

杨超群, 雷永昌, 邱欣卫, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷 A 油田断层封堵性综合评价[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(2): 54-61.

珠江口盆地陆丰凹陷 A 油田断层封堵性综合评价

杨超群, 雷永昌, 邱欣卫, 肖张波

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518000)

摘要: 珠江口盆地断圈构造整体勘探的成功率不高, 而断层封堵性的研究对于提高断圈钻探成功率尤为重要。近年来, 进展主要体现在考虑地应力因素、定量评价泥岩涂抹、考虑断面立体形态等方面。以陆丰凹陷 A 油田典型断圈构造为例, 采用上述新的技术手段, 开展了断层封堵性综合评价, 剖析原因认为, 断面应力、断面 SGR 值以及断貌的差异决定了不同断块的成败, 为类似断圈的勘探提供了很好的借鉴思路。

关键词: 断层封堵; 断面应力; SGR; 泥岩涂抹; 断貌

中图分类号: P313; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.005

0 引言

影响断层封堵性的因素非常多而且复杂, 主要包括断层性质、断距、岩性、流体类型以及断层活动史等。断层的封堵性评价包括侧向封闭性评价和垂向封闭性评价。侧向封闭性评价重点关注岩性对接、泥岩涂抹、破裂作用和成岩作用^[1-6]。垂向封闭重点关注控圈断裂对油气的疏导能力的强弱, 主要考虑断裂面的立体形态和断裂面的泥质含量的多少等因素对油气运移能力的影响^[7-11]。断圈能否成藏往往是多个因素综合作用的结果, 单独考虑某个方面有失偏颇。断层封堵性综合评价即针对具体的断圈, 采用相关方法同时考察其侧向和垂向的封闭性对成藏的影响。

目前, 珠江口盆地断圈构造勘探的成功率不高, 断层封堵性的综合研究对于提高断圈钻探成功率尤为重要。前人对珠江口盆地断层封堵的主要规律及主要影响因素作了分析^[12-17], 多是区域上的指导和认识, 少见针对具体断圈开展深入综合的分析, 本文以珠江口盆地陆丰凹陷 A 油田的断圈构造为例, 从断裂的地应力分布特征、断裂的泥岩涂抹情况、断裂的立体形态特征 3 个方面进行了综合评价,

剖析了不同断块之间成败的关键原因。

1 区域地质概况

珠江口盆地位于华南大陆南缘, 处于欧亚、太平洋和印度洋 3 大板块交汇处附近, 是复杂基底上发育起来的被动大陆边缘盆地, 多期构造运动造就了珠江口盆地“三隆两坳”的构造格局, 即北部隆起断阶带、北部坳陷带、中央隆起带、南部坳陷带和南部隆起带, 各个构造单元又可分为若干个凹陷和低隆起。陆丰凹陷属于珠江口盆地珠一坳陷中的一个次级单元, 陆丰凹陷的构造区划及位置见图 1, 研究区位于陆丰 7 洼和陆丰 13 西洼之间的凸起上。

珠江口盆地新生代充填地层从老到新依次为文昌组、恩平组、珠海组、珠江组、韩江组、粤海组和万山组(图 2)。本次分析陆丰凹陷 A 油田油层所在的层系位于珠江组、珠海组和恩平组。

珠江口盆地新生代发育的断层主要为张性、张扭性生长正断层, 在陆丰凹陷呈现 NEE、NWW 和近 EW 3 个走向。考虑断层的形成期次将其分为早期断层、长期活动断层和晚期断层 3 类。其中, 早期断层主要是指古近系断陷期发育而新近系基本不活动的断层, 走向为 NEE 向和近 EW 向; 长期活动断层是指古近系发育且新近系继承发育的断层, 走向为近 EW 和 NWW 向; 晚期断层指中中新世以后形成的断层, 走向为近 EW 向。研究区的断裂走向呈现为近 EW 向。

陆丰凹陷勘探至今共钻探了 60 余个断圈, 其

收稿日期: 2020-01-13

资助项目: 中海油重大生产科研项目“珠江口盆地(东部)浅水区古近系油气成藏条件及勘探突破方向”(CCL2020SZPS0168)

作者简介: 杨超群(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震资料综合解释应用与断裂控藏研究工作。E-mail: yangchq7@cnooc.com.cn

