

辽东湾坳陷断裂联接及其控油气作用

徐长贵¹, 余一欣^{2,3}, 吴奎¹, 万静⁴, 柳屿博¹, 徐小龙^{2,3}, 吴航²

[1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452; 2. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油大学 盆地与油藏研究中心, 北京 102249; 4. 中国石油 新疆油田分公司 准东采油厂 勘探开发研究院, 新疆 阜康 831511]

摘要:根据构造解释成果,并结合油气勘探实践,对渤海辽东湾坳陷的断裂联接特征及其对油气聚集成藏的影响进行了分析。辽东湾坳陷主要发育 NE 和 NEE 走向的伸展断裂、走滑断裂和伸展-走滑复合断裂,其中部分断裂通过硬联接和软联接方式发生了相互作用。根据断裂发育特征及其联接作用的表现形式,可将硬联接方式分为接力型、消减型和传递型 3 类,将软联接分为同向斜坡型、斜向背斜型和背向地垒型 3 类。辽东湾坳陷断裂及其联接作用对沉积体系发育、圈闭形成和储层质量改善等都产生了重要影响,有利于油气在断裂相互作用区聚集成藏。

关键词:断裂;硬联接;软联接;油气成藏;辽东湾坳陷

中图分类号:TE121.2 **文献标识码:**A

Fault linkages and their control on hydrocarbon accumulation in the Liaodongwan Depression, offshore Bohai Bay Basin

Xu Changgui¹, Yu Yixin^{2,3}, Wu Kui¹, Wan Jing⁴, Liu Yubo¹, Xu Xiaolong^{2,3}, Wu Hang²

(1. Tianjin Branch, CNOOC Limited, Tianjin 300452, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Basin & Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 4. Petroleum Exploration and Development Research Institute, Zhundong Oil Production Plant of Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Fukang, Xinjiang 831511, China)

Abstract: On the basis of structural interpretation and hydrocarbon exploration, this paper addresses fault linkages and their control on hydrocarbon accumulation in the Liaodongwan Depression, offshore Bohai Bay Basin. The extensional, strike-slip and compound faults with NE and NEE strikes are predominant in the Liaodongwan Depression, and they interact with each other by hard or soft linkages. According to the assemble patterns of faults and their linkages, the hard linkages of faults can be divided into three types: relaying, consumering and transferring. Similarly, the types of soft linkages involve synthetic ramp, convergent anticline and divergent horst. Faults and their interaction exerted important influences on depositional systems, structural traps and reservoir properties. The interaction zones of faults are the favorable objectives for oil and gas exploration in the Liaodongwan Depression.

Key words: fault; hard linkage; soft linkage; hydrocarbon accumulation; Liaodongwan Depression

裂陷盆地边缘和内部一般都发育大量不同尺度的正断层,这些断层或是以相交、合并和分叉等硬连接方式直接连锁在一起,或是以平行、雁列和侧列等方式发生软连接。随着伸展作用的逐渐增强,正断层多以孤立正断层—正断层软联接—正断层硬联接的形式发生改变,这也体现了它们之间的渐进演化关系^[1]。不论以何种方式发生联接,断层位移都会发生传递,并在三维空间里保持守恒^[2],而且软联接还会在断层叠置区内形成多种类型的构造变换带^[3-8]。辽东湾坳陷是渤海湾盆地最重要的油气产区和有利探区之一^[9]。近年来,随着油气勘探及研究工作的逐步深入,已认识到该

坳陷内发育数量众多、规模不等、性质多样的断裂,而且断裂之间还通过硬联接和软联接方式发生了复杂的相互作用,并对油气聚集成藏产生了重要影响^[10-21]。本文针对辽东湾坳陷的断裂联接特征及其对油气成藏的控制作用进行深入研究,对渤海湾盆地相似地区的构造解释和油气勘探都具有重要指导意义。

1 断裂发育特征

辽东湾坳陷属于渤海湾盆地北部下辽河坳陷——辽东湾坳陷的海域部分,整体呈 NE 走向的长条形,南

收稿日期:2014-01-15;修订日期:2014-05-16。

第一作者简介:徐长贵(1971—),男,高级工程师,石油地质。E-mail: xuchg@cnoc.com.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(91114202);国家科技重大专项(2011ZX05031-001-008HZ,2011ZX05002-006-007HZ,2011ZX05029-002);中国石油大学(北京)基金项目(KYJJ2012-01-11)。

