

渤海海域辽中凹陷 LD 油田油源断层运移能力 定量评价及运移模式

田立新,王冰洁

(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300452)

摘要:渤海海域辽中凹陷多个复杂断裂带内受次级调节正断层的控制形成了数量众多的断块圈闭,探井已经证实位于成熟烃源岩层系之上的断块圈闭其油源断层的垂向输导能力对不同断块的油气富集程度具有非常重要的影响。本文分析认为研究区油源断层的断面形态及其与成熟烃源岩段的接触面积是油气运移能力的主控因素,在此基础上,充分利用地震资料对油源断层进行精细解释,刻画断面三维形态展布及其与成熟烃源岩的接触,通过数值模拟方法定量计算了这两个地质因素控制下不同油源断层油气运移能力的大小,并结合测井资料对断层伴生裂缝带的发育特征进行了识别,建立了 LD 油田油气运移模式,研究结果表明:研究区内 6 条油源断层的油气运移能力存在明显差别;在整个油田范围内含油层段有 24 个油气充注点,且充注能力不同,控制了不同断块储量丰度的差异;油源断层伴生裂缝带的发育在断层两盘存在横向不对称性,在下降盘附近的裂缝更为发育,孔渗得到改善,从而导致这些充注点的油气在下降盘发生明显的分流作用。基于上述成果建立了研究区的油气运移模式,与实际钻探结果吻合较好。

关键词:运移能力;运移模式;定量评价;复杂断裂带;油源断层;LD 油田;辽中凹陷

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Quantitative evaluation of source tapping fault for oil migration and establishment of its migration model in LD oilfield in the Liaozhong Sag, Bohai Sea

Tian Lixin, Wang Bingjie

(Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: In the Liaozhong sag, Bohai Sea, complex fault zones give rise to numerous secondary accommodation normal faults, which form and control a large number of fault block traps. Well data have confirmed that the vertical oil migration ability of source tapping faults, which connect mature source rocks with fault block traps located on top of it, is of great importance to abundance of oil and gas accumulation in these traps. The study regards that the geometry of source tapping fault's surface and its contact area within the mature source rocks control the oil and gas migration. Thus, the seismic data are used to elaborately interpret source tapping faults, to depict the three-dimensional geometry of fault section and its contact area within mature source rocks. Under the control of the above two geological factors, the migration ability was estimated by numerical simulation, and combined with logging data, we identified fault-associated fracture zones. Thus the model of oil and gas migration in LD oilfield is established based upon these results. The results are as follows: The oil migration ability of the six studied source tapping faults varies significantly. There are 24 charging points to the oil reservoir of the oilfield with diverse contributions, and result in different reserve abundance in different fault blocks. The intensity of associated fracture zone of the source tapping fault is different on either walls of the fault, with the better developed fractures and improved porosity and permeability near the downthrown side, where the selective hydrocarbon migration from the charging points occurs. And based on these results, we established the migration model of oil and gas in the study area, which matches well with the actual drilling results.

Key words: oil migration ability, migration model, quantitative evaluation, complex fault zone, oil source tapping fault, LD oilfield, Liaozhong sag

收稿日期:2017-06-30;修订日期:2018-03-21。

第一作者简介:田立新(1970—),男,高级工程师,地球物理和勘探目标。E-mail: tianlx@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05024-002-006)。

郯庐断裂带整体上呈北东-南西向贯穿整个渤海海域东部地区^[1],自新生代以来渐新世的右旋走滑伴随拉分活动和新近纪的右旋走滑压扭活动^[2]形成了一系列复杂断裂带,最典型的特征是组成复杂断裂带的调节断层异常发育^[3]。渤海油田的勘探实践证实,这些次级调节断层均具有正断层的特征。对于局部构造而言,大多受多条次级调节正断层的切割作用,形成复杂的断块圈闭群。位于成熟烃源岩层系之上(“源上”)的断块圈闭,油气富集程度与深切烃源岩油源断层的垂向输导能力具有极其密切的关系。海域油气勘探受钻井成本的影响,当面对复杂断块进行井位部署时,往往第一口探井成功发现油气“富集块”非常重要,因此油源断层垂向输导能力的成功评价对于海域“源上”断块圈闭的成藏研究和勘探实践具有重要意义。

关于断层油气运移能力的评价国内外众多学者很早就注重对断面形态^[4-5]和断层结构^[6-10]两个方面的研究,其中对断面形态控制油气运移的分析大多是基于地震资料解释断层结果进行定性判断,这对于区域性的勘探目标优选具有一定帮助,但很难区分出局部构造不同断层的运移能力的大小;而对断层结构的研究更多的是依赖于地表露头和钻井取心资料的直接观察,这对于未获取相关地质资料的未钻井地区也很难实现。针对上述问题,在前人研究的基础上,本文以渤海海域辽中凹陷 LD 油田的复杂断块为研究对象,基于断面形态对油源断层的运移能力进行钻前综合定量评价,并基于断层结构判别对局部构造多个断块的成藏特征进行分析,研究结果一方面解释了 LD 油田的原油富集规律,另一方面对于“源上”断块圈闭优选提供了一种不依赖于钻井的评价方法和思路。

1 LD 油田基本地质特征

1.1 区域地质概况

渤海海域东北部的辽东湾拗陷整体呈北东-南西向展布,是下辽河裂谷盆地向渤海海域的自然延伸,辽东湾海域整体表现为“三凸三凹”的构造格局,包括辽西凹陷、辽中凹陷和辽东凹陷 3 个负向构造单元以及分隔凹陷的辽西南凸起、辽西凸起以及辽东凸起 3 个正向构造单元(图 1a)。新生代经历了古近纪裂陷和新近纪—第四纪后裂陷两个阶段^[11-12]。辽中凹陷位于辽东湾拗陷的中部,隶属于新生代沉积盆地,古近系由深至浅发育地层有孔店组(Ek)、沙河街组(Es)和东营组(Ed),主要为多期扇三角洲、辫状河三角洲和湖

相泥岩的旋回沉积,新近系发育馆陶组(Ng)和明化镇组(Nm),主要为辫状河到曲流河陆源粗碎屑的砂砾岩和砂泥岩互层沉积^[13]。

1.2 LD 油田构造特征

在辽中凹陷南部,受贯穿辽中南洼的郯庐断裂带的影响,在区内发育了多支走滑断层,并且断层的发育与里德尔右旋剪切模型相吻合。根据走滑断层的走向以及次级调节断层的组合关系,将其划分为西部走滑断裂带、辽中 1 号走滑断裂带和中央走滑断裂带。其中,LD 油田位于西部走滑断裂带的中部,该构造的发育整体受控于 FS₁ 和 FS₂ 两支主干走滑断层(图 1b),位于两支走滑断层的叠覆带。伴随着新生代强烈的右旋走滑作用^[14-15],这两支走滑断层在平面上的分布具有明显的右旋右阶特征,在叠覆带(LD 油田发育位置)整体处于局部拉张的构造应力环境。以此为动力学基础,发育了一系列近 EW 向和 NNE 向横向搭接两支走滑断层的次级调节正断层,并在其控制下形成多个断块,断块高点的位置位于断层上升盘靠近断层一侧,在剖面上表现为明显的受正断层控制形成的反向断阶带(图 2)。