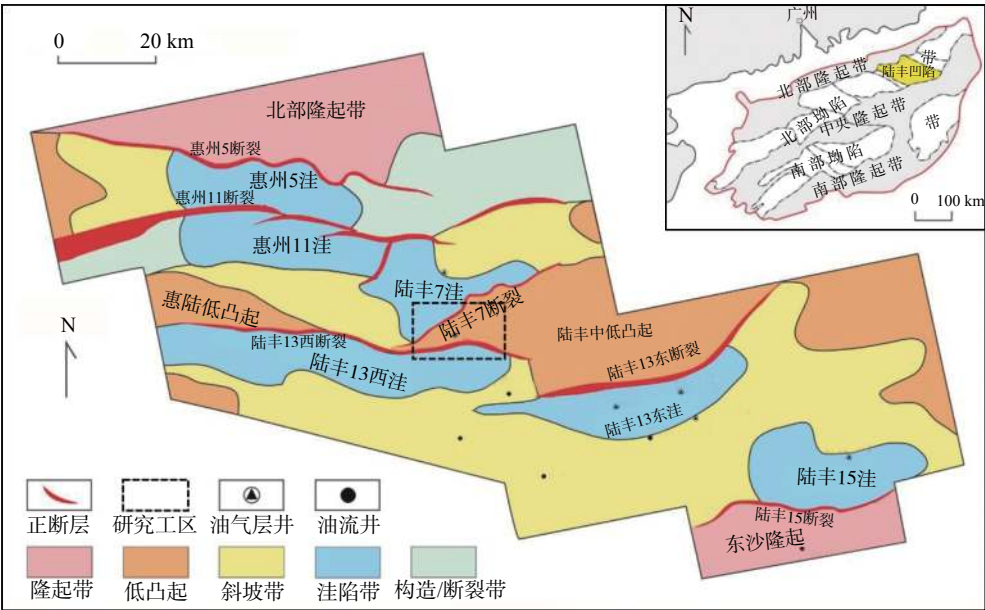


图 1 陆丰凹陷构造区划图

Fig.1 Tectonic division and location map of Lufeng Sag

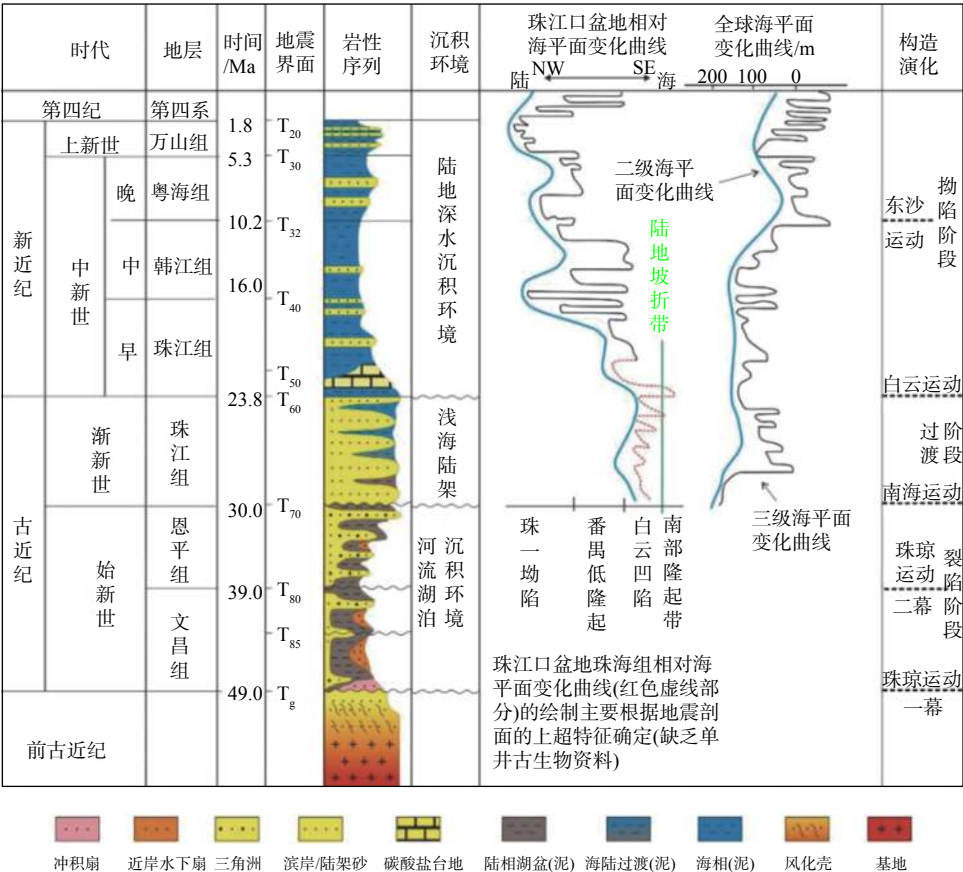


图 2 珠江口盆地新生代地层充填序列

Fig.2 The Cenozoic sedimentary sequence in Pearl River Mouth Basin

中 A 油田为一个典型的断圈构造, 被断层分割为 A1、A2、A3, 分别钻探了 A1 井、A2 井、A3 井, 其中 A1 块、A2 块见油, A3 块未见油, 其珠江组 2370 层的深度构造及过构造的油藏剖面图见图 3。A1 井在珠江组、珠海组和恩平组共钻遇 19 个油层, 累计厚度 100.9 m; A2 井在珠江组 2370 层钻遇 19.3 m 油层; A3 井却为干井, 钻探过程中录井、测井均无任何显示。