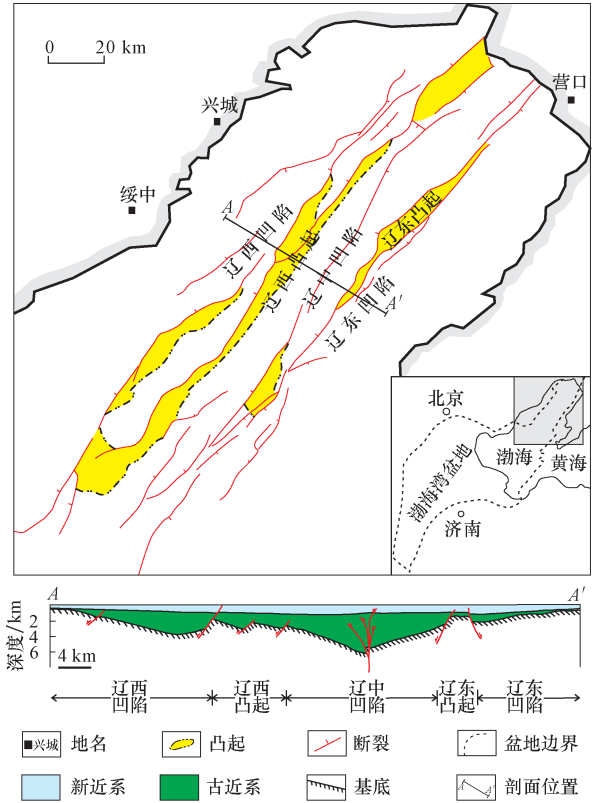


图 1 辽东湾坳陷构造纲要^[15]

Fig. 1 Structural outline of the Liaodongwan Depression^[15]

北长约 200 km,东西宽约 60 km(图 1)。辽东湾坳陷

新生代地层发育齐全,从下到上分别为古近系孔店组(Ek)、沙河街组(Es)和东营组(Ed),新近系馆陶组(Ng)和明化镇组(Nm),以及第四系平原组(Qp)。辽东湾坳陷的整体结构和变形受到 NW - SE 向伸展作用和 NE 向郯庐走滑断裂带的控制和影响,整体被分割为具有明显凹凸相间特征的构造格局(图 1)。

辽东湾坳陷切割基底的主干断裂一般呈 NE 走向,倾向 NW 或 SE,连续性较好,延伸较长。而次级断裂多发育于 NE 向主干断裂旁侧,延伸较短,呈 NEE 走向(图 2)。辽东湾地区中、深层断裂活动继承性较好,至东营组开始沉积后,构造活动强度明显减弱,浅部地层仅发生轻微变形,断裂较少发育(图 1)。

根据断裂形成的力学性质,可将辽东湾地区发育的断裂分为伸展断裂、走滑断裂和伸展 - 走滑复合断裂等 3 类。伸展断裂在辽东湾全区均有分布。大型伸展断裂在剖面上表现为上陡下缓的铲式正断层特征,呈 NE 走向,主要与 NW - SE 向的伸展作用有关(图 1)。辽东湾东部地区浅层大部分伸展断裂都是 NE 向郯庐走滑断裂带的派生断裂,规模较小,呈 NEE 向展布,分布在郯庐走滑断裂两侧(图 2)。走滑断裂主要分布在辽东和辽中地区,在剖面上具有比较典型的花状构造特征,属于郯庐断裂带的组成部分。如辽中 1 号断裂纵贯辽东湾坳陷南北,在平面上发育伸展叠瓦

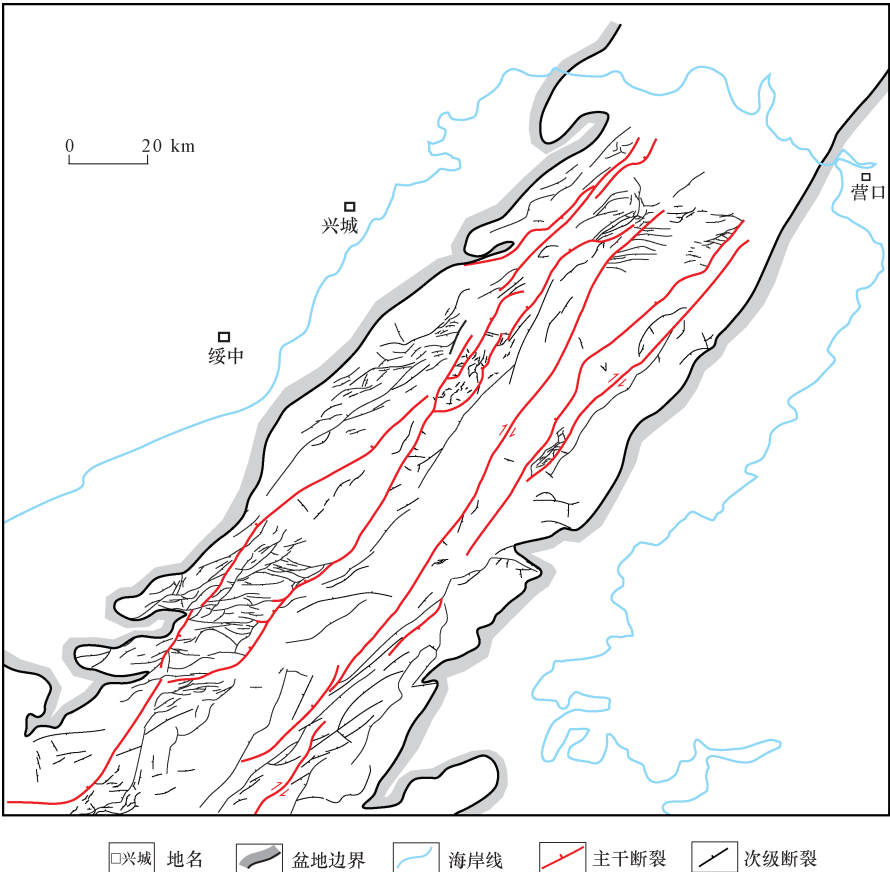


图 2 辽东湾坳陷古近系底界断裂系统

Fig. 2 Fault system on the base of the Paleogene in the Liaodongwan Depression

扇和走滑双重构造,在剖面上表现为花状构造(图1)。伸展-走滑复合断裂则是指早期伸展破裂面在晚期受郯庐断裂带影响,发生走滑运动。该类断裂主要分布在辽西地区,在剖面上表现为主干铲式,正断层面上盘浅部地层发育多条反向或同向分支断裂,组成似花状构造^[17]。