1.3 LD 油田油源断层特征

钻探结果证实,LD 油田在东一段(Ed¹)和东二上亚段(Ed^{2(上)})发现大规模油气聚集,在次级调节正断层的控制下形成一典型的断块油田。这些在拉张作用下形成的次级调节正断层均为有利的油源断层(正断层 F₁—F₆),并控制圈闭的形成及其高点的发育,形成断块圈闭群(图 1c)。受 FS₁ 和 FS₂ 两支走滑断层及其次级调节正断层的影响,该构造走向整体上呈 NNE 向,地层倾向 SW。其中 F₁ 断层呈 NE-SW 向展布,延伸长度超过 20 km,为油田范围内规模最大的次级调节正断层,其最大断距为 60 m,断层倾角约为 50°~55°。F₂—F₄ 断层呈近 E-W 向展布,延伸长度为 3.5~6.0 km,最大断距为 40 m,断层倾角约为 45°~50°。F₅ 和 F₆ 断层与 F₁ 断层走向一致,延伸长度为 2.5~3.5 km,最大断距为 50 m,断层倾角约为 50°。整体上来看,这些次级调节断层均为拉张作用形成的正断层,剖面特征相似,均表现为铲状,受其控制所形成圈闭面积分布在 1.5~5.0 km²,闭合幅度可以达到 100 m 以上,是有利的油气聚集圈闭。

2 次级调节正断层垂向输导能力

2.1 断层运移能力主控因素

油气沿断层垂向输导能力的大小受到地层的盖层

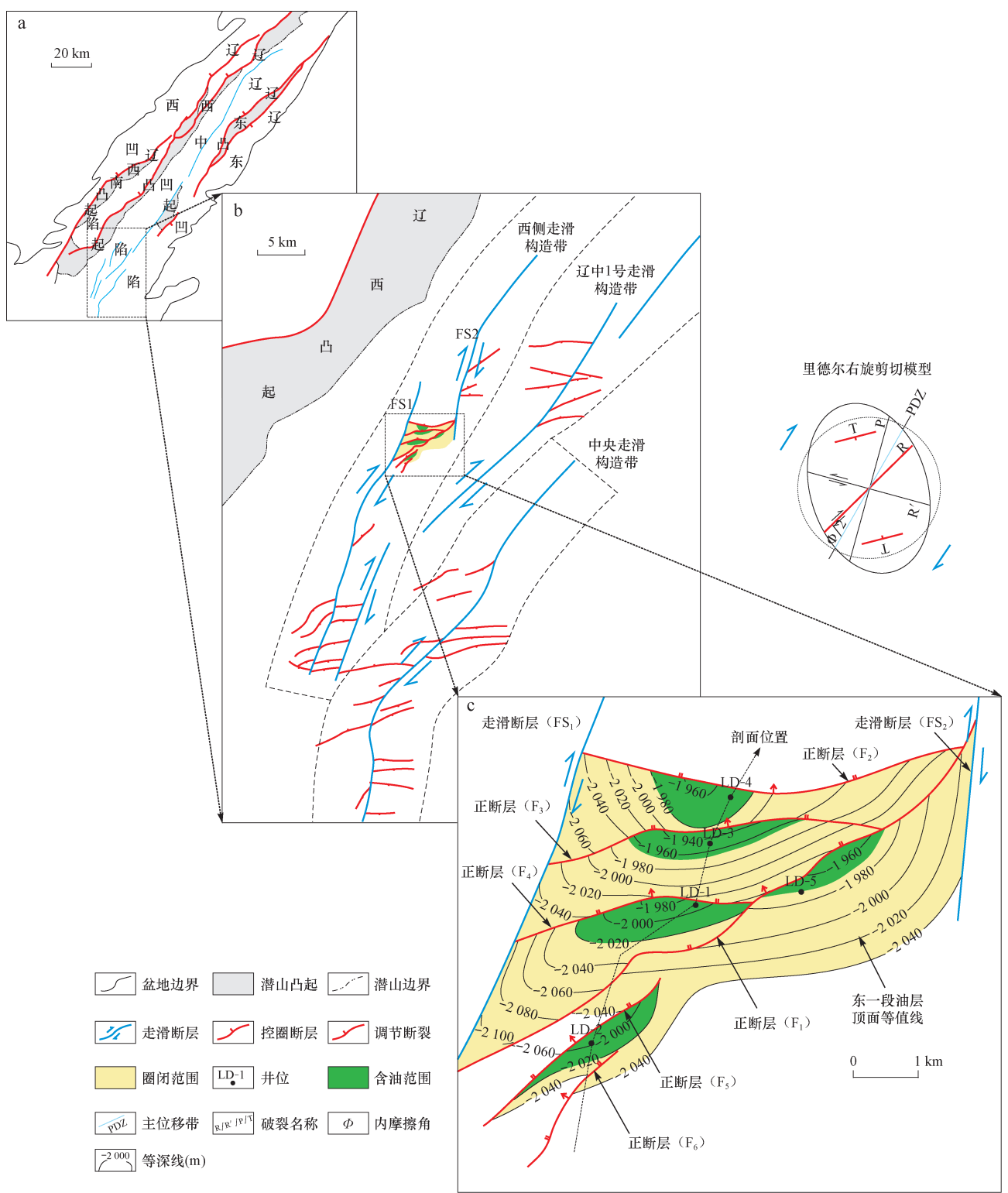


图 1 研究区构造位置和构造特征
Fig. 1 Structure location and characteristics of the study area
a. 辽东湾拗陷;b. 辽中凹陷南部;c. LD 油田东一段油层顶面构造

条件、断层的活动强度、断层的性质、油源条件^[16]及成岩作用^[17]等多种因素的制约和影响,从 LD 油田的成藏模式图可以看出来(图 2),该油田东一段和东二上亚段不具备生烃条件,原油主要来自于下伏的沙三段

烃源岩^[18],各个断块的原油均通过切入成熟烃源岩段的次级调节正断层(F₁—F₆)进行垂向导输,成为有利的油源断层。但根据钻探结果来看,各个断块油藏的储量丰度存在明显差别,说明不同的运移正断层在垂