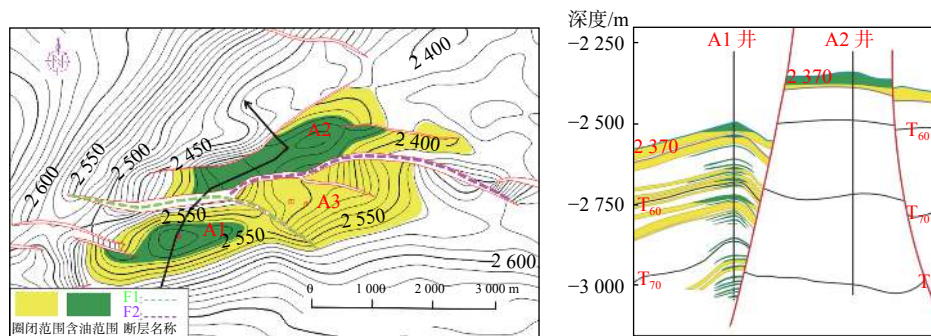


图3 陆丰凹陷A油田珠江组2370层深度构造图及过构造油藏剖面

Fig.3 The depth structural map of Zhujiang Formation 2370 and the reservoir profile in A Oilfield of Lufeng Sag

本次研究以关键的控圈断裂F1、F2为研究对象,采用对比研究的方法,对F1、F2的封堵性开展了综合研究,认为F1、F2断面应力的差异、断面SGR值的差异以及断貌的差异导致了A3井的失利。

2 断面应力分析

断层拥有封堵能力,首先是要分析F1和F2在现今应力状态下是否稳定,如果是稳定的,则断面压力越大,封堵性越好。

断层的滑动趋势分析用于判断断层的稳定性,而这种趋势是由断面上剪应力与正应力的比值决定的。断面上的剪应力 τ 和正应力 σ ,可以通过应力场中主应力和断层方位的关系式确定,公式如下^[18]:

$$\sigma = l^2(\sigma_1 - P_0) + m^2(\sigma_2 - P_0) + n^2(\sigma_3 - P_0) \quad (1)$$

$$\tau = \sqrt{l^2(\sigma_1 - P_0)^2 + m^2(\sigma_2 - P_0)^2 + n^2(\sigma_3 - P_0)^2} - \sigma_2 \quad (2)$$

式中: σ_1 为最大主应力;

σ_2 为中间主应力;

σ_3 为最小主应力;

l 、 m 、 n 分别为断层面法线方向和 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 方向夹角的余弦值;

P_0 为孔隙水压力。

根据库仑定律,断层面的摩擦系数 μ 为剪应力 τ 和正应力 σ 的比值,公式如下:

$$\mu = \tau / \sigma \quad (3)$$

BYERLEE^[19]通过理论研究结合许多岩石摩擦物理实验结果,认为中高正应力的条件下,无论岩石的类型和接触面的粗糙程度如何,地壳岩石的摩擦系数都在0.6到1.0之间。数值越高,断层由剪切破裂产生的滑动的可能性越大,本文研究将实际断层面的摩擦系数和0.6作对比,认为 >0.6 时断

层不稳定, <0.6 时断层是稳定的。

图4为断层稳定性分析结果,图中F1和F2的投点均位于破裂包络线(摩擦系数0.6)以下,表明在现今应力状态下,F1和F2断层是稳定的。

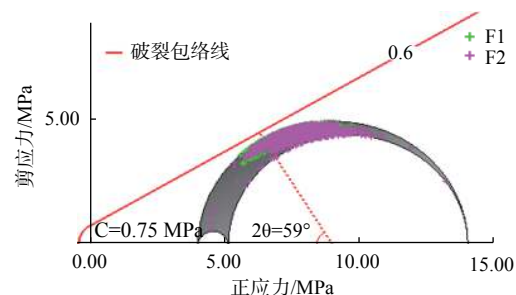


图4 F1、F2断层稳定性分析结果

Fig.4 Stability analysis of fault F1 and F2

判断断层在现今应力状态下是稳定之后,通过断面应力值来判断断层封堵性。F1和F2断面应力值的计算结果见图5,从图中可以看出,A1井圈闭范围内,F1断面应力稳定,A3井圈闭范围内,F2断面应力不稳定,出现低值,封堵性不如F1断面。

如果当分析区没有应力数据输入时,可通过(4)式从断面倾角的角度来考虑断面应力。断面压力主要是上覆地层对断面产生的静岩压力 p_1 和区域构造力对断面产生的压力 p_2 之和,即:

$$p = p_1 + p_2 = Z(\rho - \rho_w)g \cos \alpha \pm \delta_1 \sin \beta \sin \alpha \quad (4)$$

式中: p 为断面所受压力;

Z 为断面埋深;

ρ 为上覆地层的平均密度;

ρ_w 为地层水密度;

g 为重力加速度;

α 为断面倾角;

δ_1 为区域水平应力;

