

渤海湾盆地廊固凹陷大柳泉地区 油源断裂垂向输导能力定量评价

刘峻桥^{1,2}, 王伟^{1,2}, 吕延防³, 付广³

(1. 广东石油化工学院石油工程学院, 广东茂名 525000; 2. 广东省非常规能源工程技术研究中心
广东石油化工学院, 广东茂名 525000; 3. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163318)

摘要:不同断裂或同一断裂不同部位输导油气能力存在明显的差异。为了定量评价渤海湾盆地廊固凹陷大柳泉地区断裂垂向输导油气能力及其对油气分布的控制作用,在油源断裂厘定的基础上,综合考虑运移动力、油源供给及断裂运动学和几何学特征等多种因素对断裂输导能力的影响,总结出评价该区断裂垂向输导油气能力的4个地质参数,分别为断裂活动强度、异常压力、“中电站”规模和断裂凸面脊规模,这些参数与实际地质储量之间均具有良好的正相关关系,并以此作为定量评价指标建立断裂垂向输导能力量化公式。利用该公式对大柳泉地区断裂垂向输导油气能力进行评价,结果显示,断裂垂向输导油气能力定量评价结果与实际地质情况吻合度较高,表明该方法具有较好的适用性。

关键词:断裂; 输导能力; 油气储量; 定量评价; 廊固凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.12

文献标识码: A

Quantitative evaluation of vertical fault transport in Daliuquan area of Langgu sag, Bohai Bay Basin

LIU Junqiao^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, LÜ Yanfang³, FU Guang³

(1. College of Petroleum Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming, Guangdong 525000, China;
2. Guangdong Research Center for Unconventional Energy Engineering Technology, Guangdong University of Petrochemical Technology,
Maoming, Guangdong 525000, China; 3. College of Earth Science, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: The ability to transport oil and gas shows differences for different faults or different parts of the same fault. The vertical transportation of oil and gas through faults was evaluated quantitatively and the controls on oil and gas distribution in the Daliuquan area of the Langgu Sag of the Bohai Bay Basin were discussed. Various factors were considered including migration dynamics, hydrocarbon source, and the kinematics and geometric characteristics of faults. Based on confirming source faults, four geological parameters were summarized, including fault activity intensity, abnormal pressure, “transfer station” scale and fault convex ridge scale, all of which have a positive correlation with reserve abundance and can be used to fit a quantitative characterization formula of fault vertical transporting ability as quantitative indexes. Using this formula to evaluate the vertical fault transport ability of the Daliuquan area, this method indicates that the quantitative evaluation results are consistent with the actual geological conditions, which shows that the quantitative characterization method has a good applicability.

Key words: fault; transporting ability; reserve abundance; quantitative evaluation; Langgu Sag; Bohai Bay Basin

随着油气勘探的不断深入,断裂作为油气垂向运移的通道已得到石油地质工作者的广泛认可^[1-3]。断裂是多期构造运动和地质流体作用形成的复杂三维地质体^[4-5],大量研究已证实,断裂具有断层核和破碎带的二元结构^[6-8],其复杂的结构特征导致其不仅可以作为油气运移的输导通

道^[9-10],还可以为油气聚集提供遮挡条件^[11-12]。并非所有的断裂都能作为油气垂向运移的输导通道,只有沟通源岩和储层并且在油气成藏关键时期活动的断裂才可以作为油气运移的输导通道,即油源断裂^[13]。不同断裂或同一断裂不同部位的输导能力存在明显差异。

收稿日期: 2019-01-03; 修订日期: 2019-07-03。

作者简介: 刘峻桥(1989—),男,博士,讲师,从事断层生长机制及控藏机理方面的研究。E-mail: smartqiao_2013@163.com。

基金项目: 广东石油化工学院2018年科研基金项目人才引进类(2018rc06)和广东省非常规能源工程技术研究中心开放基金(GF2018A007)资助。

国内外学者认为断裂输导能力的影响因素主要包括断裂带内部结构^[6,14]、断裂输导油气运移动力^[9,15]和断裂输导油气运移时期^[16]等方面,并从早期的定性分析逐步向定量研究的思路转变^[17-20],但关于断裂输导能力定量评价的研究仍相对薄弱。本文在前人研究的基础上,针对不同断裂及同一断裂不同部位输导能力的差异性,以三维地震为基础,结合影响断裂输导能力的多重因素和油田实际生产资料,建立断裂垂向导油气能力的定量评价方法,以期丰富断裂控藏理论,并为油田勘探提供理论依据。