2 断裂硬联接作用

断裂的硬联接作用在平面上主要表现为断裂直接相交或通过传递断层发生联接。根据辽东湾拗陷断裂发育特征,并结合断裂联接区构造形态及勘探实际需要,将断裂硬联接方式划分为接力型、消减型和传递型等三大类,其中根据传递型的差异,还可将其进一步细分为横向传递型和雁列传递型两类(图3)。

接力型是指一条断裂的端点大致叠置在另一条断裂的中部,多条断裂以此方式呈接力状排列,单条断裂

在平面上呈弧形展布,断距变化符合“中间大、两端小”的“弓箭原则”。断裂的联接部分呈“V”字型的墙角形态,内部地层发生褶皱变形,发育背斜构造圈闭(图3a)。辽东湾拗陷 LD5-2, SZ36-1 和 JZ17-23 构造区的断裂联接就属于该类方式(图4)。

消减型是指一条主干断裂的旁侧发育一条或多条分支断裂,主干断裂的断距自两端向中间逐渐减小,一般在分支断裂与主干断裂的交汇部位达到最小。在断距最小的主干断裂中部与分支断裂形成与接力型相似的“V”字型墙角背斜(图3b),如辽东湾拗陷 JZ25-1 构造3和构造4井区、JZ20-2N 和 JZ20-5 构造区的断裂联接就属于此类型(图5a)。

传递型是指两条边界主干断裂通过位于其间的传递断层发生联接,根据传递断层的发育特征,可将传递型进一步划分为横向传递型和雁列传递型两类(图3c,d)。横向传递型主要表现为两条边界断裂之间发育横向联接断层,该联接断层一般对应隆起高部

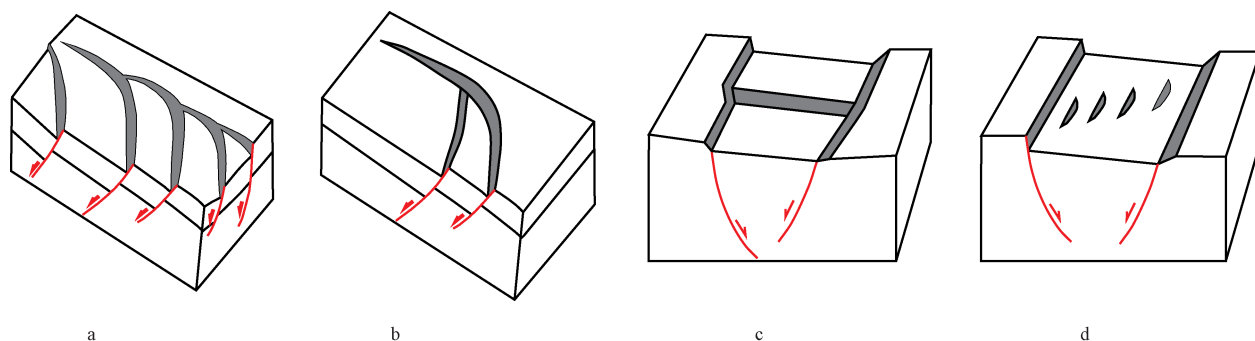


图3 辽东湾拗陷断裂硬联接平面示意图

Fig. 3 Schematic map showing hard linkages of faults in the Liaodongwan Depression