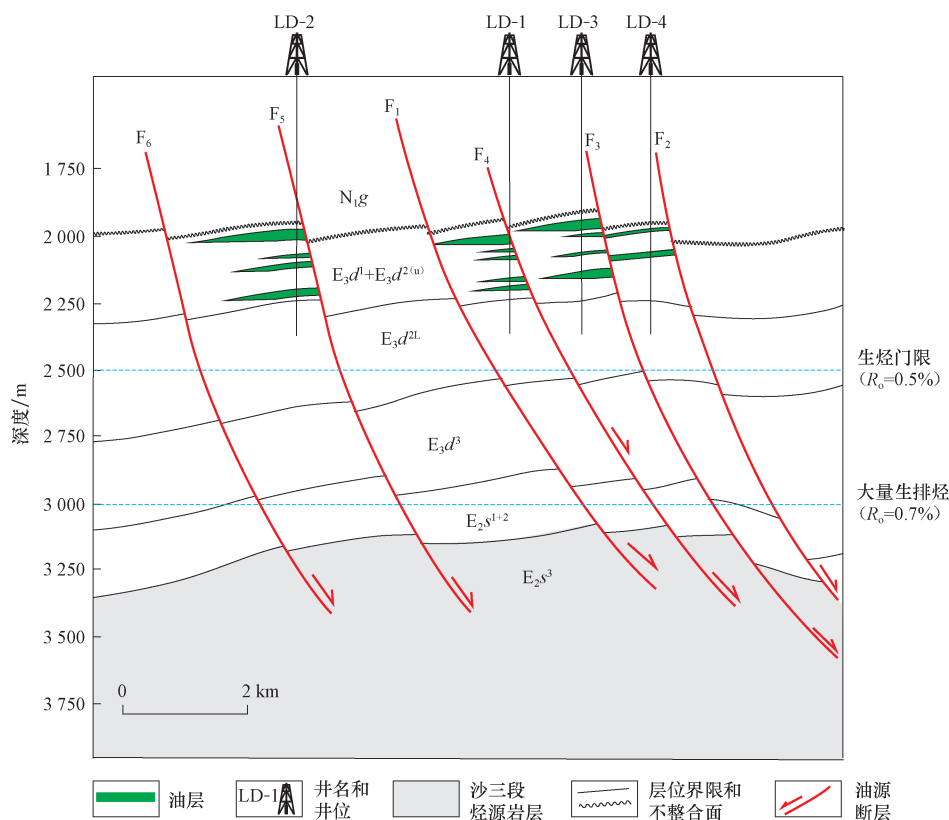


图2 辽中凹陷LD油田东一段和东二上亚段成藏模式(剖面位置见图1所示)

Fig. 2 Oil accumulation model of the Dongying Formation in the first and upper section of the second member in LD oilfield, Liaozhong Sag (profile location seen in Fig. 1)

向上的输导能力存在着明显的区别。该构造作为一局构造,其不同的断块具有相同的油源条件,而且钻井揭示的各个断块之间岩性组合相一致,断层的活动强度和活动时期也具有 consistency,其保存条件和经历的成岩作用也相似。断层性质均为拉张应力环境中形成,具有正断层特征,所以众多影响油气垂向运移的地质条件均具有一定的相似性。根据地震资料三维空间精细解释结果,该油田各个油源断层的三维形态具有明显的差别,这成为控制研究区断层运移能力的主要因素^[19-20],即深切入成熟烃源岩段(镜质体反射率 $R_o > 0.5\%$)受断层形态控制所形成“源内断层脊”的深度和规模,决定了该断层在开始输导油气之初的聚油气能力,进而影响整个输导通道的运移能力,这往往也是断层油气运移能力分析过程中容易忽略掉的一个重要控制因素。从油源断层形态分析结果来看(图3),油源断层断面与成熟烃源岩的接触面积受断层规模和形态的影响, F_1 断层(NW-SE向展布)的延伸长度最长,断面面积可以达到 19.6 km^2 ,其断面和成熟烃源岩的接触面积也达到了 9.7 km^2 ,从北往南, F_2 — F_6 断层断面面积相差较大,分别为 $7.8, 11.4, 8.3, 7.3$ 和 8.8 km^2 ,断面

和成熟烃源岩的接触面积分别为 $3.1, 3.9, 2.1, 2.2$ 和 3.7 km^2 。

2.2 基于断面空间形态的输导能力评价方法的建立

上述断层与成熟烃源岩的接触面积在一定程度上反映了整个断层断面上的油气运移能力的大小。但实际上,当油气从烃源岩内沿断面开始运移之后,在流体势^[21]的控制下,会形成多条油气输导通道,这些输导通道运移能力的大小决定了整条断层对目的层系断块充注能力的强弱,而油源断层断面上不同的输导通道受到断面空间形态控制,形成多个“断层脊”。精细的地震解释可以在空间上细微地表征“断层脊”的数量,但如图3所示,一方面,当断面整体上较为平缓时,定性识别“断层脊”具有一定的难度;另一方面,对识别出的“断层脊”,当源内烃源岩面积相差不大时,难以刻画其运移能力的大小。

为了定量表征切入成熟烃源岩的“断层脊”的运移能力,刻画出断面上油气运移有效的输导通道,准确评价断层的垂向输导能力,并对比不同的断层的输导能力的大小,本文采用断面油气运移数值模拟的方法来进行刻画,在源内断面上油气运移的初始数量采用

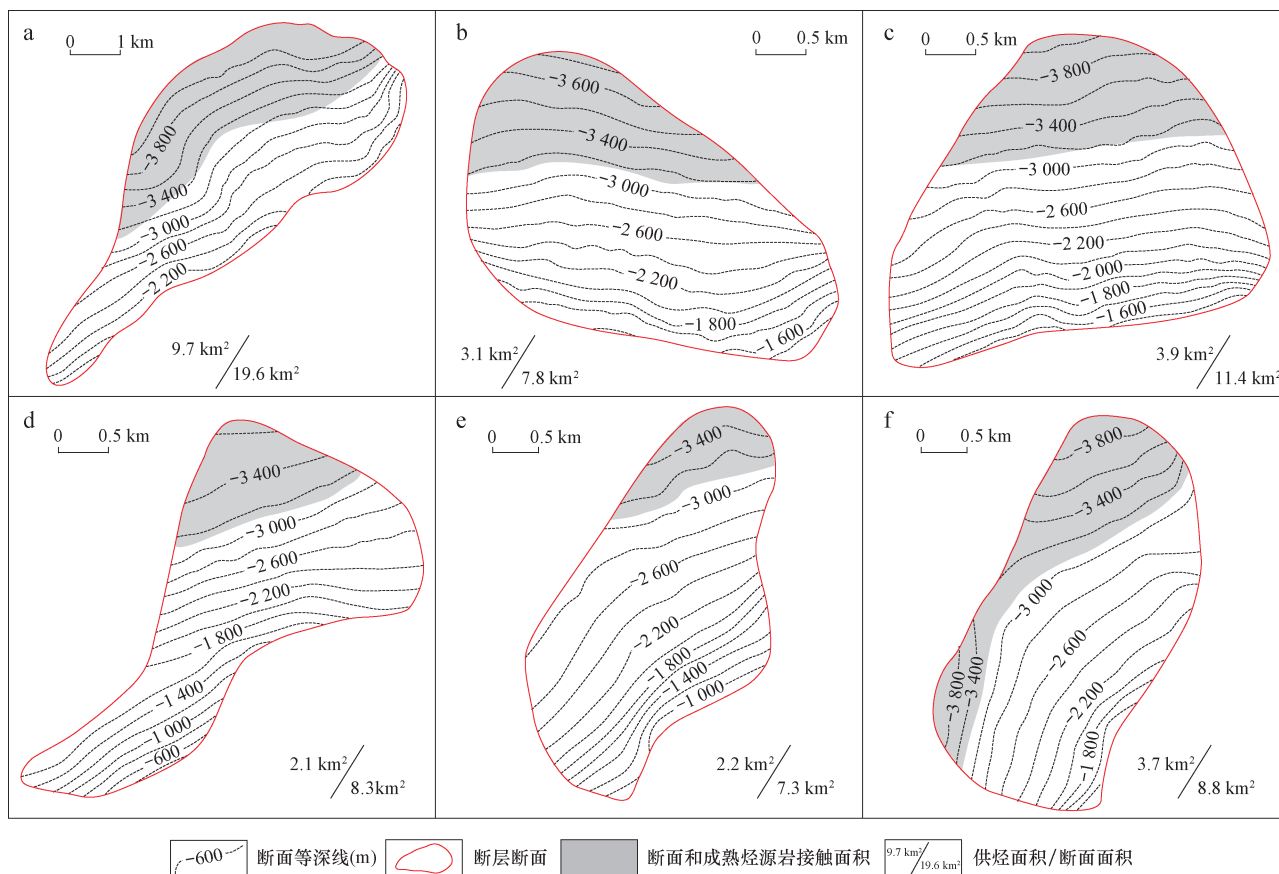


图3 辽中凹陷 LD 油田断层平面分布与成熟烃源岩接触特征

Fig. 3 Distribution of fault plane and contact with mature source rocks in LD oilfield, Liaozhong Sag