β 为 δ_1 与断层走向所夹角。

公式表明:当断面埋藏越深、断面越缓且 δ_1 与断层走向的交角越小时,断面上所受到的总压力越

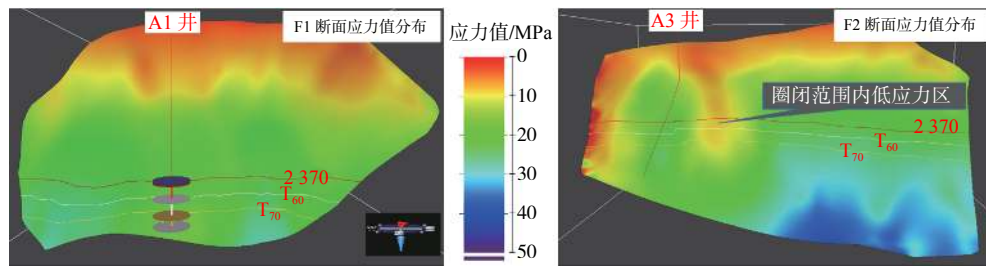


图 5 F1、F2 断面应力值计算结果

Fig.5 The stress analysis result of fault F1 and F2

大, 封堵越好; 反之, 则差。

在张性盆地中, 断面压应力以上覆盖层压力为主, 所以断层的封闭性随断面倾角的减小而增大。陆丰凹陷 A 油田所处环境为典型的张性盆地, 可以

简单地从断面的倾角大小去判断断层的封闭性。F1 和 F2 断面倾角分布见图 6。对比可以看出, 圈闭范围内, 整体上 F1 断面倾角比 F2 偏低, 断层面压力大, 封闭性偏强。

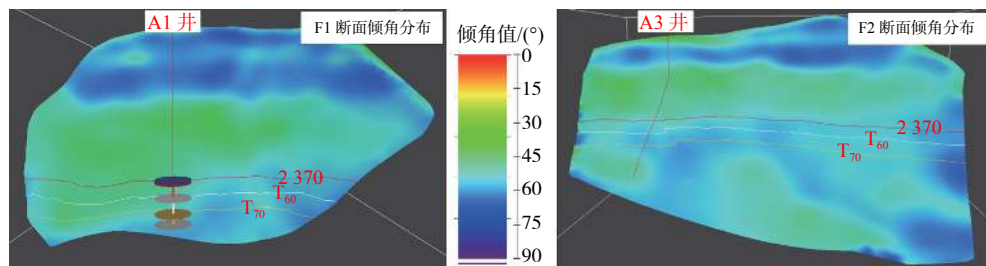


图 6 F1、F2 断面倾角分布图

Fig.6 The dip distribution on section of fault F1 and F2

3 断面侧向封堵分析

断面侧向封堵分析主要是考虑断层两边岩性的对接情况, 砂泥对接, 认为封堵性好, 砂砂对接时, 则需要通过考虑泥岩涂抹来评价其封堵性。泥岩涂抹的定量评价一开始通常采用泥岩涂抹因子 (Shale Smear Factor, 即 SSF) 法和黏土涂抹潜力 (Clay Smear Potential, 即 CSP) 法, 在不断的生产实

践中, 发现泥岩断层泥比 (Shale Gouge Ratio, 即 SGR) 法比 SSF、CSP 能够更好地预测断层封堵性, 3 种方法的计算方法示意图见图 7。SSF 法和 CSP 法都是考虑泥岩的厚度和断距之间的关系, 而 SGR 法则是考虑泥质含量多少与断距之间的关系, SGR 法把砂岩所含的泥质含量也进行了考虑, 更加全面合理, 而且通过野外观测得到的断裂带泥质含量与实验室计算得到的 SGR 具有很好的相关性^[20-21]。

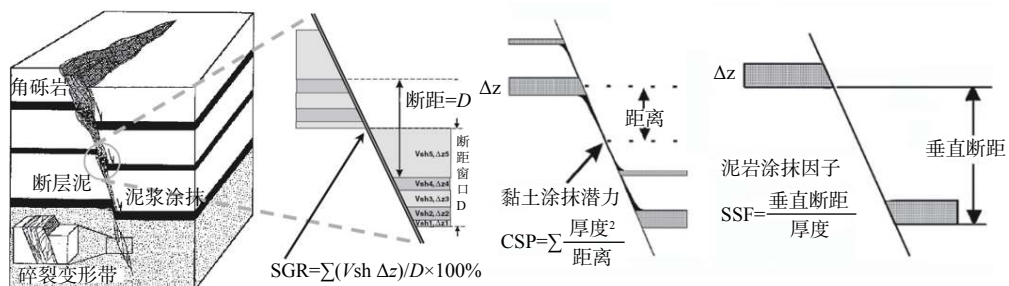


图 7 SGR、CSP、SSF 计算方法示意图

Fig.7 The calculation method of SGR、CSP、SSF

断层封堵的 SGR 临界值没有固定的标准, 需要根据地区已钻断圈进行标定, 不同地区不同层系, SGR 临界值都可能不一样。一般是将断层遮挡油

层对应的断层面上最小的 SGR 值作为断层侧向封闭的临界值。另外, 学界关于 SGR 值的分布代表的地质意义有如下认知: 当 $SGR < 15\% \sim 20\%$ 时,