1 地质背景

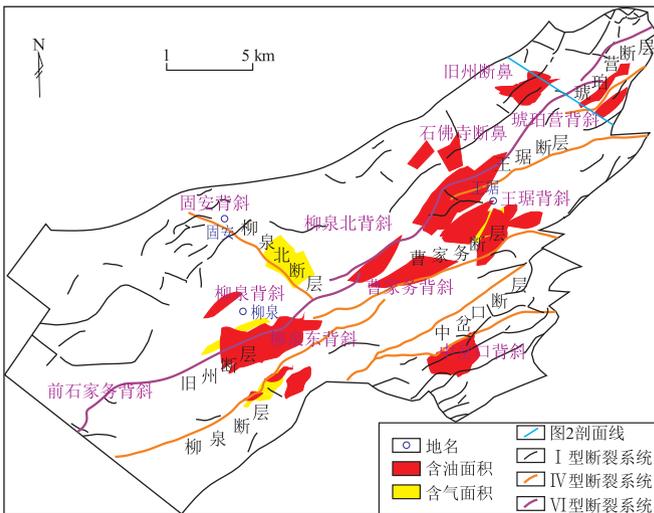
廊固凹陷位于渤海湾盆地冀中坳陷北部,大柳泉构造带是廊固凹陷西部富烃洼槽内重要的油气聚集带,是南部牛驼镇凸起强烈抬升作用及北部桐南洼槽持续下降的区域构造运动影响下形成的大型反转鼻状构造带,勘探面积约为 550 km²。该区油气主要富集在石家务、柳泉、中岔口、王琚、曹家务、琥珀营、旧州、石佛寺和固安等 11 个局部背斜和断鼻构造内(图 1)。油源对比结果表明,油气主要来自古近系沙河街组沙四上亚段和沙三下亚段源岩^[21],沙三中亚段、沙三上亚段、沙二段和沙一段地层是大柳泉地区主要含油气层系,属于典型的下生上储式生储盖组合。大柳泉地区构造运动强烈,断裂以东北向为主,目前发现的油气藏主要围绕断裂分布。但不同断裂或同一断裂不同部位富油程度存在明显差异,有发现高产油气藏的王琚背斜和柳泉背斜,同时也有钻探失利的曹家务东和中

岔口西地区,油气分布受断层控制明显(图 1a)。这种复杂构造背景下油气沿断裂分布关系,迫切需从断裂输导能力的角度对其进行合理的解释。

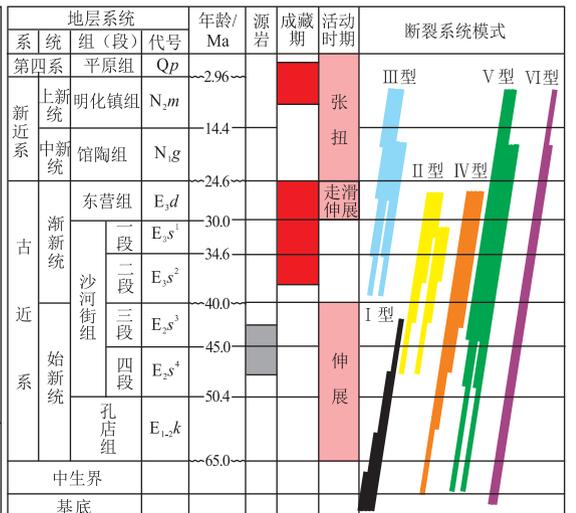
2 油源断裂厘定

廊固凹陷断裂经历了孔店组—沙二段沉积时期伸展变形、沙一段—东营组沉积时期的走滑伸展变形和新近纪以来的张扭变形 3 个阶段。这种断层三期三性质的变形特征,决定了廊固凹陷发育 6 种类型断裂系统^[13,20](图 1b):①仅在伸展变形时期活动的早期伸展断裂系统(I型);②仅在走滑伸展变形时期活动的中期走滑伸展断裂系统(II型);③仅在新近系张扭变形时期活动的晚期张扭断裂系统(III型);④伸展变形时期和走滑伸展变形时期均活动的早期伸展—中期走滑断裂系统(IV型);⑤走滑伸展变形时期和张扭变形时期均活动的中期走滑伸展—晚期张扭断裂系统(V型);⑥伸展变形时期、走滑伸展变形时期和张扭变形时期均活动的早期伸展—中期走滑—晚期张扭断裂系统(VI型)。

大柳泉地区沙三段主要发育早期伸展断裂系统(I型)和早期伸展—中期走滑伸展断裂系统(IV型)和早期伸展—中期走滑伸展—晚期张扭断裂系统(VI型)(图 1a,图 2)。前人研究表明,沙二段沉积早期至馆陶组沉积中期是大柳泉地区油气成藏关键时期^[21],IV型断裂系统和VI型断裂系统在此时期活动,部分沟通了沙四上亚段或沙三下亚段烃源岩和上覆储层的IV型和VI型断裂,可以作为大柳泉地区油气垂向导移的油源断层(图 2)。



a. 大柳泉地区构造特征及油气平面分布



b. 断裂系统划分模式

图 1 渤海湾盆地廊固凹陷大柳泉地区断裂系统分布特征

Fig.1 Characteristics of fault system distribution in Daluquan area, Langgu Sag, Bohai Bay Basin