a. F₁ 断层; b. F₂ 断层; c. F₃ 断层; d. F₄ 断层; e. F₅ 断层; f. F₆ 断层

成熟烃源岩段的初始排烃量来进行控制,油气在断面上运移过程中的散失量采用运移效率来进行控制,而在断面的汇聚则受断面空间形态的控制,利用地震解释来进行精细的三维空间建模。上述3个因素的计算如公式(1)所示。油气在断面上的运移方向采用“烃势能面”(即烃势)的概念来计算油气运移的势能,即运移路径垂直于烃类势能面上的等值线。其中,烃类势能的计算结合实际地质条件设定地层压力均为常压,在油气沿整个断面运移过程为净水驱动条件下的运移,所以采用净浮力的计算方式来表征净水压头代表其势能[公式(2)]。

$$Q_h = Q_p S_h E_m \quad (1)$$

$$H_{\text{buoy}} = -[(\rho_w - \rho_{\text{hc}})/\rho_{\text{hc}}] Z_{\text{carrier}} \quad (2)$$

式中: Q_h 为油气运移量, kg; Q_p 为单位面积排烃量, kg/m²; S_h 为排烃面积, m²; E_m 为运移效率, %; H_{buoy} 为净浮力压头, m; ρ_w 为水的密度, kg/m³; ρ_{hc} 为烃的密度, kg/m³; Z_{carrier} 为储层海拔, m。

图4为基于断面空间形态评价垂向输导能力的方法过程。在实际计算中,首先建立断面空间模型,并确

定成熟烃源岩段与断面的接触范围,通过刻画精确三维模型来确定在成熟烃源岩段和断面的接触面积,该范围即为油源断层的供烃范围(图4a);其次通过流体势的计算来确定流体在断面上的运移方向,以此确定出断面上油气运移的输导通道(图4b),最后对成熟烃源岩段和断面接触面积内的排烃量和运移效率进行赋值。为了对比断面内部不同“断层脊”输导能力的相对强度以及不同的断层之间输导能力的相对强度,在赋值时将单位排烃量和排烃效率设置为相同的数值。本次研究将这两个参数分别设置为 2 000 g/km² 和 50% (随机赋值结果) 并进行计算,便可得到有效的输导通道,剔除掉无效输导通道(图4c),通过上述赋值设置后,可以进行断面内和断层间输导能力的对比(图4d)。

3 油气运移模式的建立

3.1 不同控圈断层油气输导能力存在明显差异

研究区多个断块的控圈断层均已深切成熟烃源岩

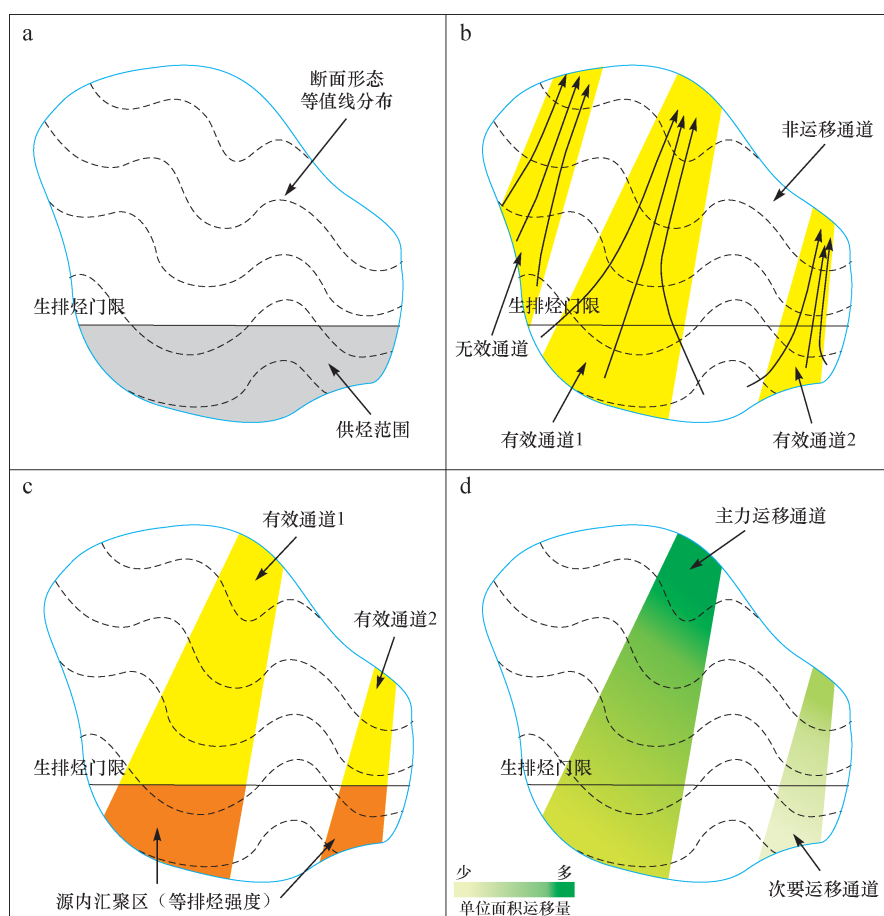


图4 基于断面空间形态评价油气垂向输导能力

Fig. 4 Evaluation of oil and gas vertical migration ability based on fault surface geometry

a. 断面形态及供烃面积关系; b. 断面流体有效运移通道提取及刻画; c. 源内“汇聚区”的聚油作用; d. 油气运移量的定量表征

段,其输导能力必然控制着各个断块在初始聚集期的油气储量丰度(即不考虑后期油气的散失)。通过各个油源断层断面上油气运移的有效输导通道刻画,及各个输导通道相对油气运移量的大小计算,定量表征出了区内不同油源断层输导能力的差异性。图5为油源断层断面油气运移量计算结果。从图中可以看出,断面上油气的有效输导通道分布在5~7个,且不同的通道具有不同的油气运移量,整体上分布在20~120(取相对值,无量纲)。其中, F_1 、 F_4 和 F_5 断层在断面上的有效输导通道均位于断面的东侧, F_2 和 F_3 断层断面上的有效输导通道分别位于断面的西侧和中部。通过断面和含油层系油层顶面埋深的“交线”可以读取目的层系平面上断层的充注点和充注能力的大小(图5)。

图6所示为求取的充注点及运移量的大小在含油层系顶面油源断层上的分布。从图中可以看出,在整个油田范围内含油层系共获得24个油气充注点,所以并非整条油源断层沿走向展布范围内均对断块的油气充注具有贡献。从各个充注点充注能力的大小来看,

研究区内 F_1 断层的单点充注能力最强,可以达到125(取相对值,无量纲,下同)以上,这也是整个油田范围内充注能力最强的位置,这与 F_1 断层在成熟烃源岩段的面积较大,其形态所控制的汇聚能力也相对较强有关。从图5的 F_1 断层的计算结果表明,来自于烃源岩的多条输导通道在目的层系汇聚成一条有效运移通道,这极大的增加了该点的充注能力。将利用含油层段顶面所确定的各个充注点的充注量之和便为该条油源断层的供烃能力,依据结果可以看出研究区内油源断层的充注能力 $F_6(370) > F_1(211) > F_3(147) > F_2(128) > F_5(51) > F_4(40)$ 。其中, F_6 断层的发育规模及其与烃源岩的接触面积虽然均要小于 F_1 断层,但从断面空间形态上来看,整个 F_6 断层断面从“源内”到“源外”的聚烃形态要明显优于 F_1 断层断面(图3)。

