



油源断裂输导油气优势路径预测方法及其应用

王浩然¹, 宿碧霖², 付 广¹

1. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318;

2. 中国石油大庆油田公司第四采油厂地质大队, 黑龙江 大庆 163318

摘 要: 在油源断裂厘定及其输导油气优势路径控制因素分析的基础上, 利用三维地震和测井、录井资料, 对油源断裂活动性优势路径、内部岩性优势路径和断面油气势能优势路径进行研究, 综合预测油源断裂输导油气优势路径。通过加权赋值计算油源断裂输导油气优势路径综合评价参数, 确定油源断裂附近油气成藏有利范围。利用该方法预测渤海湾盆地冀中拗陷廊固凹陷大柳泉地区 F3 油源断裂输导油气优势路径, 结果表明: F3 断裂共发育 3 个活动性优势路径、2 个内部岩性优势路径和 6 个断面油气势能优势路径。油源断裂输导油气优势路径综合评价参数大于 1.65 的范围为 F3 断裂附近油气成藏有利范围, 与研究区目前已探明油气分布相吻合。表明该方法用于油源断裂输导油气优势路径预测是可行的, 有助于寻找油气勘探有利目标。

关键词: 油源断裂; 输导油气; 优势路径; 油气成藏; 渤海湾盆地

PREDICTION METHODS OF ADVANTAGEOUS PATHWAYS OF HYDROCARBON MIGRATION BY OIL-SOURCE FAULT AND ITS APPLICATION

WANG Hao-ran¹, SU Bi-lin², FU Guang¹

1. College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang Province, China;

2. No. 4 Oil Extraction Plant Geological Brigade, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing 163318, Heilongjiang Province, China

Abstract: Based on the determination of oil-source fault and analysis of its controlling factors for advantageous pathways of hydrocarbon migration, the 3D seismic, well logging and mud logging data are used to study the advantage pathways on the parts of oil-source fault activity, internal lithology and hydrocarbon potential field, and then to comprehensively predict the advantage pathway of oil-source fault. The comprehensive evaluation parameters of advantageous pathways of hydrocarbon migration by oil-source fault are calculated by weighted assignment to determine the favorable range of hydrocarbon accumulation near the oil-source fault. The method is used to predict the advantageous pathways of hydrocarbon migration by F3 oil-source fault in Daliuquan area of Langgu Sag in Mid-Hebei Depression, Bohai Bay Basin. The results show that there are 11 advantageous pathways developed in F3 fault, including 3 of activity, 2 of internal lithology and 6 of section hydrocarbon potential. The favorable hydrocarbon accumulation area near the F3 fault is restricted by the comprehensive evaluation parameter greater than 1.65, which is

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2022-12-05. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家自然科学基金项目“砂泥岩层系中油源断裂输导油气优势路径演化及识别研究”(41872157); 黑龙江省自然科学基金资助项目“砂泥岩地层中源断裂成藏期输导油气优势通道多层位综合刻画研究”(LH2022D011); 东北石油大学引导性创新基金项目“砂泥岩地层中源断裂成藏期输导油气优势通道多层位综合刻画研究”(15071202203); 东北石油大学人才引进科研启动经费资助项目“断-砂输导油气条件及优势路径预测”(1305021841).

作者简介: 王浩然(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事油气藏形成与保存研究工作, 通信地址 黑龙江省大庆市高新技术开发区学府街 99 号, E-mail//wanghaoranpro@163.com

consistent with the proven hydrocarbon distribution in the study area, indicating that the method is feasible for the prediction of advantageous pathways for hydrocarbon migration in oil-source fault, and helpful for favorable oil-gas target searching.

Key words: Oil-source fault; hydrocarbon migration; advantageous pathway; hydrocarbon accumulation; Bohai Bay Basin

0 引言

油气输导体系中,主要包括断裂、砂岩输导层和不整合面等3个要素,其中砂岩输导层和不整合面通常只对油气侧向运移起到输导作用,而断裂则主要对油气垂向运移起输导作用。油源断裂通常指连接有效源岩层与储集层,并且在油气成藏期活动开启的断裂。油源断裂作为垂向输导油气的重要断裂类型,在其垂向输导油气过程中,油气也并非沿整个断面进行垂向运移,而是集中于油源断裂断面的少数部位进行垂向运移,其运移过程呈现强烈的非均一性,存在油源断裂输导油气的优势路径。油源断裂是油气成藏过程中的重要桥梁和纽带,前人曾围绕油源断裂不同时期和不同部位的输导油气能力开展过研究,认为油源断裂不同时期输导油气能力差异主要取决于断裂活动性的不同^[1-3],而油源断裂不同部位输导油气能力差异主要取决于断裂内部结构的不同^[4-6]。对油源断裂不同部位输导油气能力差异性的研究,即油源断裂输导油气优势路径研究,前人主要根据断面形态以及断面流体势能展布识别油源断裂输导油气优势路径^[7-9],并没有考虑不同时期断裂活动性与断裂内部岩性对油源断裂输导油气能力的影响,导致油源断裂输导油气优势路径识别不全面,油气勘探有利目标预测不准确。

因此,通过综合油源断裂活动性优势路径、断面油气势能优势路径和油源断裂内部岩性优势路径,可以全面合理地识别油源断裂输导油气优势路径,进而对油气勘探起到更加精确的预测作用。

1 油源断裂厘定及输导油气优势路径控制因素

在对油源断裂输导油气优势路径展开研究之前,首先需要厘定出油源断裂。根据油源断裂的定义,首先需要明确研究区内主要的有效源岩层位、储集层位以及油气成藏期,然后在地震剖面上根据断裂穿层性特征分析断裂是否断穿主要的有效源岩层位和储集层位,并且在油气成藏期呈现活动开启的特征(主要以油

