig.4 Verification of fault sealing evaluation results in Sangos oilfield, Angola

油田实际钻探结果与断层封闭性评价结果一致,证实了该断层封闭性定量评价方法的有效性;通过这种参数组合的方法可以在油藏地质建模过程中快速实现断层封闭性评价,得到断裂带渗透率以及断层传导因子并应用于实际的油藏模拟过程中,提高了产能预测的精度。此外,断层连通度可以作为断层封闭性评价的重要参数,以丰富对断层特征的认识。

4 结论

安哥拉 Sangos 油田的断层形成均与盐活动相关,在张应力环境下断层主要以盐底辟和盐刺穿2种模式存在。泥岩涂抹是研究区断层封闭性的主控因素,经过对比分析认为3种泥岩涂抹参数(泥岩涂抹势、泥岩涂抹因子和断层泥比率)中泥岩涂抹势和断层泥比率更适用于研究区。利用油藏地质建模软件RMS,通过地质网格模型对泥岩涂抹势和断层泥比率2个参数进行组合使用,得到网格级别的断层传导因子,可用于油藏数值模拟。提出断层连通度的概念,以丰富断层的表征参数。研究表明,研究区5条断层的传导能力由强至弱分别为F5、F4、F3、F2和F1,其中F1完全封闭。安哥拉 Sangos 油田断层封闭性定量评价结果已得到钻井及动

态数据的验证,并可以有效降低复杂断块油田的开发风险,具有理论和实践意义。

参考文献:

- [1] 王学军,苏惠,曾溅辉,等.东濮凹陷西部斜坡带长垣断层封闭性及其输导模式[J].油气地质与采收率,2012,19(4):5-9.
Wang Xuejun, Su Hui, Zeng Jianhui, et al. Fault sealing and oil-gas migration patterns of Changyuan on western slope, Dongpu depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(4):5-9.
- [2] 孙波,张善文,王永诗.断层输导能力定量评价及其在油气勘探中的应用——以济阳拗陷西地区为例[J].油气地质与采收率,2013,20(6):10-14.
Sun Bo, Zhang Shanwen, Wang Yongshi. Quantitative evaluation of fault transporting capacity and its application in hydrocarbon exploration—case study of west Qingtuozui uplift of Jiyang depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(6):10-14.
- [3] 张娟.西湖凹陷平湖油气田断层封闭性评价[J].油气地质与采收率,2012,19(4):18-20.
Zhang Juan. Study on fault-sealing in Pinghu oil and gas field, Xihu depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(4):18-20.
- [4] Bretan P, Yielding G, Jones H. Using calibrate shale gorge ratio to estimate hydrocarbon column heights[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(3):397-413.
- [5] 薛雁,吴智平,李伟,等.永安镇地区断层特征及其与油气成藏的关系[J].油气地质与采收率,2013,20(3):10-13.
Xue Yan, Wu Zhiping, Li Wei, et al. Relationship between fault characteristics and their relation with hydrocarbon accumulation in Yongan area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(3):10-13.
- [6] 李继岩,宋国奇,赵仲祥,等.惠民凹陷南部地区断层输导与封闭性能研究[J].油气地质与采收率,2011,18(4):17-20.
Li Jiyan, Song Guoqi, Zhao Zhongxiang, et al. Main controlling factors analysis and evaluation on transporting and sealing performance of fault, south region of Huimin depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(4):17-20.
- [7] 张琴,唐颖,张建丽,等.永安地区断层封堵性研究[J].断块油气田,2010,17(4):402-404.