对应典型的碎裂岩或岩石崩解带,而当 $SGR > 50\%$ 时为泥岩涂抹,中间的成分指泥岩骨架断层泥或层状硅酸盐骨架断层泥。

F1 和 F2 断面的 SGR 值计算结果见图 8。A1 井位于 F1 的下降盘,珠江组和珠海组的油层面积

为自圈,未受 F1 封堵控制。恩平组的油层受 F1 封堵控制,圈闭位置处 T70 以下 SGR 值为 70% 左右,形成好的封堵。A3 井位于 F2 的下降盘, F2 断面圈闭位置处 T70 以下 SGR 值大部分在 40% 左右,封堵性明显不如 F1 断面。

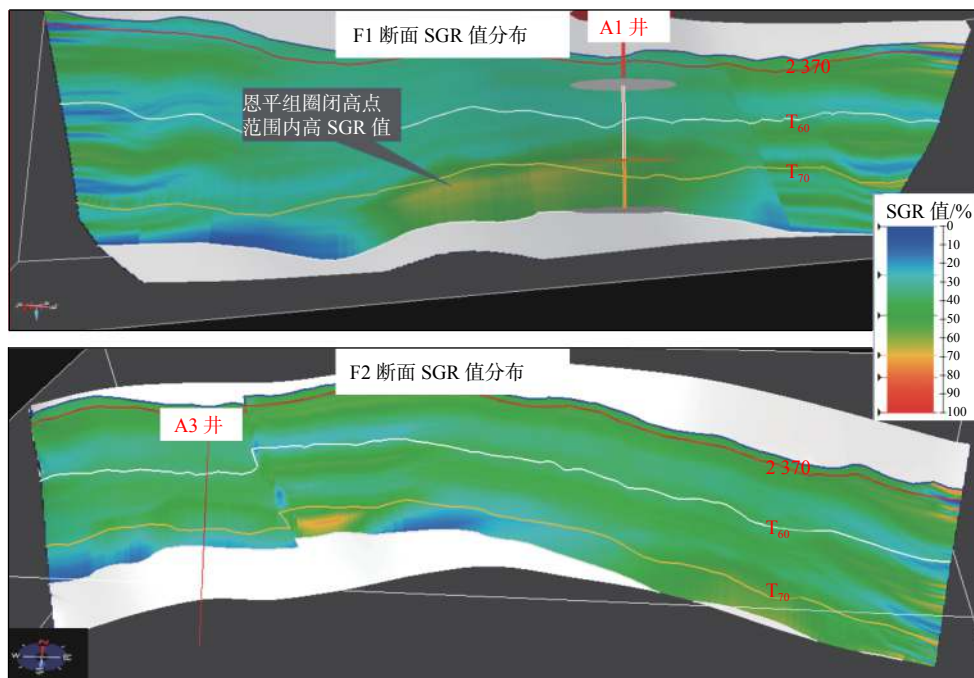


图 8 F1、F2 断面 SGR 值计算结果

Fig.8 The SGR on section of fault F1 and F2

4 断貌分析

有研究表明,断层面貌上,油气倾向于向突

起位置迁移^[7,9], A1 井和 A3 井所处的控注断裂断面图见图 9, A1 井位于断层的凸面位置, A3 井位于断层的凹面位置,油气更倾向于向 A1 井运