气成藏期沉积地层顶底界面处断裂断距值不同为依据),当满足以上条件时可以将其厘定为油源断裂。

在厘定出油源断裂之后,要分析其输导油气优势路径的控制因素,需要对油源断裂的内部结构以及输导油气时期进行分析。前人研究表明^[10-11],油源断裂内部主要发育二元结构,中间层为断层核,断层核两侧为破碎带。断层核通常由断层两盘地层岩石强烈错动相互切割产生的碎裂岩组成,而断层核两侧的破碎带通常是断层两盘地层岩石在相互错动的剪切应力作用下产生的裂缝密集带。油源断裂内部的二元结构规模变化不一,也可能存在结构缺失的现象。油源断裂内部的二元结构均可作为输导油气通道,并且与油源断裂输导油气时期密切相关。

油源断裂输导油气时期往往呈现为活动期与静止期交替进行的幕式规律,这与油源断裂的形成演化特征密不可分。油源断裂在生长延伸过程中,并非一直活动,而是存在相对活动强烈时期和相对活动微弱时期。在活动期油源断裂两盘错动较强,破碎带较为开启,其孔隙度和渗透率均较高,是油气运移的主要通道;在静止期油源断裂两盘错动较弱,破碎带在地层埋深压实作用下趋于封闭,而断层核在碎裂岩的支撑作用下保留一定的孔隙度和渗透率,是油气运移的主要通道。

油源断裂活动期与静止期的油气运移通道不同,其输导油气能力的影响因素也同样不一。通常研究油源断裂输导油气能力主要分为油气运移动力、油气运移阻力和油气供给条件等3个方面,其中活动期油源断裂输导油气能力主要与油气运移动力和油气供给条件有关,而静止期油源断裂输导油气能力主要与油气运移阻力和油气供给条件有关。

其中油气运移动力主要取决于油源断裂活动性,活动强度大的部位油气运移动力相对较强,活动强度小的部位油气运移动力相对较弱。油气运移阻力主要取决于油源断裂内部岩性,泥质含量低的部位油气运

移阻力相对较小, 泥质含量高的部位油气运移阻力相对较大. 油气供给条件主要取决于油源断裂断面油气势能, 断面油气势能汇聚的部位油气供给条件相对较好, 断面油气势能发散的部位油气供给条件相对较差.

综合而言, 油源断裂输导油气优势路径的控制因素主要包括油源断裂活动性、油源断裂内部岩性和油源断裂断面油气势能.

2 油源断裂输导油气优势路径预测方法

通过分析油源断裂输导油气优势路径的控制因素, 结合相关控制因素分别开展油源断裂输导油气优势路径的预测方法研究.

2.1 油源断裂活动性

油源断裂活动性对油源断裂输导油气优势路径的控制作用主要体现在油源断裂在油气成藏期的活动强度影响油气运移动力强弱. 而要确定油源断裂在油气成藏期的活动强度, 首先需要根据研究区内地质历史时期的油气生排烃量确定出主要油气成藏期; 然后利用三维地震资料选取垂直于油源断裂的不同测线地震剖面, 从中分别读取油源断裂在油气成藏期沉积地层顶底界面处的断距值; 通过将底界面断距值与顶界面断距值相减得到油源断裂在油气成藏期的断距变化值, 再根据地质年代表确定出油气成藏期持续时间; 通过将油源断裂在油气成藏期的断距变化值除以油气成藏期持续时间, 即可得到油源断裂在油气成藏期的平均活动速率, 从而反映油源断裂在油气成藏期的活动强度(图 1).

根据油源断裂在油气成藏期的活动强度可以区分油源断裂处于活动速率相对较大的活动期, 还是活动速率相对较小的静止期. 根据前人研究^[12-14], 油源断裂活动速率中通常存在 10~25 m/Ma 的临界值范围, 根据这一范围可以将油源断裂所处的油气作用阶段分为封闭型、输导-封闭型和输导型(图 1). 当油源断裂活动速率值小于 10 m/Ma 时, 油源断裂活动性较弱而无法提供有效的油气运移动力, 但有利于断裂稳定从而保持油气封闭, 属于封闭型油气作用阶段; 当油源断裂活动速率值大于 25 m/Ma 时, 油源断裂活动性较强并产生“地震泵”效应, 可以提供充足的油气运移动力, 但断裂失稳无法有效封闭油气, 属于输导型油气作用阶段; 当油源断裂活动速率值处于 10~25 m/Ma 范围内时, 油源断裂既能保证油气运移动力, 又能有效封闭油气, 属于输导-封闭型油气作用阶段. 同理, 根据油源断裂不同部位在油气成藏期的平均活动速率值, 结合输导-封闭型油气作用阶段油源断裂活动速率范围, 选取位于该范围内的油源断裂区段即为油源断裂活动性优势路径.

2.2 油源断裂内部岩性

油源断裂内部岩性对油源断裂输导油气优势路径的控制作用主要表现为, 油源断裂内部泥质含量的高低影响油气运移阻力的大小. 而要确定油源断裂内部泥质含量, 首先需要根据断裂形态展布识别油源断裂边界, 可以通过三维地震资料对不同测线不同层位上的断裂两盘分别取点记录三维坐标; 再汇总所有坐标点分别合成油源断裂两盘埋深面, 通过将断裂附近已

