

渤海海域断裂相互作用及其油气地质意义

余一欣^{1,2},周心怀³,徐长贵⁴,吴奎⁴,周鑫⁴,柳屿博⁴

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; 2. 山东科技大学 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室,山东 青岛 266590; 3. 中海石油(中国)有限公司 上海分公司,上海 200030; 4. 中海石油(中国)有限公司 天津分公司,天津 300452]

摘要:渤海海域发育大量不同方位与规模的伸展断裂和走滑断裂,并在平面和剖面上发生了复杂的相互作用,对油气聚集成藏也产生了重要影响。文章主要通过地震资料解释和构造编图,从区域和局部两个层次综合分析了渤海地区伸展断裂和走滑断裂在平面和剖面上的相互作用方式,并简要探讨了断裂相互作用对油气成藏的影响。区域范围内的断裂平面相互作用方式包括共轭型、直交型和斜交型,局部地区的相互作用方式包括帚状传递型、分支传递型、雁列断层传递型和变换构造传递型等,其中变换构造传递型进一步可分为斜坡型、地垒型和断块型。剖面上的断裂相互作用方式则主要包括X型、混合型和叠加型。渤海地区的断裂相互作用不仅对盆地结构有一定影响,对圈闭、储层和油气运移等也产生了重要影响。深入分析渤海地区的断裂相互作用特征,对油气勘探具有重要指导意义。

关键词:伸展断裂;走滑断裂;断裂相互作用;油气成藏;渤海海域

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Fault interactions and their significances for hydrocarbon accumulation in offshore Bohai Bay Basin, eastern China

Yu Yixin^{1,2}, Zhou Xinhui³, Xu Changgui⁴, Wu Kui⁴, Zhou Xin⁴, Liu Yubo⁴

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 3. Shanghai Branch, CNOOC Limited, Shanghai 200030, China; 4. Tianjin Branch, CNOOC Limited, Tianjin 300452, China]

Abstract: A great number of extensional and strike-slip faults of various orientations and scales occur in the offshore Bohai Bay Basin, eastern China. Complex areal and vertical combinations exist between these faults and they play a key role in hydrocarbon accumulation in this area. Based on seismic interpretation and structural mapping, this paper mainly focuses on the regional and local interaction patterns of the extensional faults and strike-slip faults and their significances for hydrocarbon accumulation in the study area. On map view, the regional patterns of fault interaction involve conjugate type, orthogonal crossing type and oblique crossing type, while the local patterns of fault interaction can be divided into broom-shaped transfer type, branch transfer type, en-echelon fault transfer type and transition structure transfer type, of which the last type can be subdivided into three sub-types including ramp, horst type and faulted-block. On sectional view, the fault interaction patterns mainly include X-shaped type, hybrid type and superposition type. The fault interaction not only influences basin architecture, but also impacts trap, reservoir and hydrocarbon migration. This study is of great significance for oil and gas exploration in the offshore Bohai Bay Basin.

Key words: extensional fault, strike-slip fault, fault interaction, hydrocarbon accumulation, offshore Bohai Bay Basin

裂谷盆地是世界上重要的含油气盆地类型之一,虽然其面积约占全球盆地面积的5%^[1],但为全球提

供了近三分之一的油气发现^[2]。据资料统计,在目前已发现的877个大型油气田中,有271个是位于裂谷

收稿日期:2017-06-21;修订日期:2017-11-30。

第一作者简介:余一欣(1977—),男,副教授,盆地分析和构造地质。E-mail: yuxin0707@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41472117);山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室开放基金项目(DMSM2017084);国家科技重大专项(2016ZX05033-001,2016ZX05033-002,2016ZX05026-007);北京市科技新星与领军人才培养专项(Z171100001117163)。

盆地中^[3],其中大部分油气田的形成都受到了断裂及其相互作用的影响^[4-8]。渤海湾盆地位于我国东部大陆边缘,是一个在华北克拉通基础之上发育起来的中、新生代板内裂谷盆地^[9],也是我国重要的含油气盆地之一,其油气产量已约占我国油气总产量的三分之一^[10]。受新生代地幔隆升作用影响,渤海海域(渤海湾盆地的海域部分)发育大量具有不同规模和方位的伸展断裂^[11-12],自 5.2Ma 以来发生的新构造运动在环渤中拗陷浅层也形成了密集分布的次级伸展断裂^[13-14]。此外,受 NE 向郯庐断裂带和 NW 向张家口-蓬莱断裂带的走滑作用影响,渤海地区还发育大量走滑断裂和伸展-走滑复合断裂^[12]。这些不同性质的断裂在平面和剖面上都相互交织在一起,共同组成了渤海地区复杂的断裂体系,对油气的聚集成藏也产生了重要影响。前人已针对渤海地区的断裂变形特征、活动期次及其形成机理进行了一定程度的研究^[15-17],并初步探讨了断裂联接作用及其转换带的发育特征^[18-23],但目前还未对渤海海域内不同类型、规模和方位的断裂之间的相互作用特征进行过系统梳理和分析。本文主要是在前期工作基础之上,针对渤海地区伸展断裂和走滑断裂在平面和剖面上的相互作用方式进行全面、系统的厘定与分析,并结合勘探新进展,探讨不同的断裂相互作用方式对油气成藏的影响,拟为该地区的油气勘探部署提供借鉴和参考。