a. 接力型; b. 消减型; c. 横向传递型; d. 雁列传递型

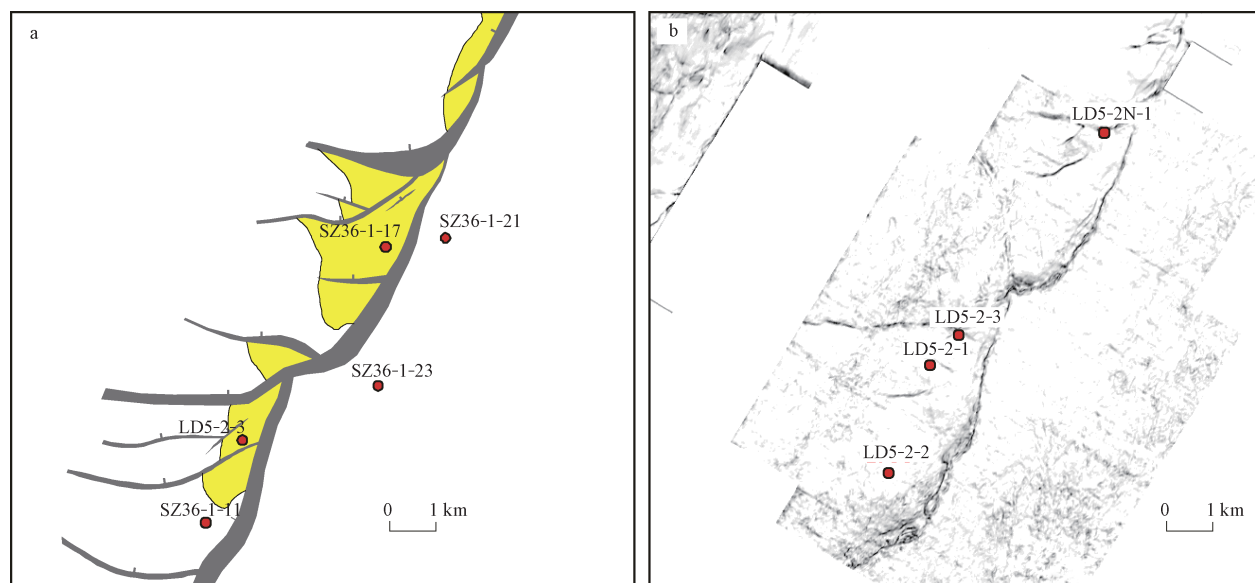


图4 辽东湾拗陷 LD5-2 及邻区断裂发育特征

Fig. 4 Characteristics of fault systems in LD5-2 and adjacent areas in the Liaodongwan Depression

a. 东营组二段底界断裂系统; b. 相干体切片(1 000 ms)

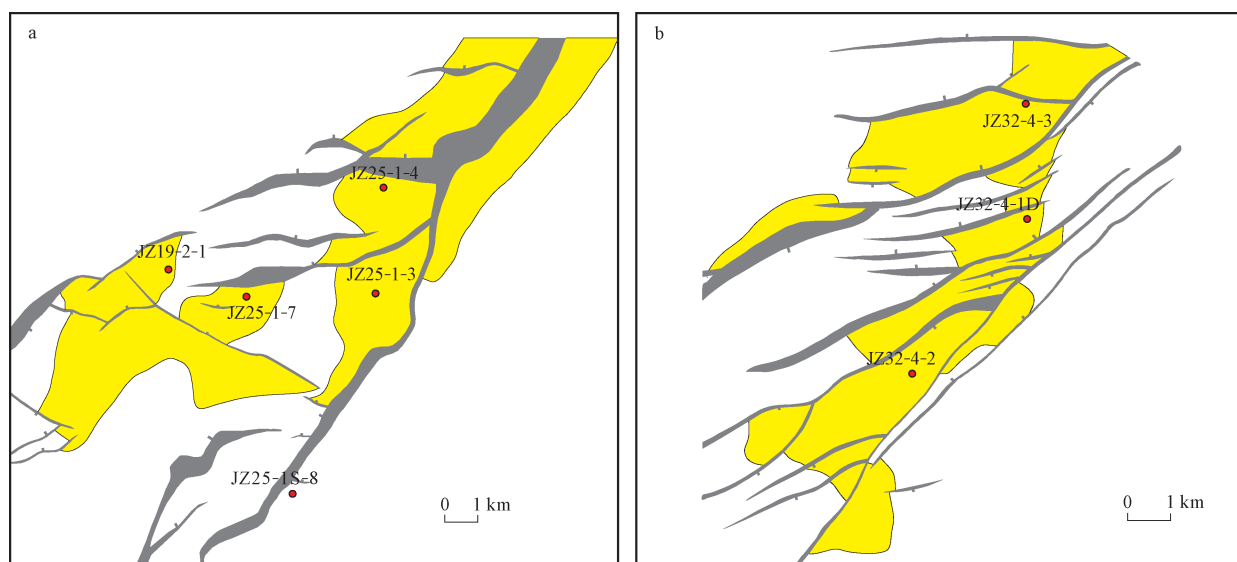


图5 辽东湾坳陷消减型和传递型断裂联接特征

Fig. 5 Consumering and transferring linkages of faults in the Liaodongwan Depression

a. JZ25-1 构造区沙河街组一段底界断裂系统; b. JZ32-4 构造区东营组二段底界断裂系统

位,两侧为洼陷(图3c)。如JZ25-1-7井南侧的NW向联接断层将两条NE向的边界断裂直接联接起来,目前已在联接断裂两侧发育的构造圈闭内发现了丰富的油气储量(图5a)。雁列传递型与横向传递型相似,主要区别在于传递断层由走向与边界断裂基本一致,并呈雁行式排列的一系列次级断裂构成,圈闭面积也较大(图3d),JZ32-4构造区的断裂联接方式就属于该类型(图5b)。

3 断裂软联接作用

断裂的软联接作用主要表现为断裂首尾叠置,但并不直接发生联接,而是通过叠置区内的构造变换带发生相互作用^[3-8]。当断裂发生软联接时,其位移量会向断裂叠置部位逐渐减小,并通过叠置区内的构造变换带向另一条边界断裂进行传递,从而使发生相互作用的断裂的位移总量在空间上基本保持守恒。

根据常用的以断裂倾向及其组合关系进行分类的标准^[3],可将辽东湾地区的断裂软联接类型划分为同向斜坡型、斜向背斜型和背向地垒型等3类(图6)。

同向斜坡型是指两条走向一致的边界断裂向同一方向倾斜,在断裂首尾叠置的部位发育变换斜坡构造(图6a)。如在辽东湾坳陷JZ25-1S构造区,辽西1号和辽西2号两条边界断裂呈NE走向,倾向NW,并发生首尾叠置,其断距均往叠置区逐渐减小,直至终止,在叠置区内形成了斜坡型的变换构造(图7a)。