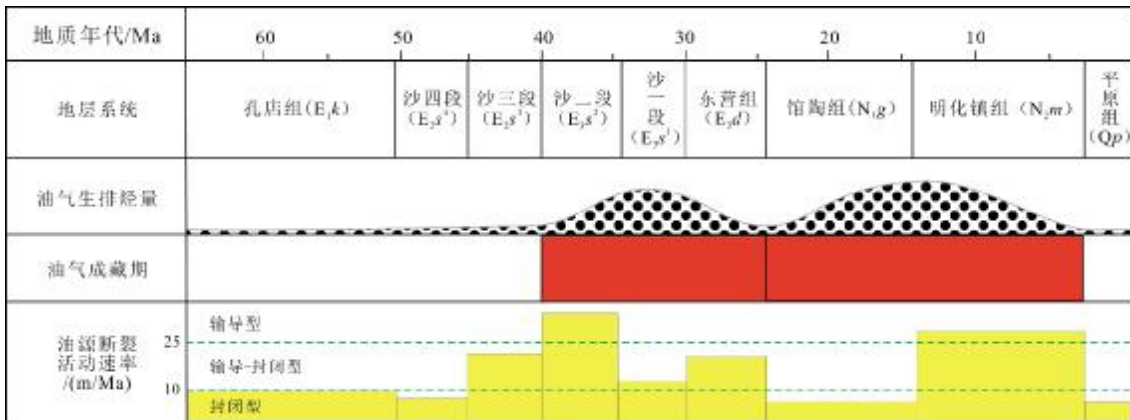


图 1 油源断裂活动性优势路径预测方法示意图

Fig. 1 Sketch of advantageous pathway prediction by activity of oil-source fault

钻井位叠合于其上,便可以测算出不同井位处断裂两盘埋深值,从而确定断裂边界,进而分析油源断裂内部泥质含量(图2)。

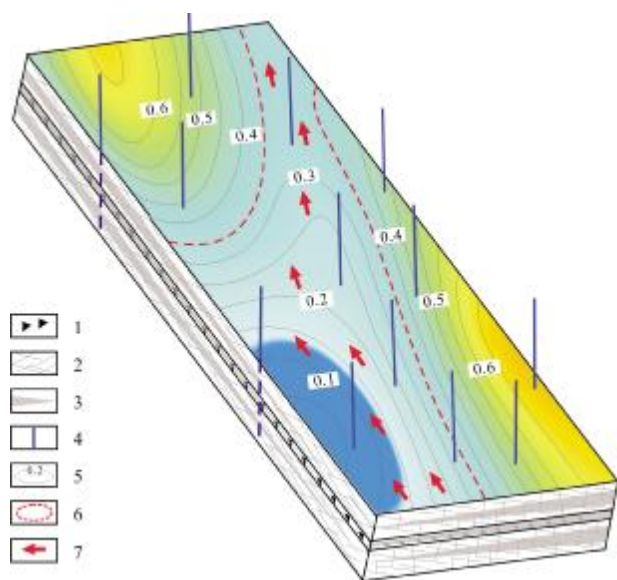


图2 油源断裂内部岩性优势路径预测方法示意图

Fig. 2 Sketch of advantageous pathway prediction by internal lithology of oil-source fault

1—断层核(fault core); 2—破碎带(fracture zone); 3—断层内部泥质充填(mud filling inside fault); 4—已钻井位(drilled well); 5—有效断层泥比率(ESGR, effective shale gouge ratio); 6—内部岩性优势路径(advantageous pathway of internal lithology); 7—油气运移方向(hydrocarbon migration direction)

由于实际钻井过程中通常考虑安全因素而避开断裂,所以油源断裂内部泥质含量往往无法直接通过测井、录井或岩心来获取,而需要利用油源断裂断穿层位中的地层泥质含量来间接获取。通过总结前人研究^[15-16]发现,通常计算地层泥质含量的主要方法有自然伽马测井法、自然电位测井法、电阻率测井法、补偿中子-密度法。考虑到不同研究区勘探程度不同,测井资料缺失等情况,可以选择其中应用最为广泛、计算最为可靠的自然伽马测井法(式1、2)和自然电位测井法(式3、4)相结合的方法进行地层泥质含量的计算。

$$V_{sh-GR} = \frac{2^{G \cdot I_{GR}} - 1}{2^G - 1} \quad (1)$$

$$I_{GR} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (2)$$

式中: V_{sh-GR} 为利用自然伽马测井法计算出的地层泥质含量; I_{GR} 为自然伽马均一化测井值(无量纲); GR_{min}

为纯砂岩的自然伽马测井值(API); GR_{max} 为纯泥岩的自然伽马测井值(API); GR 为目的层段的自然伽马测井值(API); G 为 Hilchie 指数,针对不同年代地层取不同经验值(通常古近系、新近系地层取 3.7,老地层取 2.0)^[15-16]。

$$V_{sh-SP} = \frac{2^{G \cdot \Delta S_P} - 1}{2^G - 1} \quad (3)$$

$$\Delta S_P = (S_P - S_{BL} + S_{SP}) / S_{SP} \quad (4)$$

式中: V_{sh-SP} 为利用自然电位测井法计算出的地层泥质含量; ΔS_P 为自然电位均一化测井值(无量纲); S_P 为目的层段的自然电位测井值(mV); S_{BL} 为目的层段的自然电位最大测井值(mV); S_{SP} 为纯砂岩与纯泥岩基线之间的自然电位异常幅度差值(mV)。

在计算出油源断裂断穿层位中的地层泥质含量之后,可以采用有效断层泥比率(effective shale gouge ratio, ESGR)的方法^[17-19]对油源断裂内部泥质含量进行求取。该方法是根据断层岩主要来源于断层两盘地层岩石切磨融合而成的原理,通过单井分析油源断裂断距、断裂两盘地层厚度及地层泥质含量,计算单井所对应的油源断裂不同部位的内部泥质含量(图2)。

$$ESGR = \frac{\sum V_{shi} T_i}{D} \quad (5)$$

式中: ESGR 为有效断层泥比率,即油源断裂内部泥质含量; V_{shi} 为层位 i 的地层泥质含量; T_i 为层位 i 的地层厚度(m); D 为油源断裂垂直断距(m)。

油源断裂断层核和破碎带作为输导油气通道,油气在其中运移时所受到阻力主要来源于毛细管压力,而毛细管压力主要受油源断裂内部泥质含量的影响:泥质含量越高,孔渗性越差,毛细管压力越大,油气运移阻力越大;泥质含量越低则油气运移阻力越小。根据前人研究,当断裂带内泥质含量大于 0.3 时,断裂主要起到封闭油气作用,并且随泥质含量越高其封闭性越好^[17-19]。因此可以设定油源断裂内部泥质含量的输导-封闭门限值为 0.3。当油源断裂内部泥质含量小于这一门限时,油源断裂内部连通,有利于油气在该范围内运移(图2);而当泥质含量大于这一值时则无法有效输导油气。