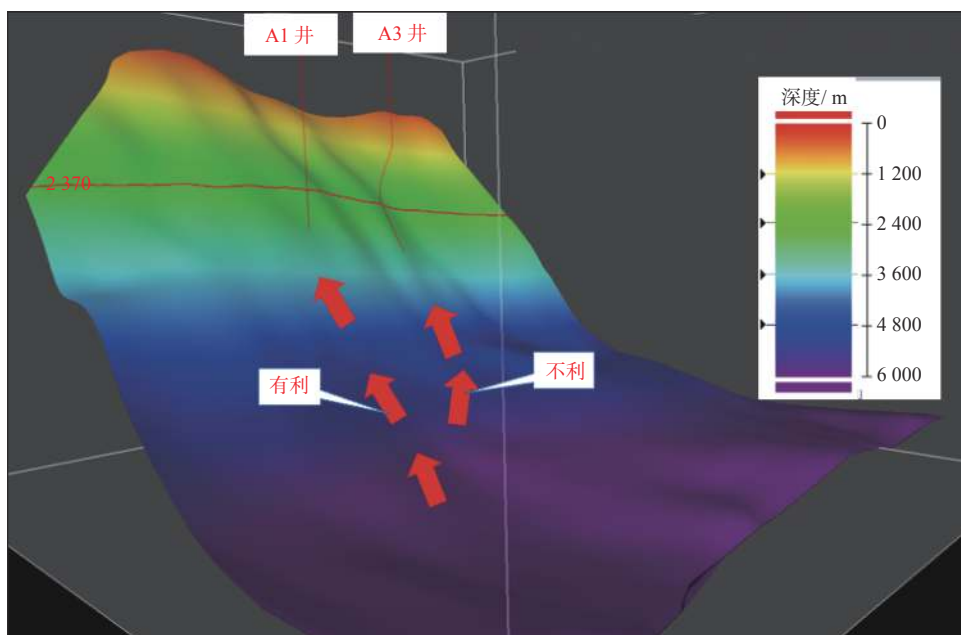


图 9 控注断裂断面深度分布图

Fig.9 The depth distribution on fault section

移。也有研究表明,断层面貌上,倾角越大,油气向上运移越通畅^[8,10],图 10 中可以看出,A1 井

靠近油源的断面倾角大于 A3 井,油气运移更通畅。

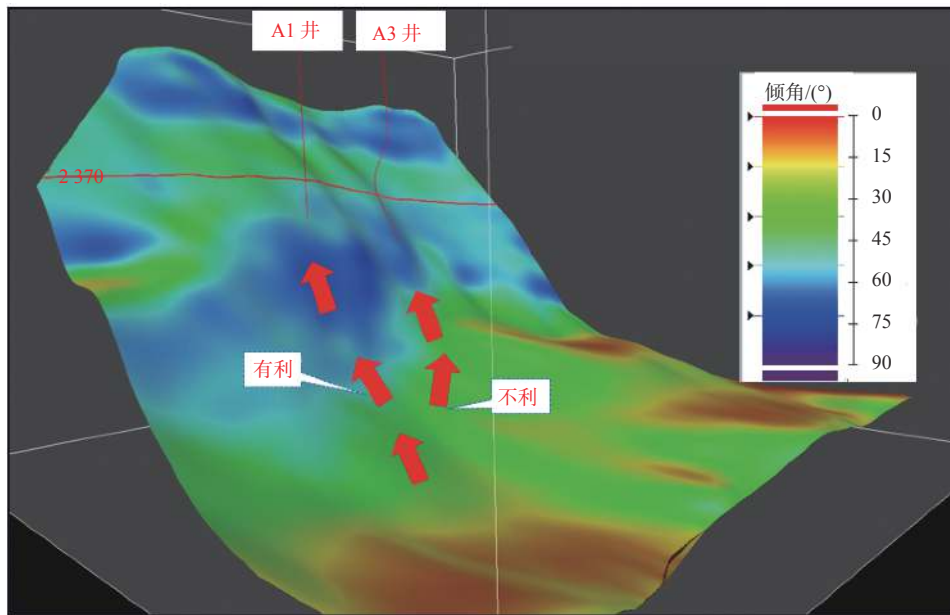


图 10 控洼断裂断面倾角分布图

Fig.10 The dip distribution on fault section

5 应用情况

B 区域的主要目的层为恩平组,含砂率为 60% 左右,断层封堵性的分析尤为重要。首先对 B1、B2、B3 井的控圈断裂的稳定性进行了分析,结果表明在现今应力状态下都是稳定的。然后对高含砂率地层的侧向封堵开展 SGR 分析,B1、B2 块封堵能力较好,实施钻探,取得较好效果。随即钻探了 B3 井,结果落空,该构造恩平组 EP320 油层顶面构造图见图 11。B1 井和 B3 井构造条件和成藏条件都极为类似,3 井落空,令人费解。对 B1 井和 B3

井的油源断裂进行了断貌及断面 SGR 值差异的分析,发现 B3 井油源断裂断面倾角相对小(图 12),断裂静止期原油沿断裂带运移的物理模拟结果表明油气运移速度随断层倾角减小而逐渐减小^[11],因此,B3 井不如 B1 井。另外 B3 井油源断裂 SGR 值相对高(图 13),说明 B3 井油源断裂面上泥质含量相对多,断裂静止期原油沿断裂带运移的物理模拟结果表明油气运移速度随断裂碎裂岩内泥质含量增加逐渐减小^[11],因此,B3 井不如 B1 井。本文的技术体系在陆丰凹陷 B 区域得到了很好的应用,提高了对断圈的精细认识,有效提高断圈的勘探成功率。