3.2 研究区油气首先沿油源断层往下降盘运移

油气从深层烃源岩往浅层运移时,在浅层沿着断层两侧的圈闭,即上升盘和下降盘,均有机会成藏^[22-23],本文认为研究区内油气首先沿油源断层往

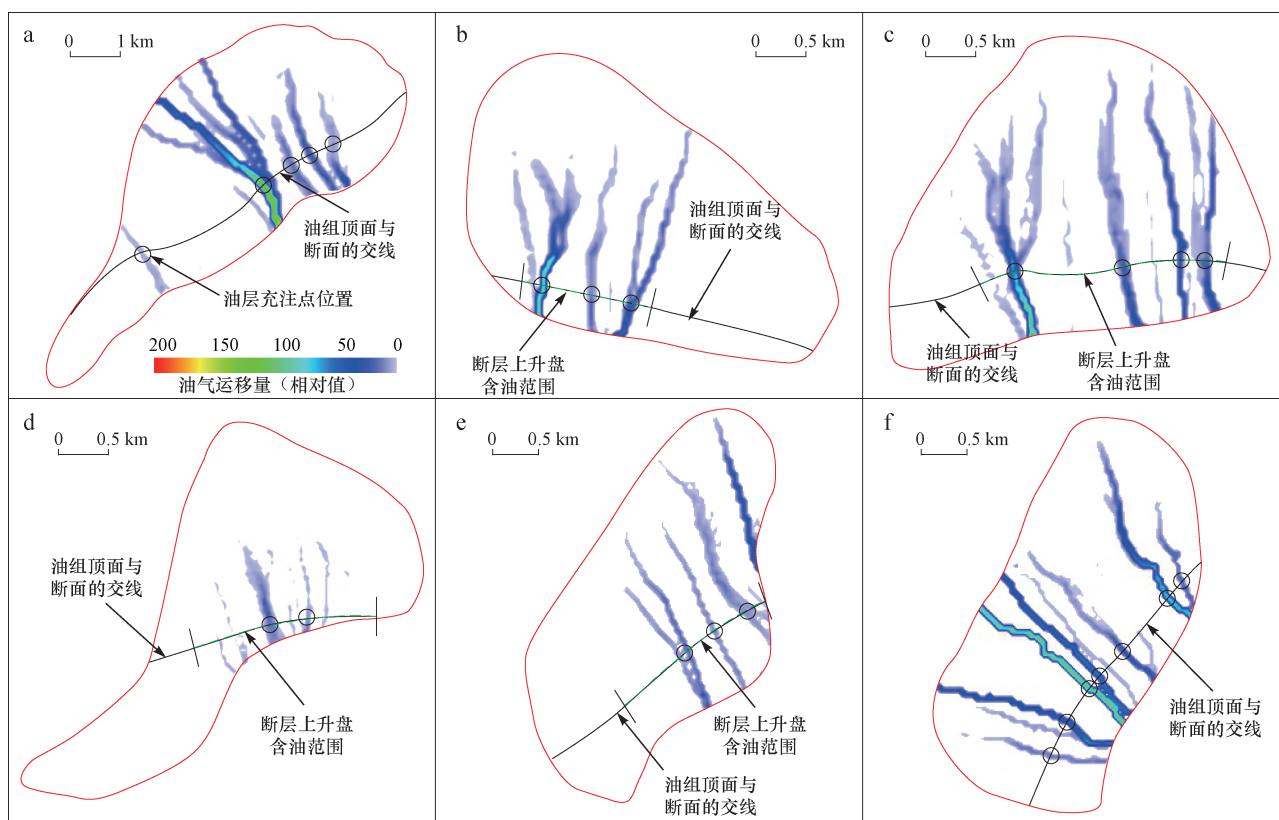


图5 断面有效运移通道输导能力定量表征

Fig. 5 Quantitative characterization for migrating ability of effective channels along fault surface

a. F_1 断层; b. F_2 断层; c. F_3 断层; d. F_4 断层; e. F_5 断层; f. F_6 断层

下降盘运移。因为区内油气运移最初应以垂向为主,而不同断块的构造高部位均位于断层的上升盘靠近断层的位置(图6中“+”)。所以在断面形态的控制作用下,如果当油气充注上升盘时,其充注点沿断层走向的分布范围应与断块上的含油范围相一致或者低于含油边界的位置,否则油气充注存在“倒灌”的现象。笔者认为此种模式在地质环境常压系统静水条件下难以形成大规模的油气聚集。

假设油气可以沿断层充注上升盘,从图5中的 F_2 和 F_3 断层可以看出,这两条断层利用输导通道和含油层段的顶面确定的充注点在横向上的分布范围与上升盘的含油边界具有较好的一致性,这两条断层是可以对上升盘进行充注的。但从图中的 F_4 断层可以看出,确定的充注点的范围与含油范围差别较大,油气充注点与上升盘圈闭高点范围相一致,而在沿断层两侧圈闭低部位不存在充注点。如果油气通过该断层充注上升盘,则为典型的“倒灌”充注成藏。从获取充注点的充注能力来看, F_2 和 F_3 断层的充注能力可以分别达到128和147,远大于 F_4 断层的40,因此如果采用这种模式成藏, F_4 断层所控制的断块储量规模应远小于 F_2 和 F_3 断层所控制的断块。实际上,目前钻井揭示

的储量规模和上述模式得到的结论恰恰相反,因此油气主要通过断层垂向输导然后往下下降盘运移,油气在沿断层垂向运移的过程中,下降盘对油气产生了明显的“分流作用”。

根据上述油气沿油源断层运移特征, F_2 断层的3个充注点对整个油田范围内成藏的贡献来说,均为无效充注点。因此基于充注点和充注方向分析,在油田范围内平面上共形成了两个有效的油气充注路径,分别位于研究区的西侧和东侧(图6)。其中西侧的油气充注能力(496)在含油层段要明显高于东侧的油气充注能力(273),大约是其1.81倍。这种油气运移模式得到的结果也与实际探井所揭示的储量分布相吻合,研究区油气储量主要集中在西侧油气充注路径所控制的断块上。

3.3 下降盘油气分流作用

上述提到油气沿油源断层垂向运移时在下降盘产生了油气分流作用,本文认为这种分流作用产生的原因与油源断层的结构特征密切相关。断层结构一般包括上升盘诱导裂缝带、滑动破碎带和下降盘诱导裂缝带,具有“三元结构”的特征。这种结构发育的差异性