斜向背斜型是指两条走向一致的边界断裂倾向相对,在断裂叠置部位发育斜向背斜(图6b)。如JX1-1构造区的两条NE向主干断裂倾向分别为NW和

SE,并发生首尾叠置,叠置区内发育菱形断块构造。由于该构造变换带已演化至晚期的成熟阶段,变换带的南北两侧已发育破裂联接断层,将两条边界断裂硬联接在一起(图7b)。

背向地垒型是指两条走向基本一致的边界断裂倾向相背,断裂叠置部位发育地垒构造(图6c),如JZ9-3构造区的断裂联接方式(图7c)。

4 断裂联接与油气成藏

辽东湾坳陷的油气勘探实践已经证实,该地区的油气成藏与断裂及其相互作用有着非常密切的关系。概括起来,断裂及其相互作用对油气聚集成藏的影响主要体现在以下几个方面。

4.1 对沉积体系发育的影响

裂陷盆地的沉降作用主要受主干正断层诱导的断块升降运动影响,当水系需要穿越断裂进入盆地时,河流会自然地选择在地形相对平缓的构造变换带位置注入湖盆。因此,变换带往往是河流进出盆地的位置,也是沉积物源进入沉积区的主要通道,控制了物源——砂岩分散、汇聚体系,进而控制碎屑物质的富集位置。如JZ25-1S构造区来自西南方向的物源通过斜坡变换带进入后,发生卸载和堆积,形成了扇三角洲等有利储集相带。

依据断裂及其相互作用特征,可相对应地将辽东湾坳陷古近系砂岩汇聚体系分为5类,包括墙角式汇聚体系、同向斜坡式汇聚体系、消减式汇聚体系、沟谷式汇聚体系和走滑汇聚体系等(图8)。该断裂与砂岩

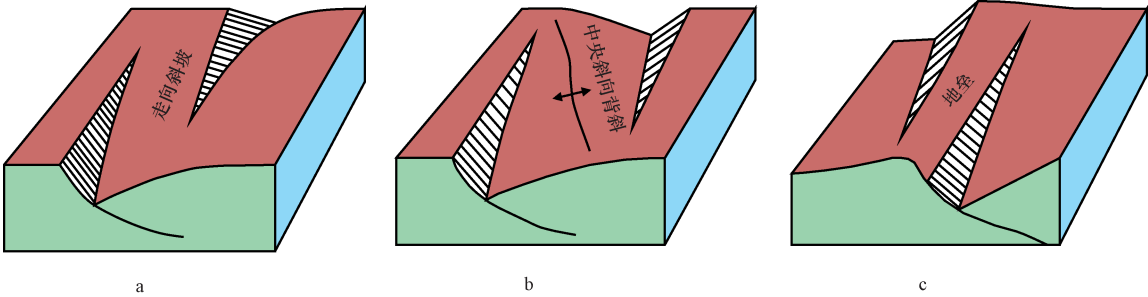


图 6 辽东湾坳陷断裂软联接示意图

Fig. 6 Schematic map showing soft linkages of faults in the Liaodongwan Depression