通过计算油源断裂不同部位内部泥质含量,并汇总获取整个断裂内部泥质含量的分布情况,根据油源断裂内部泥质含量的输导-封闭门限值划定输导区和

封闭区范围,其中油源断裂内部泥质含量低于输导-封闭门限值的油源断裂输导区范围即为油源断裂内部岩性优势路径。

2.3 油源断裂断面油气势能

油源断裂断面油气势能对油源断裂输导油气优势路径的控制作用主要体现在油源断裂断面油气势能场类型影响油气供给条件的好坏,而要确定油源断裂断面油气势能场类型,首先需要计算油源断裂断面不同部位油气势能值进而才能分析其分布特征。

首先,利用三维地震资料选取垂直于油源断裂的不同测线地震剖面,从中分别读取断裂上盘与主要地震反射界面相交点处的平面坐标和地震双程反射时间,并通过时深转换公式换算后得到其对应埋深值,从而确定现今油源断裂断面埋深形态。然而,油源断裂输导油气主要在油气成藏期,因此还需要根据地层骨架厚度不变原理运用地层回剥技术^[20-21]将油源断裂断面埋深恢复至主要油气成藏期,然后再利用式(6)对油气成藏期油源断裂断面油气势能进行计算(不同埋深处油气密度值和油气成藏期油源断裂断面流体压力可分别利用式7、8求得)。

$$\Phi = gZ + \frac{P}{\rho_o} \quad (6)$$

$$\rho_o = 1 - \frac{Z}{16000} \quad (7)$$

$$P = \rho_w gZ \quad (8)$$

式中: Φ 为油气成藏期油源断裂断面油气势能(kJ); Z 为油气成藏期油源断裂断面埋深(m); P 为油气成藏期油源断裂断面流体压力(MPa); ρ_o 为不同埋深处油气密度(g/cm^3); ρ_w 为地层水密度(g/cm^3); g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

通过以上方法确定出油气成藏期油源断裂断面油气势能分布情况之后,便可以进一步确定油源断裂断面油气势能场类型。根据油气运移所遵循的流体势定律,油气均是由高势区向低势区运移汇聚,其运移方向往往是沿着流体势分布等值线的法线方向。因此,根据流体势分布等值线法线方向的分布组合特征,可以将油源断裂断面油气势能场分为3种类型(图3):凸型脊势能场、凹型槽势能场和平型板势能场。其中凸型脊势能场有利于油气汇聚输导,凹型槽势能场则容易导致油气分流散失,平板型势能场对油气无明显控

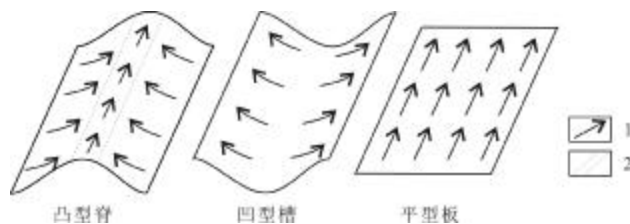


图3 油源断裂断面油气势能场分类示意图

Fig. 3 Classification sketch of hydrocarbon potential field on oil-source fault plane

1—流体势法线方向(normal direction of fluid potential); 2—凸型脊轴线(convex ridge axis)

制作用。由于凸型脊势能场中油气汇聚之后通常沿凸型脊轴线运移,因此凸型脊势能场中的凸型脊轴线为油气运移优势通道。

通过计算油气成藏期油源断裂断面不同部位的油气势能值,汇总编制油源断裂断面油气势能分布等值线图。根据油气势能分布等值线法线方向的分布组合特征,从中识别出油源断裂断面凸型脊油气势能场,并确定出其中油气汇聚运移的凸型脊轴线,即为油源断裂断面油气势能优势路径。

3 应用实例

本研究选取渤海湾盆地冀中拗陷廊固凹陷大柳泉地区F3断裂为例,该断裂属于旧州大断裂的分支断裂之一,对大柳泉地区油气成藏及分布具有明显的控制作用。研究区自下而上依次发育的地层有古近系孔店组(E_{1-2k})、沙河街组(E_{2-3s})、东营组(E_3d),新近系馆陶组(N_1g)、明化镇组(N_2m)以及第四系平原组(Qp)。其中有效烃源岩层主要发育在沙河街组四段(E_{2s}^4),主要的油气储集层为沙河街组三段中亚段($E_{2s}^{3中}$),并且在沙三段上亚段发育一套巨厚的盖层($E_{2s}^{3上}$),为典型的“下生上储”式油气成藏模式。F3断裂位于大柳泉地区中部(图4),自下而上断穿了沙河街组至馆陶组沉积地层,沟通了有效烃源岩层与主要油气储集层,并且在两个油气成藏期(沙二段—馆陶组沉积时期和馆陶组—明化镇组沉积时期)均呈现活动开启的特征。因此可以将F3断裂厘定为油源断裂。

根据油源断裂输导油气优势路径主要受油气运移动力、油气运移阻力和油气供给条件等3方面控制,分别对F3油源断裂活动性优势路径、内部岩性优势路

径和断面油气势能优势路径展开研究.