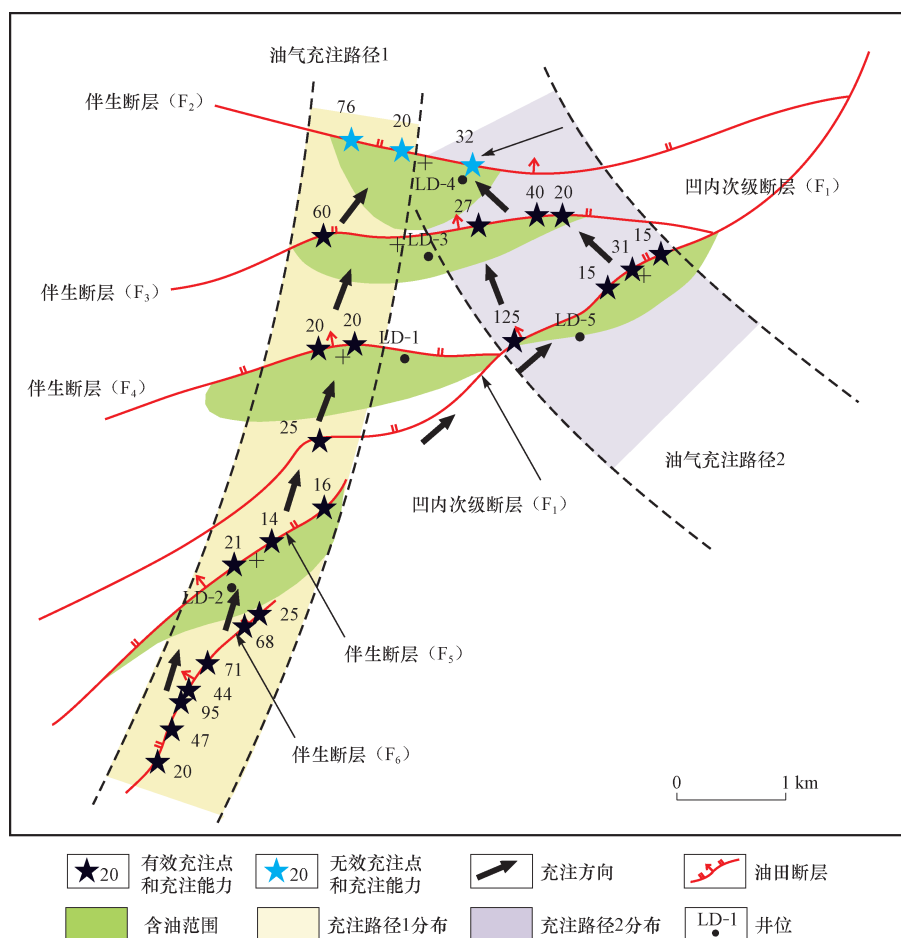


图6 辽中凹陷 LD 油田充注点和充注能力平面分布

Fig. 6 Distribution of charging points and charging ability in LD oilfield, Liaozhong Sag

(注:充注能力为相对值,无量纲)

与油气的运聚具有密切的关系,其中诱导裂缝带和滑动破碎带内发育的大量脆性岩石破裂,导致沿断裂带的孔渗性发生明显改善,成为油气运移的有利通道^[10,24-27]。郯庐断裂带呈 NE-SW 向贯穿整个研究区,直接导致该区构造活动强烈,形成了一系列深切烃源岩层系的次级调节正断层。伴随着构造活动,这些断层附近的脆性岩石发生破裂,沿着断层的空间展布形成一系列的裂缝,可以改善烃类沿断层进行垂向运移的条件,形成有利的油源断层。勘探实践表明,对于地下非露头断层,往往受地震和测井资料分辨率的限制。在缺乏岩心的情况下,准确识别并划分断层破碎带和诱导裂缝带的难度相对较大,但仍可以借助测井资料观察到宏观裂缝发育带(包括诱导裂缝带和滑动破碎带)的存在,本文将统称为“断层伴生裂缝带”。

许多断层的发育并不完全呈现出完整的三元结构,具有明显的横向不对称性^[26],在断层两盘(主动盘和被动盘)表现出明显的差异发育特征。为了对研究

区内油源断层伴生裂缝带发育情况进行识别,本文选取穿过断层面的钻井,基于单分量偶极横波远探测成像测井技术^[28]、“三孔隙度”测井曲线^[29]和光电吸收截面指数测井曲线对伴生裂缝发育段进行综合判别,它们均对裂缝发育段具有很好的响应特征。图7所示为研究区 LD-1 井(穿过 \$F_1\$ 正断层)断点(1 980 m)上下 2 50 m 厚的地层内测井特征。从图中可以看到在断点之上的下降盘 1 830 m 至断点深度范围的地层内,横波反射波径向深度内观察到明显的断层伴生裂缝反射体的存在,由于裂缝段的存在,导致流体体积增加,对应深度内的声波时差增大,密度减小,偏离正常趋势,而且光电吸收截面指数呈现出增大的现象;在断点之下的地层内,偶极横波远探测揭示的断层伴生裂缝反射体未发育,声波时差和密度测井都恢复正常趋势,光电吸收截面指数与伴生裂缝带相比具有明显减小的特征,这说明了下降盘作为构造活动中平衡区域应力的主动盘,产生了明显的断层伴生裂缝带,而上升盘作为被动盘则伴生裂缝带不发育或发育规模较小以