a. 同向斜坡型; b. 斜向背斜型; c. 背向地垒型

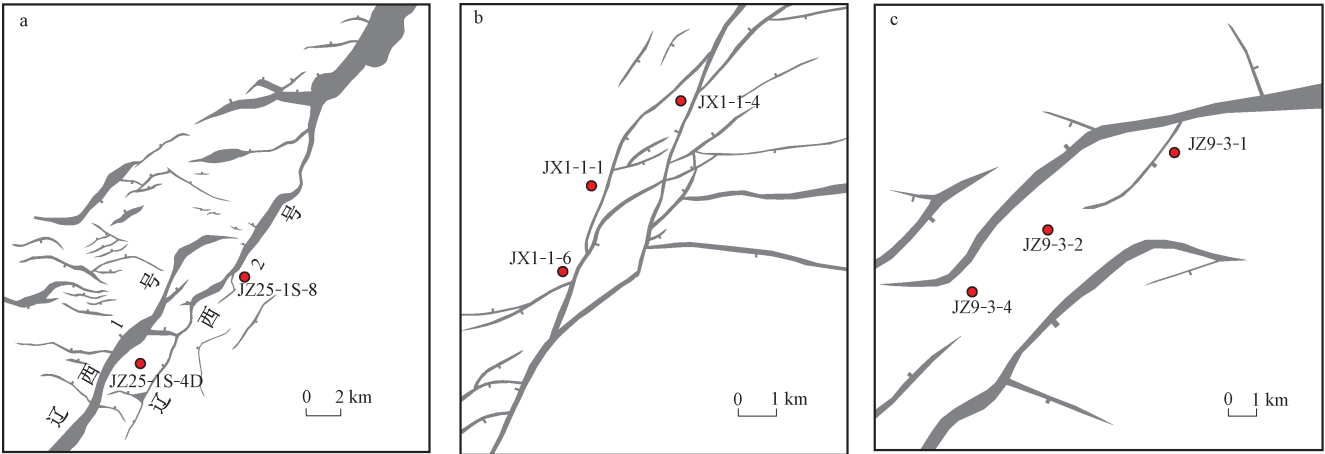


图 7 辽东湾坳陷断裂软联接特征

Fig. 7 Characteristics of soft linkages of faults in the Liaodongwan Depression

a. JZ25-1S 构造区东营组二段断裂系统; b. JX1-1 构造区东营组二段断裂系统; c. JZ9-3 构造区沙河街组一段断裂系统

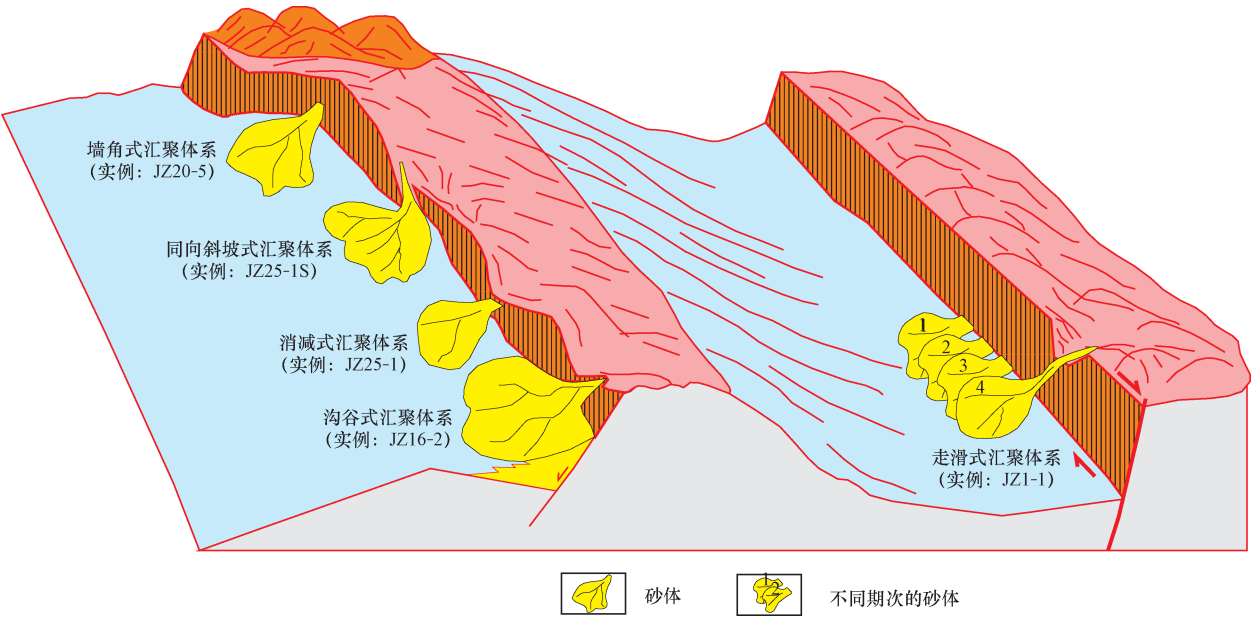


图 8 辽东湾坳陷断裂与古近系砂岩汇聚体系发育示意图

Fig. 8 Schematic map showing the relationships between faults and collective systems of sands in the Liaodongwan Depression