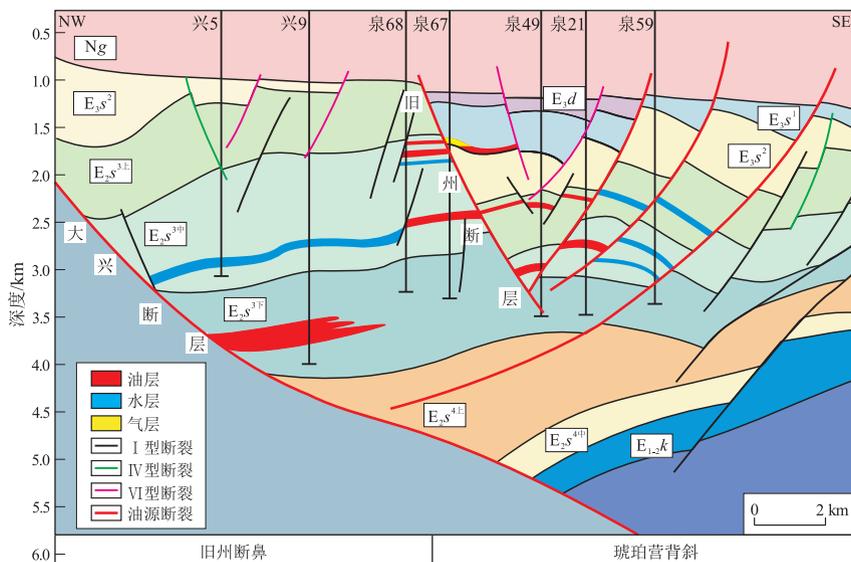


图 2 渤海湾盆地廊固凹陷大柳泉地区典型剖面
剖面位置见图 1。

Fig.2 Typical profile of Daliuquan area, Langgu Sag, Bohai Bay Basin

3 断裂垂向输导能力影响因素

断裂垂向输导油气能力受油气来源、运移动力、断裂活动时期以及断裂几何学和运动学特征等多方面因素控制^[22]。因此,笔者从这些方面出发对断裂垂向输导油气能力的影响因素加以分析,并结合油源断裂和实际油气分布关系,总结出大柳泉地区断裂垂向输导能力影响因素的主要评价参数。

3.1 断裂活动强度

断裂活动强度作为断裂输导能力评价的重要参数在渤海湾盆地大部分地区已得到广泛应用^[18,23-25]。研究表明,断裂带的宽度与断裂断距呈正相关关系^[26],因此,油气沿断裂带运移过程中,若断裂断距越大,其对应发育的断裂带宽度越大,越有利于油气沿断裂带运移。此外,断裂垂向输导油气通常发生在源岩大量排烃期之后油气大规模运移期,构造应力是油气沿断裂运移的重要驱动力^[27-28],同时也是断裂形成的直接原因,断裂的形成是多次地震事件累加的结果^[29],若成藏期断裂活动强度大,表明其受到的构造应力越大或经历的构造事件越多,为油气运移提供的动力也就越大,有利于断裂垂向输导油气。综上,可以用成藏期断裂活动速率这一参数,表征运移动力、断裂活动时期、断裂带内部结构和断裂运动学特征对断裂垂向输导能力的影响,只有断裂活动强度处于合适的范围内才有利于油气运移。

大柳泉地区沙三段储层上覆盖层沉积厚度大,能够为油气聚集提供良好的封盖条件。应用最大

断距相减法^[30],定量恢复大柳泉地区油源断裂走向各个部位成藏期断裂活动速率,结果表明,油源断裂成藏期活动速率一般为 0~40 m/Ma 之间,断裂活动速率高值段,断裂活动强烈,断裂带宽度和构造应力较大,油源断裂输导能力强,有利于油气在断裂活动速率高的部位聚集成藏(图 3)。以旧州断裂为例,沿该断裂走向成藏期断裂活动速率大于 10 m/Ma 的部位,断裂输导能力较强,是油气主要的聚集部位;而断裂活动速率小于 10 m/Ma 的区域,油气富集程度较低,甚至无油气富集(图 4)。

3.2 异常压力

如果烃源岩内存在异常高压,在成藏期断裂活动开启时,超压作为潜在的运移动力可以为油气沿断裂运移提供动力^[22]。当源岩层内异常压力积累到一定程度时,断裂开启形成压力释放区,烃源岩生成的油气在超压驱动下,向断裂压力释放区汇聚,超压流体释放,压力降低,断裂闭合,之后流体压力进一步积累,导致断裂再开启释放,周而复始,这就是超压驱动下断裂输导油气的“地震泵”抽吸作用^[27]。大柳泉地区沙四上亚段和沙三下亚段烃源岩层超压普遍发育,多期裂陷活动导致沉积中心的迁移,形成了石佛寺断鼻和柳泉—柳泉东背斜 2 个超压中心,由超压中心强超压带(压力系数 1.27~1.73)向四周地区逐渐变为弱超压地区(压力系数 1.06~1.27)和低—常压带(压力系数 0.96~1.06),油气主要富集在异常压力较大的地区(图 3)。