3.1 F3 油源断裂活动性优势路径预测

F3 油源断裂活动性优势路径主要控制油气运移动力的强弱. 根据研究区的两个油气成藏期分别计算沙二段—馆陶组沉积时期和馆陶组—明化镇组沉积时期 F3 断裂的平均活动速率. 通过在三维地震资料中选取横切 F3 断裂的不同测线剖面, 从中分别读取沙二段底界面和馆陶组底界面与 F3 断裂上下盘的交点埋深值, 分别计算出 F3 断裂在沙二段底界面和馆陶

组底界面的断距值, 然后将二者差值除以沙二段—馆陶组沉积时间即可求得 F3 断裂在沙二段—馆陶组油气成藏期的平均活动速率;同理,可求得 F3 断裂在馆陶组—明化镇组油气成藏期的平均活动速率. 通过汇总 F3 断裂不同部位在两个油气成藏期的平均活动速率值(图 5),可以发现 F3 断裂在馆陶组—明化镇组油气成藏期平均活动速率很小,显示断裂处于静止期;而 F3 断裂在沙二段—馆陶组油气成藏期的平均活动速率较大,显示断裂处于活动期. 再根据前人

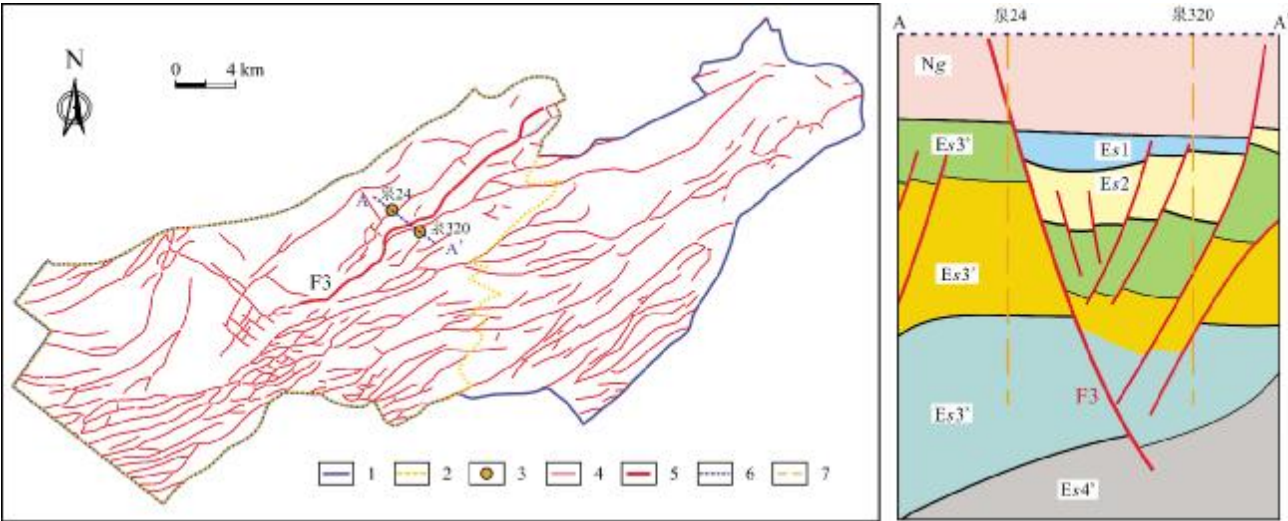


图 4 廊固凹陷大柳泉地区 F3 油源断裂发育分布平剖面图

Fig. 4 Distribution of F3 fault on plane and section in Daliuquan area of Langgu Sag

1—凹陷边界(sag boundary); 2—研究区范围(study area); 3—井位(well position); 4—断裂(fault); 5— F3 油源断裂(F3 oil-source fault); 6—连井剖面(well connection section); 7—钻井剖面(drilling section)



图 5 F3 油源断裂活动性优势路径预测及其分布图

Fig. 5 Prediction for the distribution of advantageous pathways by activity of F3 fault

1—沙二段—馆陶组沉积时期(sedimentary period of $E_{s2}-N_{ig}$); 2—馆陶组—明化镇组沉积时期(sedimentary period of $N_{ig}-N_{2m}$); 3—输导—封闭油气活动速率临界值(conduction-sealing critical value of activity rate for hydrocarbon); 4—封闭油气有利区段(favorable section for hydrocarbon sealing); 5—输导—封闭油气有利区段(favorable section for hydrocarbon conduction-sealing); 6—输导油气有利区段(favorable section for hydrocarbon conduction)

分析所得出的油源断裂输导-封闭型油气作用阶段的活动速率范围值为 10~25 m/Ma, 确定 F3 断裂位于该范围内的区段, 即包括主测线 1424—1520、1640—1848 和 2264—2328 之间的 3 处 F3 断裂部位, 既能保证油气运移动力, 又能有效封闭油气, 为油源断裂活动性优势路径, 即 F3 油源断裂发育 3 个活动性优势路径(图 5)。

3.2 F3 油源断裂内部岩性优势路径预测

F3 油源断裂内部岩性优势路径主要控制油气运移阻力的大小。通过三维地震资料中选取的不同测线剖面, 分别汇总其中 F3 断裂的上下盘与主要地震反射界面相交点的三维坐标, 进而整合出 F3 断裂的发育形态及埋深边界, 再将 F3 断裂附近已钻井位投影于其上, 即可确定不同井位处 F3 断裂内部岩性边界。通过综合利用自然伽马测井法(式 1)和自然电位测井法(式 3), 计算出 F3 断裂断穿层位中的地层泥质含量, 再利用有效断层泥比率法(式 5)计算出 F3 断裂内部泥质含量, 最终即可确定 F3 油源断裂不同部位的内部泥质含量分布情况(图 6)。根据前人研究设定油源断裂内部泥质含量的输导-封闭门限值为 0.3, 从而划分 F3 断裂内部岩性的输导油气范围和封闭油气范围。其中 F3 断裂内部泥质含量大于 0.3 的范围内油气运移阻力较大, 为封闭油气区; 而断裂内部泥质含量小于 0.3 的范围内油气运移阻力较小, 为输导油气区。因此存在 2 个内部泥质含量小于 0.3 的输导油气区, 即 F3 油源断裂发育 2 个内部岩性优势路径(图 6)。