汇聚体系相互关系模式的建立,对油气勘探起到了重要指导作用,目前已在各类汇聚体系中都发现了优质油气田(藏)。

4.2 对圈闭形成的影响

辽东湾坳陷经历了不同时期发生的伸展、走滑和

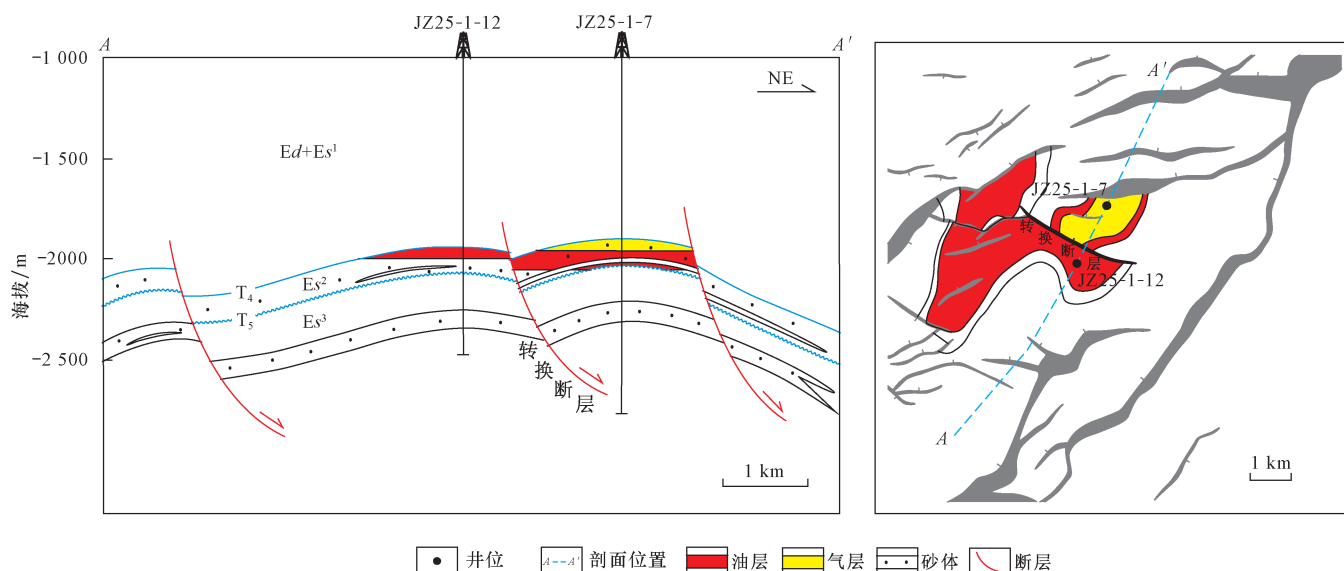


图9 辽东湾坳陷 JZ25-1 油田横向传递断层封闭性

Fig. 9 Sealing ability of transverse transferring faults in JZ25-1 oilfield in the Liaodongwan Depression

反转等性质不同的构造活动,多期构造变形的叠加,形成了多种类型的断裂和圈闭,为油气聚集成藏提供了良好条件。断裂相互作用部位一般都是局部强应变区,地层变形程度较高,易形成断背斜、断块和断鼻等类型的圈闭(图4,图5,图7)。另外,在断裂发生软联接而形成构造变换带的过程中,边界断裂的位移会通过叠置区内断块体的旋转进行传递,从而有利于翘倾断块圈闭的形成。位于辽西1号和辽西2号断裂之间的JZ25-1S构造变换带内的太古界基岩翘倾断块圈闭面积约 13 km^2 ,探明石油地质储量 $3\,173 \times 10^4\text{ t}$ 。在油气勘探过程中,还结合实钻情况,根据构造变换带模式重新归位了JX构造的边界主干断裂,从而使圈闭面积得到了增加,新增石油地质储量超过 $2\,000 \times 10^4\text{ t}$ 。

4.3 对圈闭封闭性的影响

断层的硬连接对圈闭的封闭性有较大的影响,不同性质的连接类型封闭性差异较大。对于接力型的连接方式,断层的汇聚段具有较好的封闭性,断层的撒开段一般以伸展性为主,主要起到油气运移的作用,断层的封闭性一般较差。对于消减型连接方式,主干断裂一般具有较好的封闭性,而分支断裂的封闭性较差。横向传递性断层一般为北东向走滑断裂之间的共轭走滑断裂,这类断裂虽然断距不大,但是因为其一般具有压扭作用,因此,往往也具有良好的封闭性,JZ25-1油田7井区南侧断层就是横向传递型断层,断距只有十几米,但是断层两侧的油藏的油水界面却完全不同,表明该断层具有良好的封闭性,对油藏起到了很好的分割作用(图9)。

4.4 对储层质量的影响

断裂相互作用区不仅能沉积有利的储集相带,而且由于此类地区一般都是断裂位移发生变化和传递的区域,其应变和应力释放都较强,内部还能发育众多的次级断裂和裂缝,能使储集层中的裂缝和孔隙度增加,从而可以改善储集性能。如JZ25-1S地区太古界潜山储层受断层活动和变换带发育影响,属裂缝性储层,具有孔、洞、缝并存、非均质程度较高的双重介质特点,孔隙度最大可达 28.8% ,平均 12.2% [14]。

5 结论

1) 渤海辽东湾坳陷发育大量伸展断裂、走滑断裂和伸展-走滑复合断裂,其中有部分断裂通过硬联接或软联接的方式发生了相互作用。根据断裂发育及其相互作用方式,可将断裂硬联接方式划分为接力型、消减型和传递型,软联接类型可分为同向斜坡型、斜向背斜型和背向地垒型。

2) 辽东湾坳陷断裂及其联接作用是油气聚集成藏的主控因素,对沉积体系发育、圈闭形成、断层封闭性能和储层质量改善等都产生了重要影响,断裂相互作用区是有利的油气勘探区域。

参 考 文 献

- [1] Fossen H. Geometric analysis and scaling relations of deformation bands in porous sandstone[J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19(12): 1479-1493.
- [2] 陈昭年,陈发景,王琦. 正断层软联接及其传递带类型[J]. 现代地质, 2005, 19(4): 495-499.