3.3 充足的油源

充足的油源是断裂垂向输导油气的物质基础。

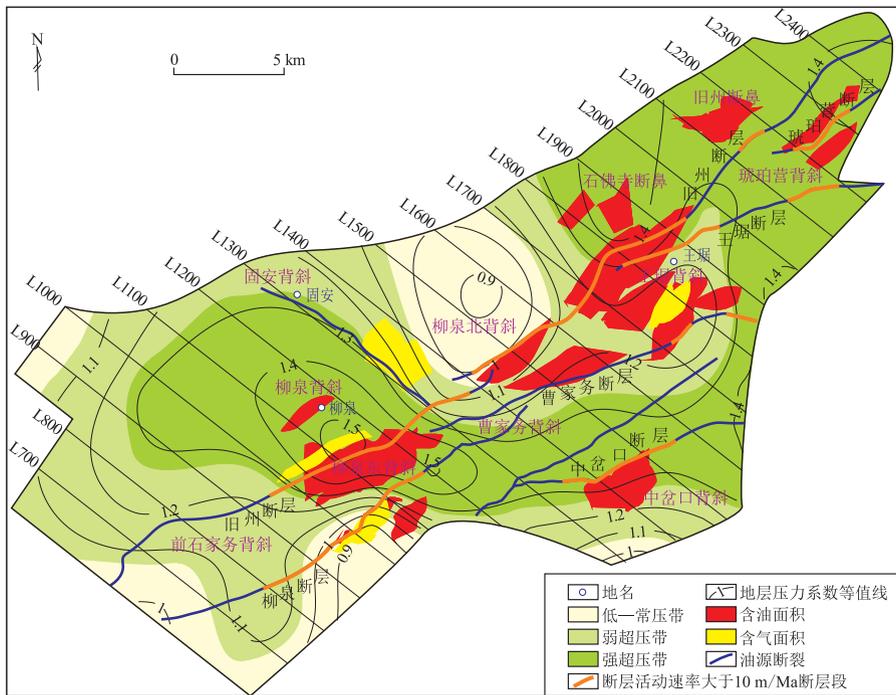


图 3 渤海湾盆地廊固凹陷大柳泉地区异常压力、断裂活动速率与油气分布关系

Fig.3 Relationship between abnormal pressure, fault activity rate and hydrocarbon distribution in Daluquan area, Langgu Sag, Bohai Bay Basin

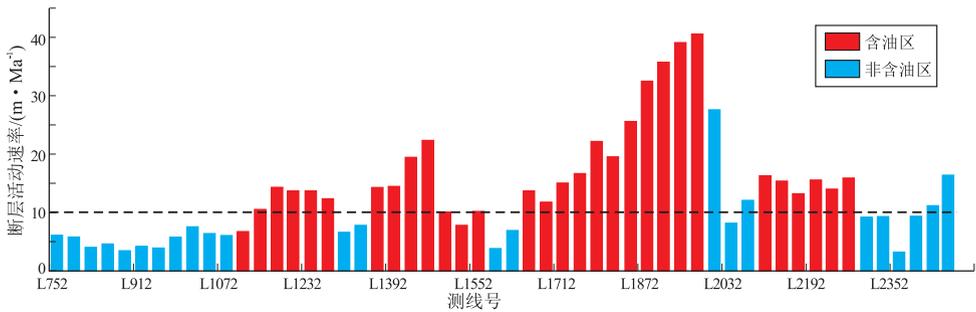


图 4 渤海湾盆地廊固凹陷大柳泉地区旧州断裂活动速率与油气聚集关系

测线位置见图 3。

Fig.4 Relationship between fault activity rate and hydrocarbon accumulation of Jiuzhou Fault in Daluquan area, Langgu Sag, Bohai Bay Basin

大柳泉鼻状构造带位于廊固凹陷富烃洼槽内,研究表明,廊固凹陷内烃源岩品质无明显差异,大规模发育的烃源岩有利于断裂垂向输导油气,造成断裂输导油气供给量差异的主要原因是源岩层内砂体“中转站”的发育。断裂作为一个三维地质体深入源岩层内,与烃源岩接触面积有限,在成藏关键时期会导致源岩供烃量不足,油气在上覆储层零星分布的情况。若源岩层内油源断裂根部发育砂岩“中转站”,则大大提高了油源断裂与烃源岩层的接触面积^[31],“中转站”内汇聚的油气在油气成藏期可以为油源断裂提供充足的油气来源。同理,可以用源岩层内砂体厚度来表征断裂在深入源岩层段的中转能力。大柳泉地区沙四上亚段和沙三下亚段源岩层内砂

体普遍发育,厚度一般在 0~600 m,以柳泉背斜处砂体厚度最大,达 600 m 以上,其次为王坨背斜附近,砂体厚度约为 290 m。对比源岩层内砂体发育规模与油气分布关系发现,下伏源岩层内砂体厚度大于 50 m 的区域,其上覆储层内油气富集程度较高;而在砂体厚度发育较小的部位,油气零星分布(图 5)。

3.4 断裂优势输导通道

同一条油源断裂断面往往表现出凹凸不平的几何形态,这就导致油气并不是沿整条油源断裂均匀地向上运移,而是优先向低势区汇聚运移。油气沿断层面运移主要表现为平行流、发散流和汇聚流 3 种形式,分别对应断层面形态为平面、凹面和凸