- Zhang Qin, Tang Ying, Zhang Jianli, et al. Study on fault sealing in Yongan Area [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2010, 17(4): 402-404.
- [8] 刘显太, 李军, 王军, 等. 低序级断层识别与精细描述技术研究 [J]. *特种油气藏*, 2013, 20(1): 44-47.
- Liu Xiantai, Li Jun, Wang Jun, et al. Study on the technologies of identification and delicate description of low level faults [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2013, 20(1): 44-47.
- [9] 吴琼. 新立油田断层附近高效调整井部署方式研究 [J]. *特种油气藏*, 2012, 19(4): 73-76.
- Wu Qiong. Research on placement of efficient adjustment wells near faults in Xinli oilfield [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2012, 19(4): 73-76.
- [10] 高岗, 柳广弟, 黄志龙. 断层对油气的相对封闭性和绝对开启性分析——以准噶尔盆地西北缘八区—百口泉区二叠系油气特征为例 [J]. *石油实验地质*, 2010, 32(3): 218-222.
- Gao Gang, Liu Guangdi, Huang Zhilong. Analysis of relative sealing and absolute permeability of fault-taking Permian hydrocarbon characteristics of the region 8 and the Baikouquan area, northwest margin, the Junggar basin for example [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(3): 218-222.
- [11] 李宏义, 姜振学, 董月霞, 等. 断层封闭能力的有限性研究及模拟实验 [J]. *石油实验地质*, 2010, 32(6): 583-587.
- Li Hongyi, Jiang Zhenxue, Dong Yuexia, et al. Geological study and physical simulation experiment on the limitation of fault-sealing [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(6): 583-587.
- [12] 金崇泰, 付晓飞, 柳少波. 断层侧向封堵性评价方法综述 [J]. *断块油气田*, 2012, 19(3): 297-301.
- Jin Chongtai, Fu Xiaofei, Liu Shaobo. Review on evaluation methods of lateral sealing of fault [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2012, 19(3): 297-301.
- [13] 刘玉瑞. 苏北盆地断层封堵类型及定量评价 [J]. *石油实验地质*, 2009, 31(5): 531-536.
- Liu Yurui. Quantitative evaluation of fault sealing mode and capacity in the Subei basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(5): 531-536.
- [14] 吕延防, 王帅. 断层封闭性定量评价 [J]. *大庆石油学院学报*, 2010, 34(5): 35-41, 166.
- Lü Yanfang, Wang Shuai. Quantitative evaluation of fault seal [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2010, 34(5): 35-41, 166.
- [15] 付广, 史集建, 吕延防. 断层侧向封闭性定量研究方法的改进 [J]. *石油学报*, 2012, 33(3): 414-418.
- Fu Guang, Shi Jijian, Lü Yanfang. An improvement in quantitatively studying lateral seal of faults [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 414-418.
- [16] Lindsay N G, Murphy F C, Walsh J J, et al. Outcrop studies of shale smear on fault surface [J]. *International Association of Sedimentologists Special Publication*, 1993, 15(1): 113-123.
- [17] Yielding G, Freeman B, Needham D T. Quantitative fault seal prediction [J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(6): 897-917.
- [18] Smith D A. Theoretical consideration of sealing and nonsealing faults [J]. *AAPG Bulletin*, 1966, 50(2): 363-374.
- [19] Allan U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(7): 803-812.
- [20] Bouvier J D. Three-dimensional seismic interpretation and fault sealing investigations, Nun River Field, Nigeria [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(11): 1397-1414.
- [21] Jullian A T, Anthony B W. Quantitative analysis of North Sea subsidence [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(1): 88-116.
- [22] Weber K J, Mandl G, Pilaar W F, et al. The role of faults in hydrocarbon migration and trapping in Nigerian growth fault structures [C]. *Houston: Society of Petroleum Engineers*, 1978: 2643-2653.
- [23] 吕延防, 付广, 张云峰. 断层封闭性研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- Lü Yanfang, Fu Guang, Zhang Yunfeng. *Fault sealing analysis* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [24] 吕延防, 黄劲松, 付广, 等. 砂泥岩薄互层段中断层封闭性的定量研究 [J]. *石油学报*, 2009, 30(6): 824-829.
- Lü Yanfang, Huang Jinsong, Fu Guang, et al. Quantitative study on fault sealing ability in sandstone and mudstone thin interbed [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(6): 824-829.
- [25] 赵密福. 断层封闭性研究现状 [J]. *新疆石油地质*, 2004, 25(3): 333-336.
- Zhao Mifu. A review on fault seal study [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2004, 25(3): 333-336.
- [26] 李阳. 从断层岩的角度认识泥岩涂抹及其定量表征——以济阳坳陷东辛油田营32断层为例 [J]. *地质学报*, 2009, 83(3): 426-434.
- Li Yang. Shale smearing and its quantitative characterization in the perspective of fault rocks—a case study of the Ying32 fault in the Dongxin Field of Jiyang Depression [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(3): 426-434.
- [27] 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(8): 1389-1404.
- [28] Manzocchi T, Walsh J J, Nell P, et al. Fault transmissibility multipliers for flow simulation models [J]. *Petroleum Geoscience*, 1999, 5(1): 53-63.

编辑 邹澍滢