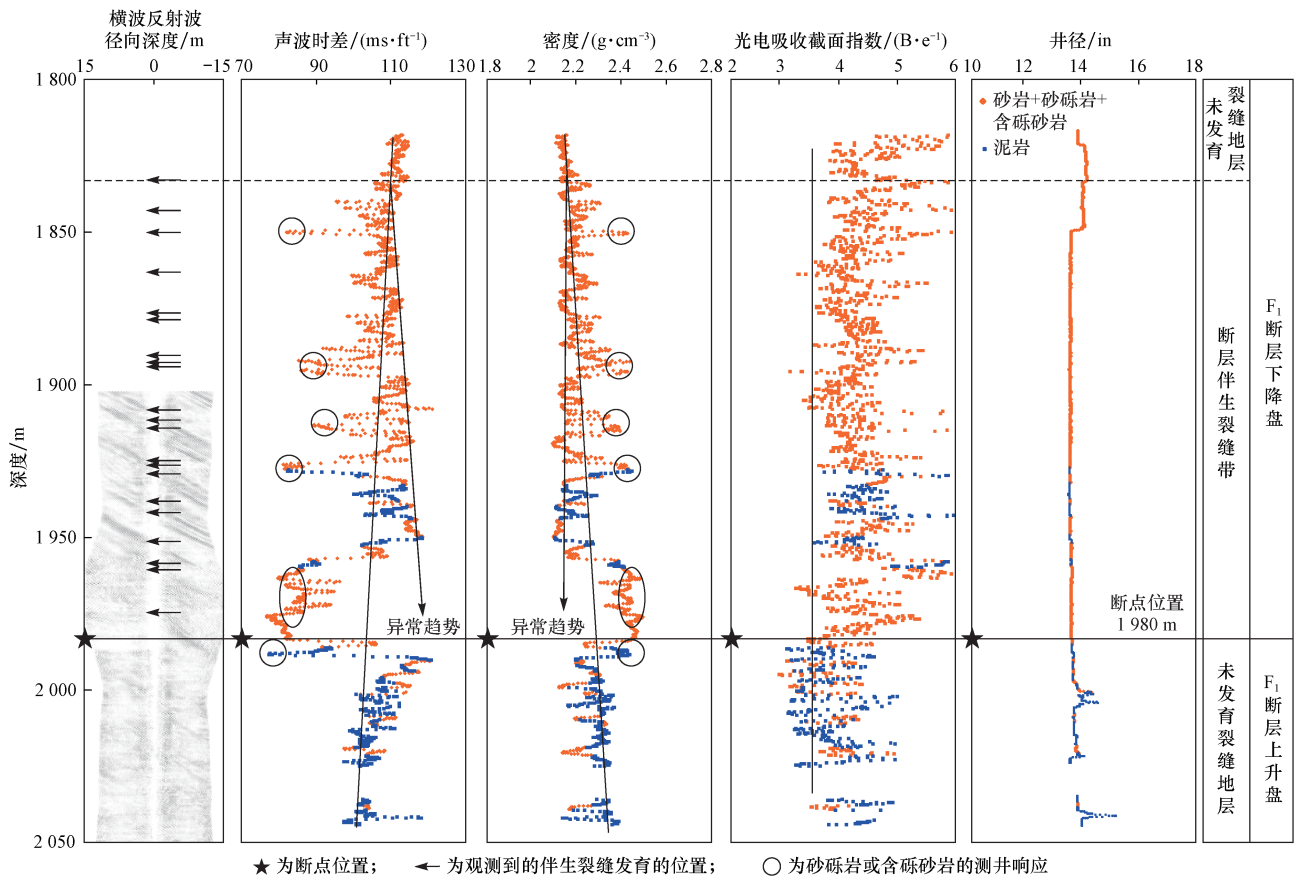


图 7 辽中凹陷 LD 油田断层(F₁)伴生裂缝带测井综合识别结果

Fig. 7 Comprehensive logging identification of fault (F₁)-associated fracture zone in LD oilfield, Liaozhong Sag

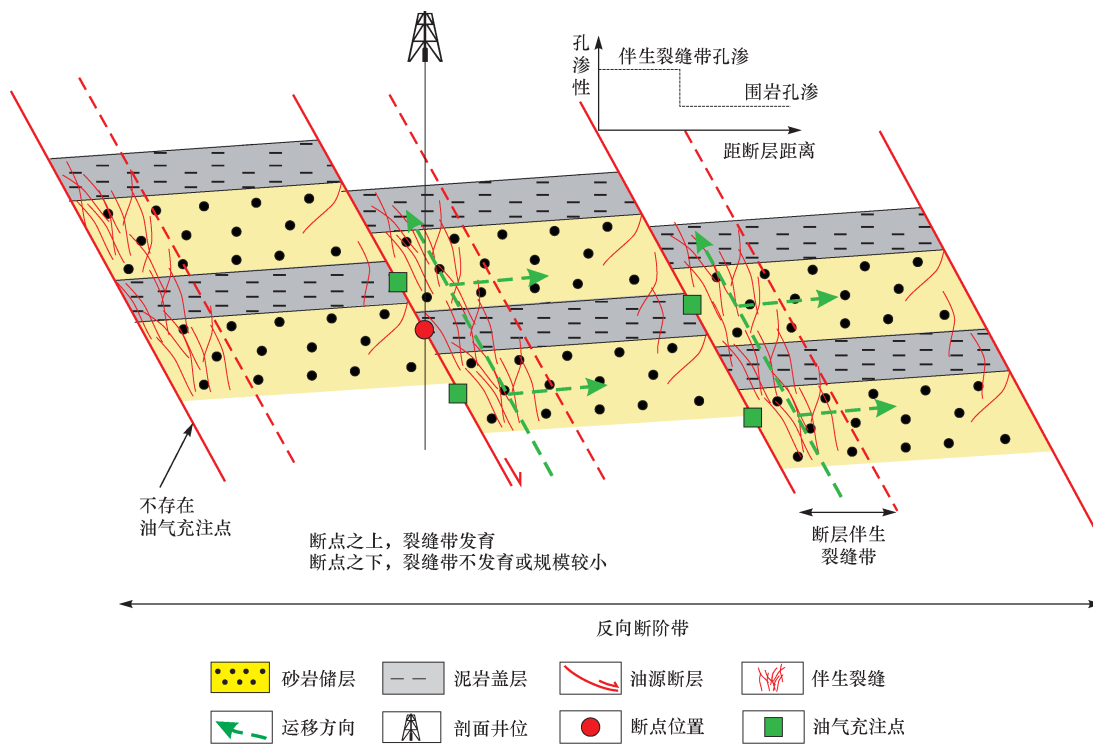


图 8 辽中凹陷 LD 油田东一段和东二上亚段油气充注模式

Fig. 8 Oil and gas charging model of the Dongying Formation and the first and upper section of the second member in LD oilfield, Liaozhong sag

至于测井资料无法识别。因此研究区油源断层两侧的伴生裂缝带具有上述横向不对称性特征,这一针对地下断层两盘伴生裂缝带发育差异性的识别结果与地表断层露头观察结果具有一致性。根据对安徽巢湖地区某断层野外观察统计,其下降盘(主动盘)的伴生裂缝带发育的规模(伴生裂缝带中裂缝发育的密度)可以达到上升盘(被动盘)的6倍以上^[26],差异明显。

图8所示为研究区反向断阶带油气充注模式图,根据上述断层伴生裂缝带横向不对称性发育特征的识别结果,研究区油源断层(次级调节正断层)伴生裂缝带表现为下降盘裂缝异常发育,当钻井穿过断层时,在其断点之上可观察到裂缝带的发育,而断点之下则刚好相反,未见裂缝带的发育。同时在下降盘地层靠近断层一侧的孔渗性由于伴生裂缝带的存在具有明显的改善作用,在断裂带内形成了相对较高的渗透率级差^[20]。当油气沿断层往上运移时,首先遇到高孔渗的下降盘砂体,导致油气优先沿下降盘砂体进行横向输导。综上,研究区内由于构造活动所产生的油源断层两盘伴生裂缝带发育的差异性引起了下降盘油气的分流作用。

4 结论

1) 研究区油源断层的断面形态及断面与烃源岩的接触程度控制了其运移量的大小,刻画了研究区6条油源断层在含油层系的24个油气充注点及充注能力。

2) 研究区同一油源断层内部的不同位置及不同油源断层之间,油气的运移能力均存在较大的差别。同时,利用定量表征的结果确定了油气在研究区沿油源断层垂向运移之后首先往断层下降盘运移,产生下降盘分流作用。这种下降盘分流作用的产生与其作为构造活动主动盘所发育的规模性的油源伴生裂缝带密切相关。