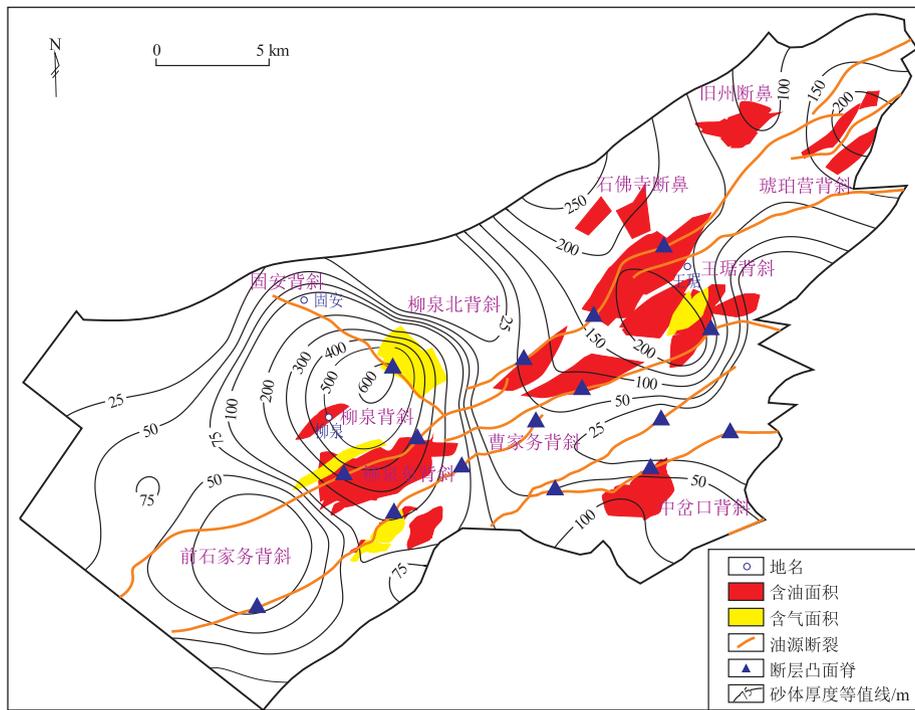


图 5 渤海湾盆地廊固凹陷大柳泉地区源岩层内砂体厚度、油源断裂凸面脊与油气分布关系
 Fig.5 Relationship between sand thickness in source rock and hydrocarbon distribution in Daliuquan area, Langgu Sag, Bohai Bay Basin

面^[1]。其中以汇聚流运移形式的凸面脊发育部位最有利于油气垂向运移,是油气垂向运移的优势输导通道,断裂凸面脊就是以汇聚流形式运移的沿断层面上断面低势区的连线(图 6a)。应用断层埋深等值线对大柳泉地区油源断裂凸面脊发育部位进行刻画,每条油源断裂凸面脊发育个数不同,

如柳泉断裂共发育 4 条凸面脊(图 6b),在油源和运移动力充足的情况下,油气主要向油源断裂凸面脊发育部位汇聚,在凸面脊附近聚集成藏。断裂凸面脊反映了断裂几何学和运动学特征对输导能力的影响,在油源和动力充足条件下,断裂凸面脊汇聚油气能力主要受其几何特征制约,可以用断裂倾

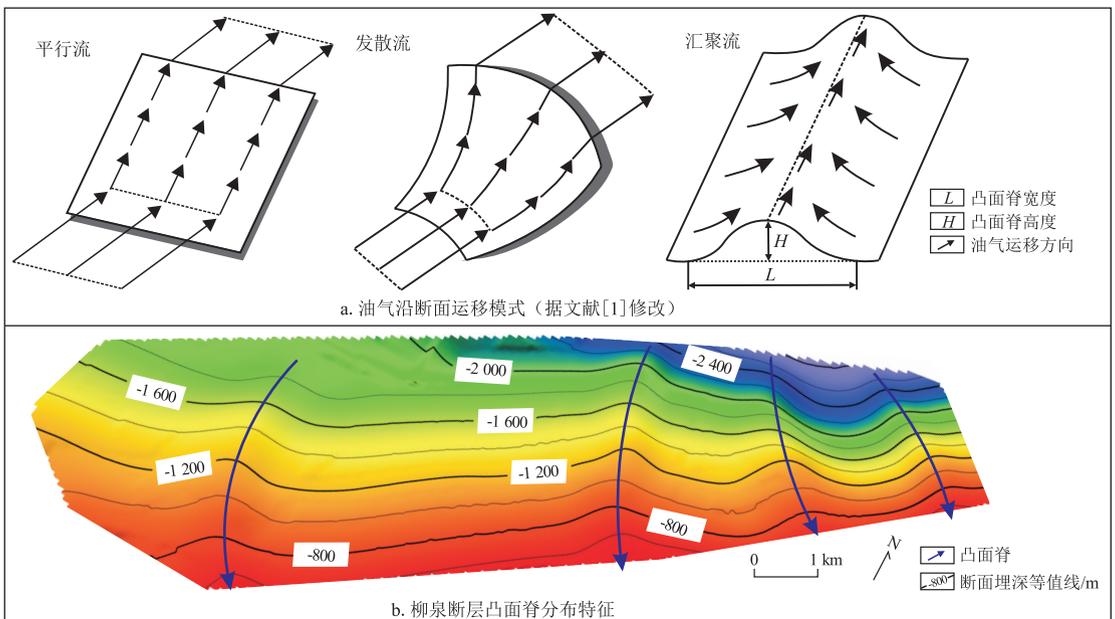


图 6 断面运移油气模式及渤海湾盆地廊固凹陷柳泉断层凸面脊特征

Fig.6 Hydrocarbon migration pattern of fault plane and typical convex ridge characteristics of Liuquan fault in Langgu Sag, Bohai Bay Basin