3.3 F3 油源断裂断面油气势能优势路径预测

F3 油源断裂断面油气势能优势路径主要控制油气供给条件的好坏。通过利用三维地震资料读取 F3 油源断裂上盘顶面与主要地震反射界面相交点的三维坐标, 进而汇总之后合成现今 F3 断裂断面埋深形态, 再利用地层回剥技术^[20-21]将断面埋深恢复至主要油气成藏期——沙二段—馆陶组沉积时期, 最后利用式(6)计算油气成藏期 F3 油源断裂断面油气势能。结合油气成藏期 F3 断裂断面油气势能分布情况, 可以从中确定出 6 个凸型脊势能场, 并在凸型脊势能场中最终识别出 6 个凸型脊轴线, 油气供给条件好, 有利于油气汇聚输导, 即 F3 油源断裂发育 6 个断面油气势能优势路径(图 7)。

通过将 F3 油源断裂的 3 种输导油气优势路径相

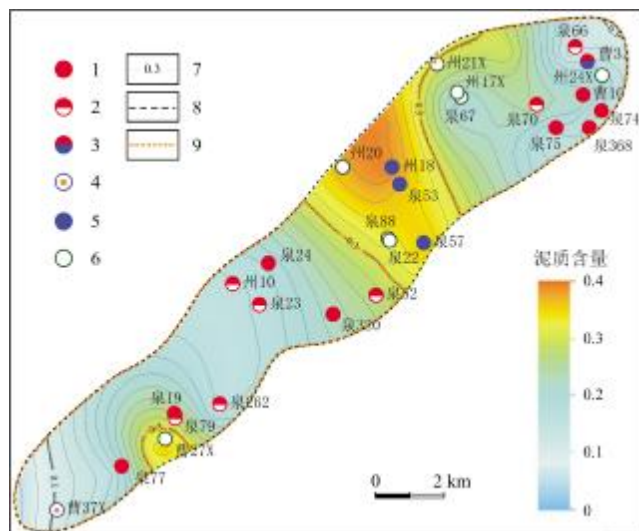


图 6 F3 油源断裂内部岩性优势路径预测及其分布图

Fig. 6 Prediction for the distribution of advantageous pathways by internal lithology of F3 fault

1—工业油层 (commercial oil reservoir); 2—低产油层 (low productivity oil reservoir); 3—油水同层 (oil-water layer); 4—含气水层 (gas-bearing water layer); 5—水层 (water layer); 6—无油气层 (hydrocarbon-free layer); 7—泥质含量等值线 (isoline of shale gouge ratio); 8—断裂边界 (fault boundary); 9—内部岩性优势路径 (advantageous pathway of internal lithology)

叠合(图 8), 并结合 F3 断裂附近已钻井油气显示情况, 可以看出, F3 断裂的 3 个活动性优势路径分别发育在北部、中部和南部, 断裂的 2 个内部岩性优势路径分别发育在北部和南部, 而 F3 断裂的 6 个断面油气势能优势路径发育较为分散。F3 油源断裂的 3 种输导油气优势路径重合部位已钻井的油气显示情况最好, 试油结果均显示为工业油层或低产油层; 而 F3 断裂的 3 种输导油气优势路径均不发育的部位已钻井的油气显示情况最差, 试油结果均显示为水层或无油气层。

3.4 F3 油源断裂输导油气优势路径综合评价参数

为了更进一步分析 F3 油源断裂附近油气分布与 3 种输导油气优势路径的相互关系, 定量划分油气成藏有利范围, 对 F3 断裂附近已钻井进行加权赋值从而计算 F3 断裂输导油气优势路径综合评价参数。将 F3 断裂附近位于活动性优势路径之上的已钻井赋值 1, 反之则赋值 0; 位于内部岩性优势路径之上的已钻井赋值 1, 反之则赋值 0; 根据已钻井距断面油气势能优势路径距离, 距离最近的已钻井赋值 0, 距离最近的已钻井赋值 1, 其余井同理进行反向均一化赋值。最后

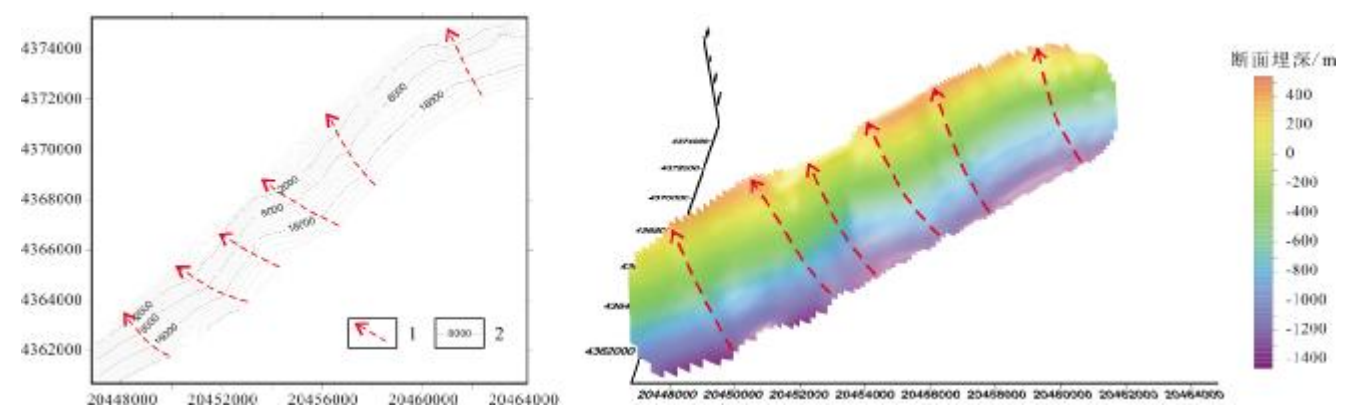


图 7 F3 油源断裂断面油气势能优势路径预测及其分布图

Fig. 7 Prediction for the distribution of advantageous pathways by hydrocarbon potential field on F3 fault plane
1—断面油气势能优势路径 (advantageous pathway of hydrocarbon potential field on fault plane); 2—断面油气势能等值线 (isoline of hydrocarbon potential field on fault plane)