参 考 文 献

- [1] 徐长贵. 渤海走滑转换带及其对大中型油气田形成的控制作用[J]. 地球科学, 2016, 41(9): 1548-1560.
Xu Changgui. Strike-slip transfer zone and its control on formation of medium and large-sized oil fields in Bohai Sea area[J]. Earth Science, 2016, 41(9): 1548-1560.
- [2] 龚再升, 蔡东升, 张功成. 郯庐断裂对渤海海域东部油气成藏的控制作用[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 1-10.
Gong Zaisheng, Cai Dongsheng, Zhang Gongcheng, et al. Dominating action of Tanlu fault on hydrocarbon accumulation in Eastern Bohai Sea Area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 1-10.
- [3] 李伟, 任健, 刘一鸣, 等. 辽东湾坳陷东部新生代构造发育与成因机制[J]. 地质科技情报, 2015, 34(6): 58-64.
Li Wei, Ren Jian, Liu Yiming, et al. Development and formation mechanism of cenozoic tectonics in the East Area of Liaodong Bay Depression[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(6): 58-64.
- [4] 姜素华, 曾澍辉, 李涛, 等. 断层形态对中浅层石油运移影响的模拟实验研究[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(2): 245-248.
Jiang Suhua, Zeng Jianhui, Li Tao, et al. An experimental study on the influence of fault-plane shape on petroleum migration in middle and shallow formations[J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(2): 245-248.
- [5] Richard G G, Peter A B. 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): 465-478.
- [6] Antonellini M, Aydin A. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: Petrophysical properties[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(3): 355-377.
- [7] Doughty P T. Clay smear seals and fault sealing potential of an exhumed growth fault, Rio Grande rift, New Mexico[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(3): 427-444.
- [8] Paul R R, Laurel B G, Claudia J L. Controls on fault damage zone width, structure, and symmetry in the Bandelier Tuff, New Mexico[J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32: 766-780.
- [9] 吴智平, 陈伟, 雪雁, 等. 断裂带的结构特征及其对油气的输导和封闭性[J]. 地质学报, 2010, 84(4): 570-578.
Wu Zhiping, Chen Wei, Xue Yan, et al. Structural characteristics of faulting zone and its ability in transporting and sealing oil and gas[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(4): 570-578.
- [10] 付晓飞, 方德庆, 吕延防, 等. 从断裂带内部结构出发评价断层垂向封闭性的方法[J]. 地球科学, 2003, 30(3): 328-336.
Fu Xiaofei, Fang Deqing, Lv Yanfang, et al. Method of evaluating vertical sealing of faults in terms of the internal structure of fault zones[J]. Earth Science-Journal of China University of Geoscience, 2005, 30(3): 328-336.
- [11] 周心怀, 刘震, 李维莲. 辽东湾断陷油气成藏机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009, 24-26.
Zhou Xinhui, Liu Zhen, Li Weilian. Oil and gas accumulation mechanism in Liaodong fault depression[M]. Beijing: Oil Industry Press, 2009, 24-26.
- [12] 朱伟林, 米立军, 龚再升. 渤海海域油气成藏与勘探[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 41-44.
Zhu Weilin, Mi Lijun, Gong Zaisheng. Oil and gas accumulation and exploration in Bohai sea area[M]. Beijing: Science Press, 2009: 41-44.
- [13] 夏庆龙, 田立新, 周心怀, 等. 渤海海域古近系层系沉积演化及储层分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 107-115.
Xia Qinglong, Tian Lixin, Zhou Xinhui, et al. Paleogene strata sedimentary evolution and distribution of reservoir in Bohai sea area[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 107-115.
- [14] 邓运华. 郯庐断裂带新构造运动对渤海东部油气聚集的控制作

- 用[J]. 中国海上油气(地质), 2001, 15(5): 301–305.
- Deng Yunhua. Control of the neotectonism along Tangcheng-Lujing fracture zone on hydrocarbon accumulation in the eastern Bohai sea [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2001, 15(5): 301–305.
- [15] 万天丰. 郯庐断裂带的形成与演化: 综述[J]. 现代地质, 1996, 10(2): 159–167.
- Wan Tianfeng. Formation and evolution of Tangcheng-Lujing fault zone: A review[J]. Geoscience, 1996, 10(2): 159–167.
- [16] 赵密福, 刘泽容, 信荃麟, 等. 控制油气沿断层纵向运移的地质因素[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(6): 21–26.
- Zhao Mifu, Liu Zerong, Xin Quanlin, et al. Geologic factors for controlling vertical migration of hydrocarbons along faults[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2001, 25(6): 21–26.
- [17] James R B, Peter E, Grant G, et al. Evolution of a hydrocarbon migration pathway along basin-bounding faults: Evidence from fault cement [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(7): 947–970.
- [18] 邓运华, 李建平. 浅层油气藏的形成机理—以渤海油区为例 [M]. 石油工业出版社, 2008: 23–28.
- Deng Yunhua, Li Jianping. Shallow reservoir formation mechanism: A case in Bohai oil province [M]. Petroleum Industry Press, 2008, 23–28.
- [19] 罗群, 庞雄奇, 姜振学. 一种有效追踪油气运移轨迹的新方法—断面优势运移通道的提出及其应用[J]. 地质论评, 2005, 51(2): 156–163.
- Luo Qun, Pang Xiongqi, Jiang Zhenxue. A new method for effective trace petroleum migration path—concept of fault section dominant migrating channel and its Application [J]. Geological Review, 2005, 51(2): 156–163.
- [20] 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): 507–517.
- Jiang Zhenxue, Pang Xiongqi, Zeng Jianhui, et al. Research on types of the dominant migration pathways and their physical simulation experiments [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 507–517.
- [21] 王冰洁, 罗胜元, 陈艳红, 等. 东营凹陷博兴洼陷石油生成、运移和聚集史数值模拟[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 675–685.
- Wang Bingjie, Luo Shengyuan, Chen Yanhong, et al. Numerical simulation of hydrocarbon generation, migration and accumulation in the Boxing sag, Dongying Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 675–685.
- [22] 张善文, 曾溅辉. 断层对沾化凹陷陶组石油运移和聚集影响的模拟实验研究[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2003, 28(2): 185–191.
- Zhang Shanwen, Zeng Jianhui. An experiment study on influence of fault on petroleum migration and accumulation in Guantao formation, Zhanhua Depression [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(2): 185–191.
- [23] 李廷辉, 梁惠兰, 胡永军, 等. 渤海湾埕北断阶区油气二次运移模式及其对勘探的作用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2004, 19(1): 19–25.
- Li Tinghui, Liang Huilan, Hu Yongjun, et al. Hydrocarbon secondary migration modes in Chengbei Ladder Fault Zone in Bohai gulf and their effects on exploration [J]. Journal of Xi'an Petroleum University (Natural Science Edition), 2004, 19(1): 19–25.
- [24] 付晓飞, 肖建华, 孟令东. 断裂在纯净砂岩中的变形机制及断裂带内部结构[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 13(1): 25–35.
- Fu Xiaofei, Xiao Jianhua, Meng Lingdong. Fault deformation mechanisms and internal structure characteristics of fault zone in pure sandstone [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2014, 13(1): 25–35.
- [25] 付晓飞. 张性断裂带内部结构特征及油气运移和保存研究[J]. 地学前缘, 2012, 6(2): 200–210.
- Fu Xiaofei. Internal structure of normal fault zone and hydrocarbon migration and conservation [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 6(2): 200–210.
- [26] 陈伟, 吴智平, 侯峰, 等. 断裂带内部结构特征及其与油气运移的关系[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 774–780.
- Chen Wei, Wu Zhiping, Hou feng, et al. Internal structures of fault zones and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 774–780.
- [27] 高君, 吕廷防, 田庆丰. 断裂带内部结构与油气运移及封闭[J]. 大庆石油学院学报, 2007, 31(2): 4–7.
- Gao Jun, Lv Yanfang, Tian Qingfeng. Analysis of hydrocarbon migration through the fault based on interior structure of fault zone [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2007, 31(2): 4–7.
- [28] 唐晓明, 魏周拓. 声波测井技术的重要进展—偶极横波远探测测井[J]. 应用声学, 2012, 31(1): 10–18.
- Tang Xiaoming, Wei Zhoutuo. Significant progress of logging technology: remote acoustic reflection imaging of a dipole acoustic system [J]. Applied Acoustics, 2012, 31(1): 10–18.
- [29] 刘伟, 朱留芳, 许东晖. 断裂带结构单元特征及其测井识别方法研究[J]. 测井技术, 2013, 37(5): 495–498.
- Liu Wei, Zhu Liufang, Xu Donghui. On features and logging recognition method of structure unit in fracture belt [J]. Well Logging Technology, 2013, 37(5): 495–498.

(编辑 张玉银)