- Chen Zhaonian, Chen Fajing, Wang Qi. Types of normal faults' soft linkage and corresponding transfer zones [J]. *Geoscience*, 2005, 19 (4): 495 - 499.
- [3] Morley C K, Nelson R A, Patton T L, et al. Transfer zones in the east African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts [J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74 (8): 1234 - 1253.
- [4] Peacock D C P, Sanderson D J. Geometry and development of relay ramps in normal fault systems [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78 (2): 147 - 165.
- [5] Moustafa A R. Controls on the development and evolution of transfer zones; the influence of basement structure and sedimentary thickness in the Suez Rift and Red Sea [J]. *Journal of Structural Geology*, 1997, 19 (6): 755 - 768.
- [6] Moustafa A R. Controls on the geometry of transfer zones in the Suez rift and northwest Red Sea; Implications for the structural geometry of rift systems [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86 (6): 979 - 1002.
- [7] Mouslopoulou V, Nicol A, Little T A, et al. Displacement transfer between intersecting regional strike-slip and extensional fault systems [J]. *Journal of Structural Geology*, 2007, 29 (1): 100 - 116.
- [8] 漆家福. 裂陷盆地中的构造变换带及其石油地质意义 [J]. *海相油气地质*, 2007, 12 (4): 43 - 50.
- Qi Jiafu. Structural transfer zones and significance for hydrocarbon accumulation in rifting basins [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12 (4): 43 - 50.
- [9] 徐长贵, 周心怀, 邓津辉, 等. 辽西凹陷锦州 25 - 1 大型轻质油田发现的地质意义 [J]. *中国海上油气*, 2010, 22 (1): 7 - 11.
- Xu Changgui, Zhou Xinhui, Deng Jinhui, et al. Geological significance in discovering large Jinzhou 25-1 light oilfield in Liaoxi Sag [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2010, 22 (1): 7 - 11.
- [10] 李家康. 渤海油气成藏特点及与断层关系 [J]. *石油学报*, 2001, 22 (2): 26 - 31.
- Li Jiakang. The relationship between the characteristics of hydrocarbon and the fault and hydrocarbon exploration in Bohai [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22 (2): 26 - 31.
- [11] Hsiao L Y, Graham S A, Tilander N. Seismic reflection imaging of a major strike-slip fault zone in a rift system; Paleogene structure and evolution of the Tanlu fault system, Liaodong Bay, Bohai, offshore China [J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88 (1): 71 - 97.
- [12] 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. Dominating action of Tanlu Fault on hydrocarbon accumulation in eastern Bohai Sea area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28 (4): 1 - 10.
- [13] 余一欣, 周心怀, 魏刚, 等. 渤海湾地区构造变换带及油气意义 [J]. *古地理论*, 2008, 10 (5): 555 - 560.
- Yu Yixin, Zhou Xinhui, Wei Gang, et al. Structural transfer zones and their hydrocarbon significances in Bohai Bay area [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10 (5): 555 - 560.
- [14] 周心怀, 余一欣, 魏刚, 等. 渤海辽东湾海域 JZ25 - 1S 转换带与油气成藏的关系 [J]. *石油学报*, 2008, 29 (6): 837 - 840.
- Zhou Xinhui, Yu Yixin, Wei Gang, et al. Relationship between JZ25-1S transfer zone and hydrocarbon accumulation in Liaodongwan offshore of Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29 (6): 837 - 840.
- [15] 余一欣, 周心怀, 汤良杰, 等. 渤海海域辽东湾坳陷正断层联接及其转换带特征 [J]. *地质论评*, 2009, 55 (1): 79 - 84.
- Zhou Xinhui, Yu Yixin, Tang Liangjie, et al. Linkages of normal faults and transfer zones in the Liaodongwan Depression, offshore Bohai Bay Basin [J]. *Geological Review*, 2009, 55 (1): 79 - 84.
- [16] 杨明慧. 渤海湾盆地变换构造特征及其成藏意义 [J]. *石油学报*, 2009, 30 (6): 816 - 823.
- Yang Minghui. Transfer structure and its relation to hydrocarbon exploration in Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30 (6): 816 - 823.
- [17] 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 等. 渤海海域新生代断裂发育特征及形成机制 [J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32 (2): 273 - 279.
- Yu Yixin, Zhou Xinhui, Xu Changgui, et al. Characteristics and formation mechanisms of the Cenozoic faults in the Bohai Sea waters [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32 (2): 273 - 279.
- [18] 李才, 王昕, 张海义, 等. 渤海海域庙西北洼陷新生代断裂特征及对油气成藏的控制作用 [J]. *石油地质与工程*, 2012, 26 (1): 10 - 12.
- Li Cai, Wang Xin, Zhang Haiyi, et al. Cenozoic fracturing characteristics of Miaoxibei Depression and its control on hydrocarbon accumulation [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2012, 26 (1): 10 - 12.
- [19] 黄晓波, 徐长贵, 周心怀, 等. 断层侧向封堵分析在辽东湾海域油气勘探中的应用 [J]. *断块油气田*, 2011, 18 (6): 740 - 742.
- Huang Xiaobo, Xu Changgui, Zhou Xinhui, et al. Application of lateral sealing analysis of fault in hydrocarbon exploration in Liaodong Bay [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2011, 18 (6): 740 - 742.
- [20] 田世峰, 高长海, 查明. 渤海湾盆地冀中坳陷潜山内幕油气成藏特征 [J]. *石油实验地质*, 2012, 34 (3): 272 - 276.
- Tian Shifeng, Gao Changhai, Zha Ming. Reservoir-forming characteristics of inner buried hills in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34 (3): 272 - 276.
- [21] 刘传奇, 吕丁友, 侯冬梅. 渤海 A 油田砂体连通性研究 [J]. *石油物探*, 2008, 47 (3): 251 - 255.
- Liu Chuanqi, Lv Dingyou, Hou Dongmei. Study of connectivity of sand bodies in oilfield A, Bohai area. [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2008, 47 (3): 251 - 255.

(编辑 张玉银)