1 断裂平面相互作用方式

依据断裂相互作用发生的尺度范围,可将渤海地区不同类型断裂的平面相互作用方式分为区域和局部两大类,其中区域级别的断裂平面相互作用方式包括共轭型、直交型和斜交型,局部地区的相互作用方式则包括帚状传递型、分支传递型、雁列断层传递型和变换构造传递型等。

渤海地区主要发育两条大型走滑断裂带,即 NE 向的郯庐断裂带和 NW 向的张家口-蓬莱断裂带(图 1)。受太平洋板块向欧亚板块的俯冲方向从 NNW 向转变为 NWW 向的影响,郯庐断裂带的走滑方向在沙四段沉积末期(约 43Ma)由左旋开始变为右旋^[24],张家口-蓬莱断裂带自新近纪以来则是一条具有左旋平移活动性质的地壳破裂带^[25]。这两条大型走滑断裂带在渤海地区呈 X 型相互交织在一起,共同构成了我国大陆东部新构造期的一套共轭剪切破裂系统(图 1)。这套共轭断裂系统对渤海地区的断裂发育

产生了重要影响,不仅形成了多条走滑断裂,而且还导致早期主要受地幔上隆作用影响而形成的许多伸展断裂在后期活动过程中都伴随有走滑作用,其上盘发育了多条分支断裂,从而形成伸展-走滑复合断裂,在剖面上多表现为似花状构造特征^[12]。

直交型相互作用主要发生在伸展断裂和走滑断裂之间,两者在平面上近垂直相交,在渤海南部地区表现最为典型(图 1)。该地区的主干伸展断裂呈近 EW 向展布, NNE 向郯庐断裂带分东、西两个分支从渤南地区通过,并与近 EW 向伸展断裂近于垂直相交,并对伸展断裂产生了一定的改造作用(图 1)。早期有部分研究人员认为渤南地区的莱州湾凹陷等是受郯庐断裂带走滑作用影响而形成的走滑拉分凹陷^[26],但新的地震资料表明,渤南地区的凸起和凹陷结构主要还是受近 EW 向伸展断裂控制,凹陷都表现为箕状断陷特征。郯庐断裂带在剖面上切割了早期的盆缘伸展断裂,但并没有控制沉积过程,仅是对凹陷结构有一定的后期改造作用(图 2)。

斜交型是指主干走滑断裂在走滑过程中形成一系列派生的次级伸展断裂,其规模较小,与主干走滑断裂呈斜交关系。发生该类作用方式的走滑断裂和伸展断裂具有成因联系,在盆地东部郯庐断裂带经过的大部分地区都比较普遍(图 3)。

与区域性的断裂相互作用方式相比,局部地区发生的断裂相互作用更为复杂。根据断裂发育特征,可以划分为帚状传递型、分支传递型、雁列断层传递型和变换构造传递型等。

发生帚状传递型相互作用的断裂在平面上多呈弧形弯曲,其中一条断裂大致搭接在另一条断裂的中间凸出部位,多条断裂联接成扫帚状,并发生位移传递。此类断裂相互作用方式的形成可能与早期伸展断裂在后期遭受郯庐断裂带右行走滑作用的影响有关,在辽西地区最为典型,如 SZ36-1 构造区和 LD5-2 构造区的断裂相互作用方式(图 4a)。另外,在渤东地区和石臼坨凸起 QHD34-2 构造区也有发育。

分支传递型是指一条主干断裂的旁侧或尾端发育多条分支断裂,主干断裂的位移向发育分支断裂的部位逐渐最小,最终向分支断裂发生传递,如辽东湾拗陷 JZ25-1 构造 3、4 井区的断裂联接方式(图 4b)。雁列断层传递型是指两条边界主干断裂通过位于其叠置区内呈雁列式排列的多条次级断层发生相互作用,如石臼坨凸起南缘东段两条边界断裂之间就是通过多条次级断层联接在一起而发生了相互作用(图 4c)。