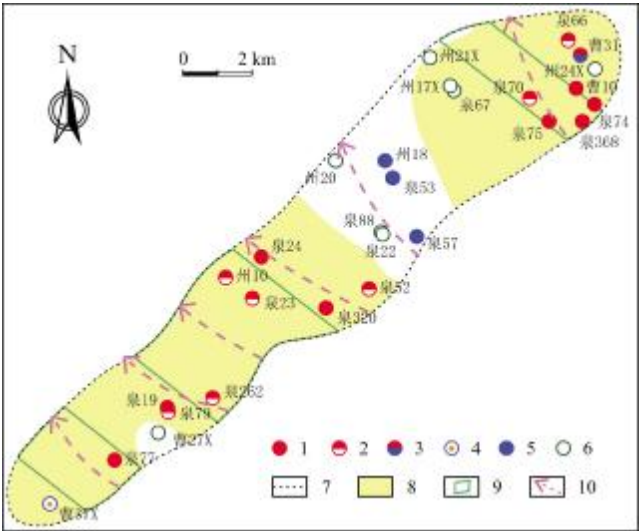


图 8 F3 油源断裂输导油气优势路径汇总及油气分布图

Fig. 8 Combination of advantageous pathways of F3 oil-source fault and distribution of hydrocarbon

1—工业油层 (commercial oil reservoir); 2—低产油层 (low productivity oil reservoir); 3—油水同层 (oil-water layer); 4—含气水层 (gas-bearing water layer); 5—水层 (water layer); 6—无油气层 (hydrocarbon-free layer); 7—断裂边界 (fault boundary); 8—内部岩性优势路径 (advantageous pathway of internal lithology); 9—活动性优势路径 (advantageous pathway of activity); 10—断面油气势能优势路径 (advantageous pathway of hydrocarbon potential field on fault plane)

将三方面的赋值相加得到不同井位处的 F3 油源断裂输导油气优势路径综合参数,将其由大到小排序 (图 9),再结合其对应的试油结果以及统计所得的试油初始日产能,可以发现: F3 断裂输导油气优势路径综合评价参数越高,钻井含油气性越好,试油产能也普遍较

高;反之综合评价参数越低,钻井含油气性越差,试油产能也基本为 0. 最终结合钻井含油气性可以将 F3 油源断裂输导油气优势路径综合评价参数的临界值厘定为 1.65,即 F3 断裂输导油气优势路径综合评价参数大于 1.65 的范围为油气成藏有利范围. 该综合评价参数的临界值 1.65 仅适用于本研究区,但上述方法对其他地区其他油源断裂同样适用.

除此之外,不同研究区还需结合相应具体情况进行具体分析,但油源断裂输导油气优势路径预测及油气成藏有利范围划分可为油气勘探提供指导,也可对开发井部署提供科学参考.

4 结论

1)油源断裂为连接有效源岩层与储集层且在油气成藏期活动开启的断裂,通常发育 4 种类型. 油源断裂内部发育断层核和破碎带的二元结构,且存在活动期与静止期交替的幕式输导规律. 油源断裂输导油气优势路径的控制因素主要包括油源断裂活动性、油源断裂内部岩性和油源断裂断面油气势能.

2)油源断裂活动性优势路径为油气成藏期断裂活动速率值处于 10~25 m/Ma 范围内的油源断裂区段,油源断裂内部岩性优势路径为断裂内部泥质含量低于 0.3 的油源断裂范围,油源断裂断面油气势能优势路径为油气成藏期断面油气凸型脊势能场中的轴线部位.

3)渤海湾盆地冀中拗陷廊固凹陷大柳泉地区 F3 油源断裂共发育 3 个活动性优势路径、2 个内部岩性

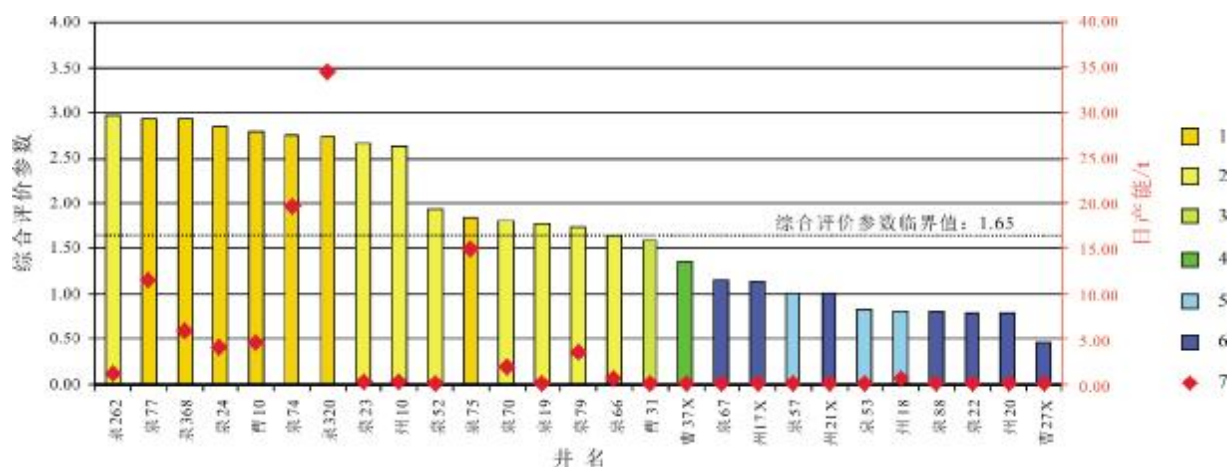


图9 F3油源断裂输导油气优势路径综合评价参数与试油初始日产能关系图

Fig. 9 Relationship between comprehensive evaluation parameter of advantageous pathways of F3 fault and initial daily capacity of well testing