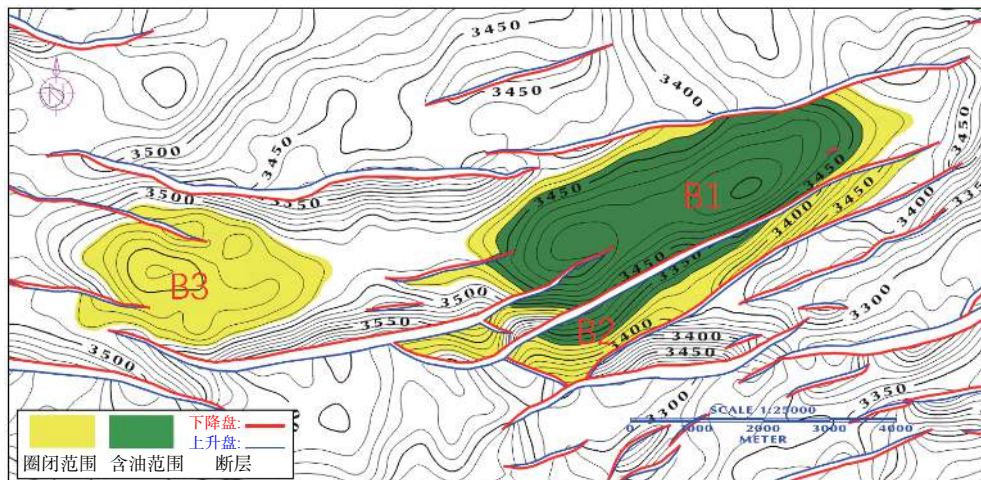


图 11 陆丰凹陷 B 区域恩平组 EP320 油层顶面构造图

Fig.11 The oil top structural map of Enping Formations EP320 in Block B of Lufeng Sag

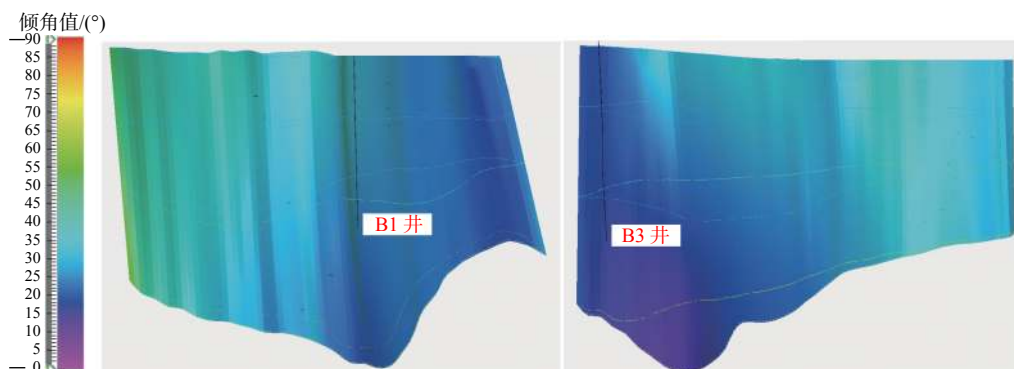


图 12 B1、B3 井油源断裂断倾角分布图

Fig.12 The distribution of oil source faults of Well B1 and B2

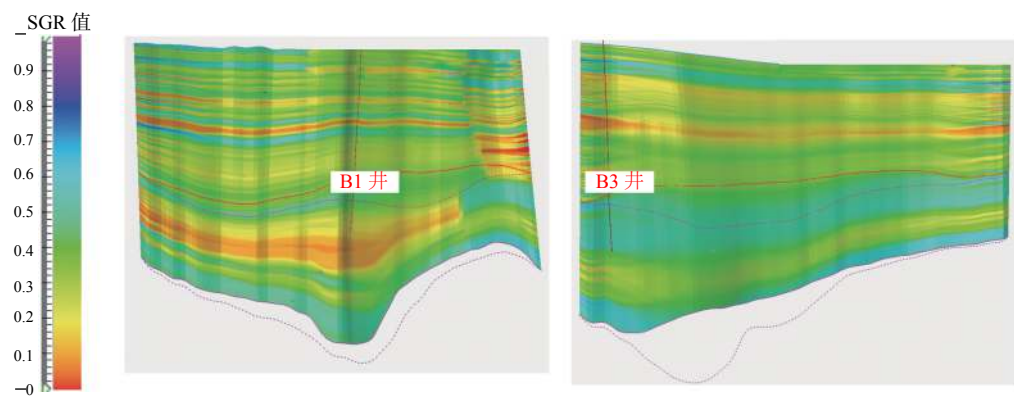


图 13 B1、B3 井油源断裂断 SGR 值分布图

Fig.13 The SGR results of oil source faults in Well B1 and B2

6 结论与认识

(1) 断面应力分析, 首先要考虑在当今应力条件下断层是否稳定, 稳定的前提下, 断面应力越大封堵性越好。断面应力一方面可通过公式精确计算得到, 另一方面对于张性盆地, 在没有足够输入数据用于计算的情况下, 可通过断面倾角的大小来定性判断断面应力的大小。

(2) 断面侧向封堵分析使用 SGR 评价方法, 考虑砂砂对接过程中靠泥岩涂抹形成的封堵能力。

(3) 断貌分析, 物理实验及实践表明, 断层面貌上油气倾向于向突起位置运移, 而且倾角越大油气向上运移越通畅。

综上所述, 全面分析了陆丰凹陷 A 油田控圈断裂的特点, 为解释 A3 块没有油气显示提供了充分论据: A3 块控圈断裂断面应力小, 封闭性弱; 断面 SGR 值偏小, 封堵性差; 位于控洼断层断面的凹处, 靠近油源的断面倾角小, 不利于油气运移。