角、凸面脊高度和宽度来表征凸面脊发育规模(式1)。凸面脊发育规模越大,汇聚油气能力越强。

$$S = HL\sin\theta \quad (1)$$

式中: S 为输导断裂断面脊规模; θ 为油源断裂凸面脊倾角; L 为凸面脊宽度; H 为凸面脊高度。

4 断裂垂向输导能力定量评价

4.1 断裂垂向输导能力定量评价方法

综合分析,大柳泉地区断裂垂向输导能力可以由断裂活动强度、异常压力、砂体“中转站”和断裂凸面脊规模4个参数表征。断裂垂向输导能力大小直接影响到油气藏储量的高低,油气藏储量可以作为评价断裂垂向输导能力的重要指标。根据大柳泉地区多个区块油气分布可以看出,断裂垂向输导能力各影响因素均与油气具有良好的正相关关系(图7)。

断裂垂向输导油气是一个复杂的过程,仅从单一影响因素很难确定断层垂向输导能力,同时,大柳泉地区断裂输导能力4个影响因素具有不同的量纲,因此,通过确定阈值的方法对各影响因素进行无量纲化。由上述研究可知,当断层活动速率大于10 m/Ma时,油气较为富集,因此确定断层活动速率影响断裂输导能力的阈值为10 m/Ma。同理,确定异常压力系数阈值为1.12,砂体厚度阈值为50 m,断面脊规模阈值为0.15 km²(图7)。通过各影响因素值与阈值的比值进行无量纲化处理,得到

断层活动速率指数、超压系数指数、砂体厚度指数和断面脊规模指数。在此基础上,可用“断层输导能力评价指数(FTC)”来评价断裂垂向输导能力。

$$FTC = V_0 P_0 T_0 S_0 \quad (2)$$

式中: FTC 表示断层输导能力; V_0 为断层活动速率指数; P_0 为超压系数指数; T_0 为砂体厚度指数; S_0 为断面脊规模指数。 FTC 值越大,表明断裂对油气的输导能力越强。

4.2 断裂垂向输导能力综合评价结果

断裂垂向输导能力大小直接影响到油气藏储量的高低,油气藏储量可以作为评价断裂垂向输导能力的重要指标。利用 FTC 对大柳泉地区断裂垂向输导能力进行评价,并建立实际油气储量与 FTC 之间的关系,二者之间表现出较好的正相关关系(图8)。表明该方法适用于评价大柳泉地区断层垂向输导能力。

通过大柳泉地区内油源断裂输导能力评价指数的计算,结合大柳泉地区油气储量分布,对该区油源断裂输导油气能力进行定量评价(图9),油源断裂 FTC 值大的地区油气较其他地区富集, FTC 值小的油源断层附近则几乎无油气富集。

5 结论

(1)大柳泉地区油气以垂向运移为主,IV型和VI型断裂系统作为油源断裂是该区油气垂向运移的主要通道。

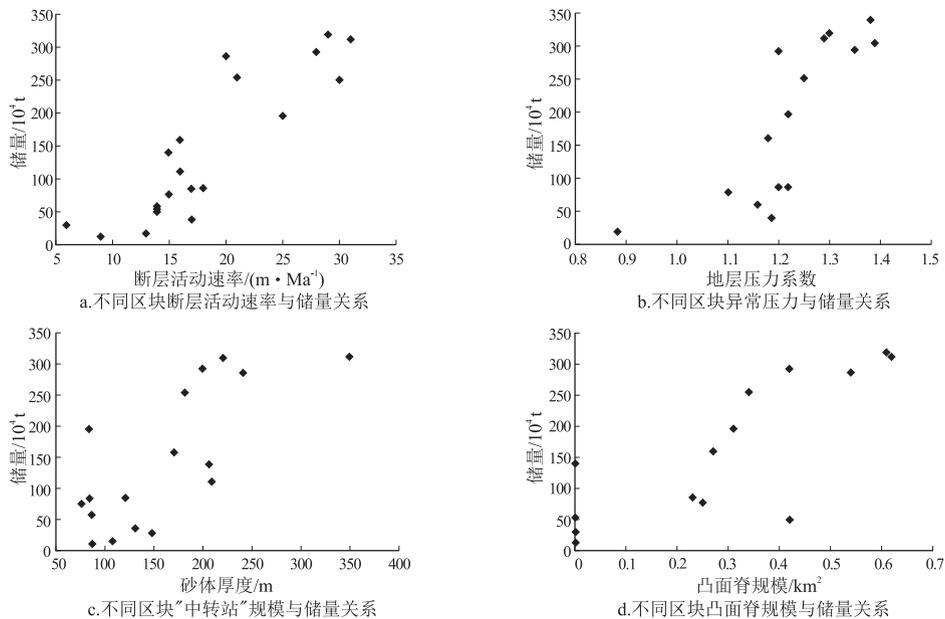


图7 渤海湾盆地廊固凹陷大柳泉地区油源断裂输导能力影响因素与储量关系

Fig.7 Relationship between influencing factors of source fault transporting ability and reserves in Daluquan area, Langgu Sag, Bohai Bay Basin