1—工业油层(commercial oil reservoir); 2—低产油层(low productivity oil reservoir); 3—油水同层(oil-water layer); 4—含气水层(gas-bearing water layer); 5—水层(water layer); 6—无油气层(hydrocarbon-free layer); 7—试油初始日产能(initial daily production capacity of well testing)

优势路径和6个断面油气势能优势路径, F3断裂输导油气优势路径综合评价参数大于1.65的范围为F3断裂附近油气成藏有利范围, 与研究区目前已探明油气分布相吻合, 表明该方法用于油源断裂输导油气优势路径预测是可行的, 有助于寻找油气勘探有利目标。

参考文献(References):

- [1] 蒋有录, 刘培, 宋国奇, 等. 渤海湾盆地新生代晚期断层活动与新近系油气富集关系[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 525-533.
Jiang Y L, Liu P, Song G Q, et al. Late Cenozoic faulting activities and their influence upon hydrocarbon accumulations in the Neogene in Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 525-533.
- [2] 王冠民, 熊周海, 张健, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷油藏断裂特征及对成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 62-70.
Wang G M, Xiong Z H, Zhang J, et al. Characterization of fault system and its control on reservoirs in the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 62-70.
- [3] Xu G S, Ma R L, Gong D Y, et al. Features of the fault system and its relationship with migration and accumulation of hydrocarbon in Liaodong Bay[J]. Petroleum Science, 2011, 8(3): 251-263.
- [4] 吴智平, 陈伟, 薛雁, 等. 断裂带的结构特征及其对油气的输导和封堵性[J]. 地质学报, 2010, 84(4): 570-578.
Wu Z P, Chen W, Xue Y, 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.
- [5] Choi J H, Edwards P, Ko K, et al. Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach[J].

Earth-Science Reviews, 2016, 152: 70-87.

- [6] 陈伟, 吴智平, 侯峰, 等. 断裂带内部结构特征及其与油气运聚关系[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 774-780.
Chen W, Wu Z P, Hou F, et al. Internal structures of fault zones and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 774-780.
- [7] 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): 156-162.
Luo Q, Pang X Q, Jiang Z X. 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): 156-162.
- [8] 孙同文, 付广, 吕延防, 等. 南堡1号构造中浅层油气富集主控因素分析[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(7): 1042-1051.
Sun T W, Fu G, Lv Y F, et al. Main controlling factors on the hydrocarbon accumulation in the middle-shallow layer of 1st structure, Nanpu Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(7): 1042-1051.
- [9] Hooper E C D. Fluid migration along growth faults in compacting sediments[J]. Journal of Petroleum Geology, 1991, 14(S1): 161-180.
- [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——中国地质大学学报, 2005, 30(3): 328-336.
Fu X F, Fang D Q, Lv Y F, 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 Geosciences, 2005, 30(3): 328-336.
- [11] Hesthammer J, Johansen T E S, Watts L. Spatial relationships within fault damage zones in sandstone[J]. Marine and Petroleum Geology,

- 2000, 17(8): 873-893.
- [12] 庄新兵, 邹华耀, 滕长宇. 新构造运动期断裂活动对油气的控制作用——以渤中地区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(3): 452-459.
- Zhuang X B, Zou H Y, Teng C Y. Controlling of hydrocarbons by neotectonics and tectonics fault activities: A case study of Bozhong area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(3): 452-459.
- [13] 邹华耀, 周心怀, 鲍晓欢, 等. 渤海海域古近系、新近系原油富集/贫化控制因素与成藏模式[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 885-893, 899.
- Zou H Y, Zhou X H, Bao X H, et al. Controlling factors and models for hydrocarbon enrichment/depletion in Paleogene and Neogene, Bohai Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6): 885-893, 899.
- [14] 娄国泉. 高邮凹陷断裂对始新统油气成藏的控制作用[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(1): 1-5.
- Lou G Q. Control of faults on Eocene hydrocarbon accumulation in Gaoyou depression of Subei Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(1): 1-5.
- [15] 张德梅, 王桂萍, 娄宪刚, 等. 测井曲线组合法求取泥质含量探讨[J]. 测井技术, 2011, 35(4): 358-362.
- Zhang D M, Wang G P, Lou X G, et al. On calculating the shale content with log curve combining method[J]. Well Logging Technology, 2011, 35(4): 358-362.
- [16] 刘之的, 杨双定, 刘有霞, 等. 南梁油田长 4+5 储层泥质含量计算方法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2015, 30(2): 25-29.
- Liu Z D, Yang S D, Liu Y X, et al. Calculation method of shale content of Chang 4+5 reservoir in Nanliang Oilfield[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2015, 30(2): 25-29.
- [17] Yielding G, Freeman B, Needham D T. Quantitative fault seal prediction[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 897-917.
- [18] 杨智, 何生, 王锦喜, 等. 断层泥比率(SGR)及其在断层侧向封闭性评价中的应用[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(3): 347-351.
- Yang Z, He S, Wang J X, et al. Shale gouge ratio and its application in the fault seal estimation across the faulted zone[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(3): 347-351.
- [19] 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.
- Wang C, Fu G, Dong Y J, et al. SGR algorithm-based improvement of fault lateral sealing evaluation method and its application[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(7): 1641-1650.
- [20] 武凤良. 应用测井、地震资料进行地层压实校正的方法[J]. 石油地球物理勘探, 1989, 24(1): 68-79.
- Wu F L. The method for making stratigraphic compaction correction with the use of logging and seismic data [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1989, 24(1): 68-79.
- [21] 张廷山, 张志诚, 伍坤宇. 滇黔北地区地层压实恢复及沉积速率反演[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(5): 99-106.
- Zhang T S, Zhang Z C, Wu K Y. Restoration of formation compaction and inversion of deposition rate in Dianqianbei exploration area [J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(5): 99-106.