参考文献:

- [1] 付晓飞, 温海波, 吕延防, 等. 勘探早期断层封闭性快速评价方法及应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(3): 615-621.
- [2] 刘哲, 吕延防, 付晓飞, 等. 贝尔凹陷断层侧向封闭能力定量研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(2): 353-361.
- [3] 吴孔友, 李继岩, 崔世凌, 等. 断层成岩封闭及其应用[J]. 地质力学学报, 2011(04): 350-360.
- [4] 管文胜, 查明, 张超, 等. 利用改进的SGR方法定量评价断层圈闭封堵性——以塔北隆起英买34井区为例[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(2): 218-221.
- [5] 王超, 付广, 董英洁, 等. 基于SGR算法的断层侧向封闭性评价方法改进及其应用[J]. 地质学报, 2017, 91(7): 1641-1650.
- [6] 王伟, 吕延防, 付广, 等. 利用拟声波约束反演求取泥质含量的新方法及其在断层侧向封闭性评价中的应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(2): 737-744.
- [7] 姜振学, 庞雄奇, 曾溅辉, 等. 油气优势运移通道的类型及其物理模拟实验研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 507-516.
- [8] 马中良, 曾溅辉, 赵乐强, 等. 断层物性和倾角变化对济阳坳陷斜坡带油气运聚影响的实验模拟[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(3):

- 109-113.
- [9] 袁波, 孙照勇, 姜鹏, 等. 文留油气田断面优势运移通道对油气的控制作用[J]. 断块油气田, 2014, 21(3): 292-295.
- [10] ZHANG L, LUO X, VASSEUR G, et al. Evaluation of geological factors in characterizing fault connectivity during hydrocarbon migration: Application to the Bohai Bay Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(9): 1634-1647.
- [11] 付广, 王国民, 黄劲松. 断裂静止期有无输导油气能力的判别方法[J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 850-856.
- [12] 孙龙涛, 陈长民, 詹文欢, 等. 珠江口盆地断层封堵特征及其影响因素[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 36-40.
- [13] 张忠涛, 施和生, 秦成岗, 等. 番禺低隆起—白云凹陷北坡断层封闭性研究[J]. 断块油气田, 2010, 17(1): 24-27, 51.
- [14] 吕延防, 王有功, 付广, 等. 珠江口盆地珠一坳陷断层圈闭钻探风险性评价[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 95-100.
- [15] 许新明, 陈胜红, 王福国, 等. 珠江口盆地恩平凹陷断层特征及其对新近系油气成藏的影响[J]. 现代地质, 2014, 28(3): 543-550.
- [16] 黄峰, 彭光荣, 全志臻, 等. 珠江口盆地番禺4洼断块圈闭勘探成效及影响因素[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(7): 36-41, 65.
- [17] 彭辉界, 庞雄奇, 李洪博, 等. 珠江口盆地珠一坳陷断裂控藏定量表征与有利勘探区预测[J]. 现代地质, 2016, 30(6): 1318-1328.
- [18] 刘卓岩, 王成虎, 徐鑫, 等. 基于地应力实测数据分析庐庐断裂带中段滑动趋势[J]. 现代地质, 2017, 31(4): 869-876.
- [19] BYERLEE J. Friction of Rocks[J]. Pure and Applied Geophysics Pageoph, 1978, 116(4): 615-626.
- [20] YIELDING G B, FREEMAN B, Needham T. Quantitative fault seal prediction[J]. AAPG, 1997, 81(6): 897-917.
- [21] PETER B, GRAHAM Y H. Using calibrated shale gouge ratio to estimate hydrocarbon column heights[J]. AAPG, 2003, 87(3): 397-413.

AN INTEGRATED ASSESSMENT OF FAULT SEALING FOR OILFIELD A IN LUFENG SAG OF PEARL RIVER MOUTH BASIN

YANG Chaoqun, LEI Yongchang, QIU Xinwei, XIAO Zhangbo

(Shenzhen Branch of CNOOC China Limited, Shenzhen 518000, China)

Abstract: The success rate of drilling for fault structure traps is not high in the Pearl River Mouth Basin, and the study of fault sealing is particularly important for enhancing the success rate. In recent years, the technical progress of fault sealing study is mainly reflected in the aspects of consideration of stress factors, quantitative study of shale smears, and consideration of the three-dimensional shape of the sections. A typical fault trap, the Oilfield A in the Lufeng sag, is selected as an example for such an integrated assessment following the ideas mentioned above. The key reasons for the success or failure of the different fault blocks has been analyzed individually. It is found that the stress difference, SGR difference, appearance difference on section are the reasons to cause the failure in one fault block. The experiences provided by the case is valuable for drilling in similar fault structure traps.

Key words: fault sealing; stress on section; SGR; shale smear; three-dimensional shape of the section