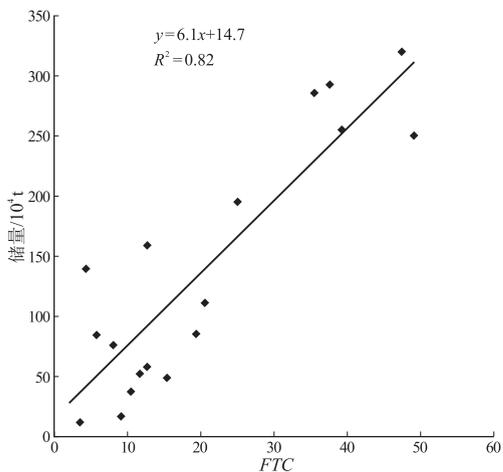


图 8 渤海湾盆地廊固凹陷大柳泉地区
储量与断层输导能力评价指数关系

Fig.8 Contrast of reserve abundance and fault transport ability evaluation index of Daliuquan area in Langu Sag, Bohai Bay Basin

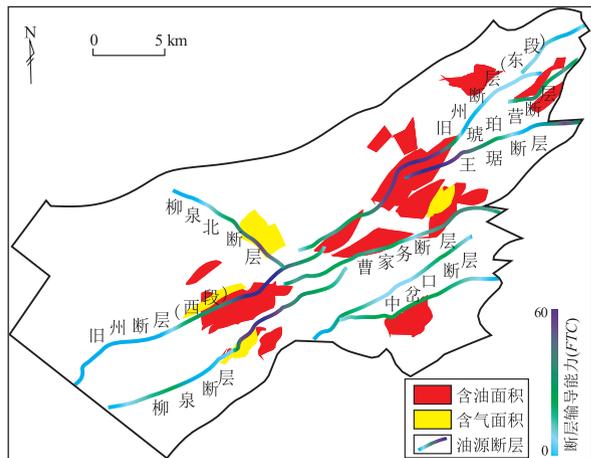


图 9 渤海湾盆地廊固凹陷大柳泉地区
油源断层输导能力综合评价

Fig.9 Comprehensive evaluation of source fault hydrocarbon transporting ability in Daliuquan area, Langu Sag, Bohai Bay Basin

(2) 断裂输导油气运移时期,断裂呈开启状态,影响其垂向输导能力的主要因素包括运移动力、源岩供烃量以及断裂几何学和运动学特征。结合大柳泉地区地质特征和油气分布规律,可以用断裂活动速率、异常压力、砂体“中转站”规模和断层凸面脊规模 4 个参数,来表征断裂输导能力影响因素。

(3) 大柳泉地区各区块储量与断裂垂向输导能力评价参数存在良好的正相关关系,综合这些断裂输导能力影响因素评价参数回归拟合出断层输导油气能力评价公式,该公式计算结果与实际地质情况吻合良好,表明该定量评价方法具有较好的适用性。

参考文献:

[1] HINDLE A D. Petroleum migration pathways and charge concentration: a three-dimensional model [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(9): 1451-1481.

[2] 张伟忠,张云银,王兴谋,等. 济阳拗陷盆缘次生气藏输导模式[J]. 石油实验地质, 2019, 41(2): 185-192.
ZHANG Weizhong, ZHANG Yunyin, WANG Xingmou, et al. Transmission model of secondary gas reservoir on the basin margin of Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(2): 185-192.

[3] 左宗鑫,陆建林,王苗,等. 松辽盆地长岭断陷断层特征及其控油气作用[J]. 石油实验地质, 2019, 41(2): 200-206.
ZUO Zongxin, LU Jianlin, WANG Miao, et al. Fault characteristics and controls on hydrocarbon accumulation in Changling Faulted Depression, Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(2): 200-206.

[4] CHESTER F M, LOGAN J M. Implications for mechanical properties of brittle faults from observations of the Punchbowl fault zone, California [J]. Pure and Applied Geophysics, 1986, 124(1/2): 79-106.

[5] FORSTER C B, EVANS J P. Hydrogeology of thrust faults and crystalline thrust sheets: results of combined field and modeling studies [J]. Geophysical Research Letters, 1991, 18(5): 979-982.

[6] CAINE J S, EVANS J P, FORSTER C B. Fault zone architecture and permeability structure [J]. Geology, 1996, 24(11): 1025-1028.

[7] SCHOLZ C H, DAWERS N H, YU J Z, et al. Fault growth and fault scaling laws: preliminary results [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1993, 98(B12): 21951-21961.

[8] FAULKNER D R, MITCHELL T M, HEALY D, et al. Slip on 'weak' faults by the rotation of regional stress in the fracture damage zone [J]. Nature, 2006, 444(7121): 922-925.

[9] XIE Xinong, LI Sitian, DONG Weiliang, et al. Evidence for episodic expulsion of hot fluids along faults near diapiric structures of the Yinggehai Basin, South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(6): 715-728.

[10] 孙同文,吕延防,刘宗堡,等. 大庆长垣以东地区扶余油层油气运移与富集[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 700-707.
SUN Tongwen, LÜ Yanfang, LIU Zongbao, et al. Hydrocarbon migration and enrichment features of the Fuyu oil layer to the east of the Daqing placanticline [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 700-707.

[11] 谭丽娟,解宏泽,张辉,等. 一种生长断层封闭性定量研究方法:以辽河拗陷辽中凹陷 JX1-1 油田为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(2): 268-273.
TAN Lijuan, XIE Hongze, ZHANG Hui, et al. A quantitative research method on the sealing of growth faults: a case study of JX1-1 oil field in Liaozhong Sag, Liaohe Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2): 268-273.

[12] 吕延防,王伟,胡欣蕾,等. 断层侧向封闭性定量评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 310-316.
LÜ Yanfang, WANG Wei, HU Xinlei, et al. Quantitative evaluation method of fault lateral sealing [J]. Petroleum Exploration

- and Development, 2016, 43(2): 310-316.
- [13] 孙永河, 赵博, 董月霞, 等. 南堡凹陷断裂对油气运聚成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 540-549.
SUN Yonghe, ZHAO Bo, DONG Yuexia, et al. Control of faults on hydrocarbon migration and accumulation in the Nanpu Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 540-549.
- [14] 付晓飞, 许鹏, 魏长柱, 等. 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, 19(6): 200-212.
FU Xiaofei, XU Peng, WEI Changzhu, et al. Internal structure of normal fault zone and hydrocarbon migration and conservation[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(6): 200-212.
- [15] 郝芳, 邹华耀, 龚再升, 等. 新(晚期)构造运动的物质、能量效应与油气成藏[J]. 地质学报, 2006, 80(3): 424-431.
HAO Fang, ZOU Huayao, GONG Zaisheng, et al. The material and energy effects of Neotectonics/Late-stage tectonics and petroleum accumulation [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(3): 424-431.
- [16] 何登发. 断裂—岩性体油气藏特征[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 22-28.
HE Dengfa. Features of oil-gas reservoir generated by fault-lithologic body[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 22-28.
- [17] 张立宽, 罗晓容, 宋国奇, 等. 油气运移过程中断层封闭性的量化表征参数评价[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 92-100.
ZHANG Likuan, LUO Xiaorong, SONG Guoqi, et al. Quantitative evaluation of parameters to characterize fault opening and sealing during hydrocarbon migration [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 92-100.
- [18] 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.
ZOU Huayao, ZHOU Xinhui, BAO Xiaohuan, 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.
- [19] ZHANG Likuan, LUO Xiaorong, 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.
- [20] 滕长宇, 邹华耀, 郝芳. 渤海湾盆地构造差异演化与油气差异富集[J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44(4): 579-590.
TENG Changyu, ZOU Huayao, HAO Fang. Control of differential tectonic evolution on petroleum occurrence in Bohai Bay Basin [J]. Science China (Earth Sciences), 2014, 57(5): 1117-1128.
- [21] 赵贤正, 金凤鸣, 王权, 等. 断陷盆地富油凹陷二次勘探工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016: 213-275.
ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, WANG Quan, et al. The secondary exploration engineering of oil-rich sag in graben basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016: 213-275.
- [22] 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): 21-24.
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, 2001, 25(6): 21-24.
- [23] 刘邦, 潘校华, 万仑坤, 等. 东尼日尔 Termit 盆地构造演化及古近系油气成藏主控因素[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 394-403.
LIU Bang, PAN Xiaohua, WAN Lunkun, et al. Structural evolution and main controlling factors of the Paleogene hydrocarbon accumulation in Termit Basin, eastern Niger [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 394-403.
- [24] 傅强, 刘彬彬, 徐春华, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷构造定量分析与油气富集耦合关系[J]. 石油学报, 2013, 34(S2): 112-119.
FU Qiang, LIU Binbin, XU Chunhua, et al. The couple relationship of quantitative analysis of the structures and oil & gas accumulation in Huanghekou Depression, Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(S2): 112-119.
- [25] 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 Youlu, LIU Pei, SONG Guoqi, 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.
- [26] CHILDS C, MANZOCCHI T, WALSH J J, et al. A geometric model of fault zone and fault rock thickness variations [J]. Journal of Structural Geology, 2009, 31(2): 117-127.
- [27] 孙永河, 付晓飞, 吕延防, 等. 地震泵抽吸作用与油气运聚成藏物理模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(1): 98-104.
SUN Yonghe, FU Xiaofei, LÜ Yanfang, et al. Suction role of seismic pumping and physical simulation on hydrocarbon migration and accumulation [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(1): 98-104.
- [28] JUNG B, GARVEN G, BOLES J R. Effects of episodic fluid flow on hydrocarbon migration in the Newport-Inglewood Fault Zone, southern California [J]. Geofluids, 2014, 14(2): 234-250.
- [29] WELLS D L, COPPERSMITH K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(4): 974-1002.
- [30] DUTTON D M, TRUDGILL B D. Four-dimensional analysis of the Sembo relay system, offshore Angola: implications for fault growth in salt-detached settings [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(6): 763-794.
- [31] 邓运华. 裂谷盆地油气运移“中转站”模式的实践效果: 以渤海油区第三系为例[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 18-24.
DENG Yunhua. Practical effect of the “transfer station” model for oil-gas migration in rift basin: a case study on the Tertiary in the Bohai oil province [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 18-24.