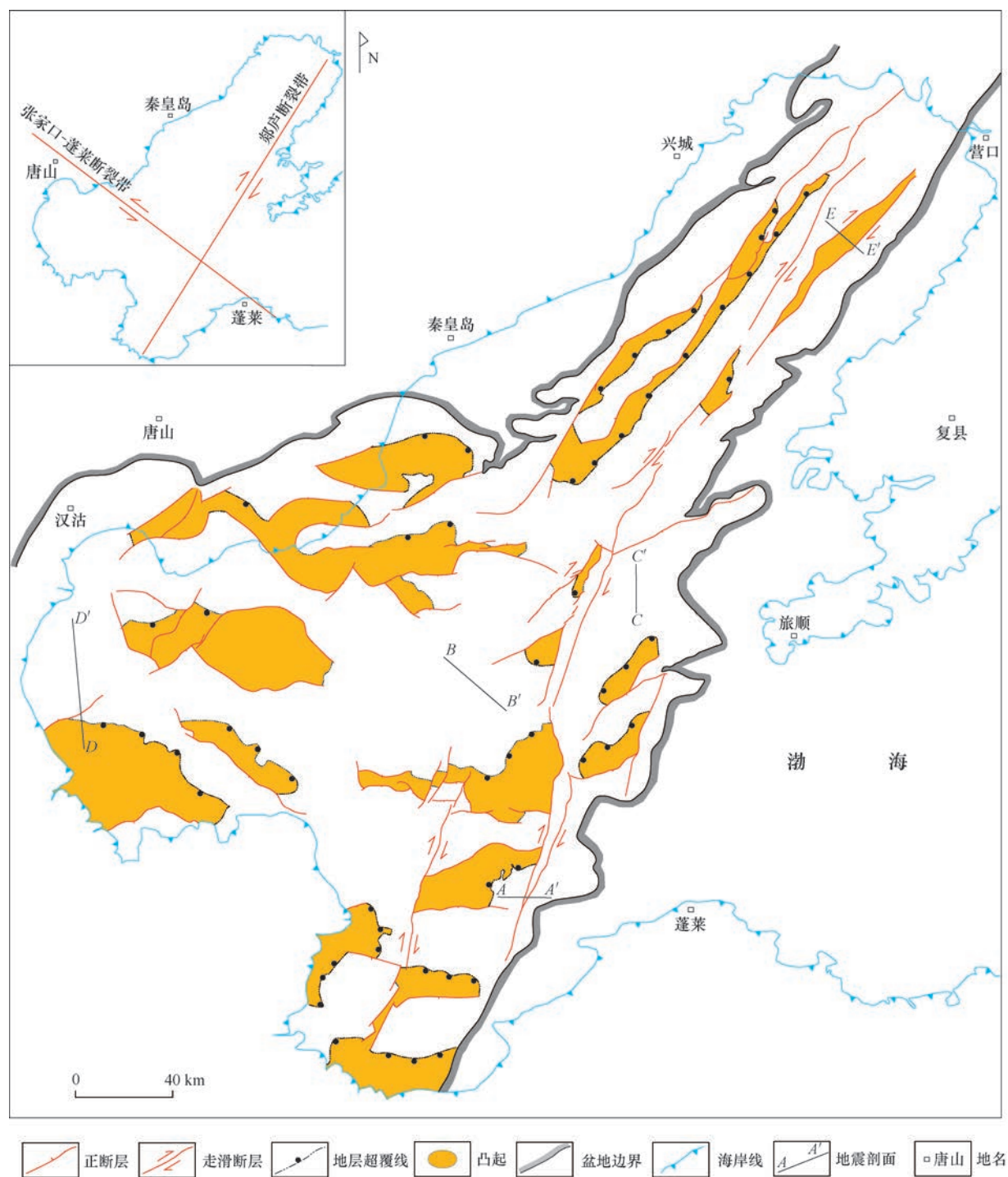


图 1 渤海海域新生代构造纲要图

Fig. 1 The Cenozoic structure outline map of offshore Bohai Bay Basin

变换构造传递型是指发生相互作用的断裂之间并不发生直接联接,而是通过发育在断裂叠置区间内不同类型的变换构造发生相互作用。根据发生相互作用的断裂的倾向及其组合关系,可进一步将其划分为斜坡型、地垒型和断块型等三类。斜坡型是指两条近于平行展布的主干断裂同向倾斜,其位移通过发育在断裂叠置部位的变换斜坡进行传递。如辽西 JZ25-1S 构造区内

两条 NE 走向的伸展断裂均向 NW 方向倾斜,并发生侧列叠接。这两条主干断裂在沙四-沙三段和东三段沉积期同时发生强烈活动,其平面位移均往断裂叠置区逐渐减小,直至终止,在叠置区内形成了斜坡型构造变换带(图 5a)。石臼坨凸起北侧 QHD29-2 构造区的断裂相互作用也具有相似特征(图 5b)。地垒型是指两条近于平行展布的断裂倾向相背,断裂下盘发育地垒构造,

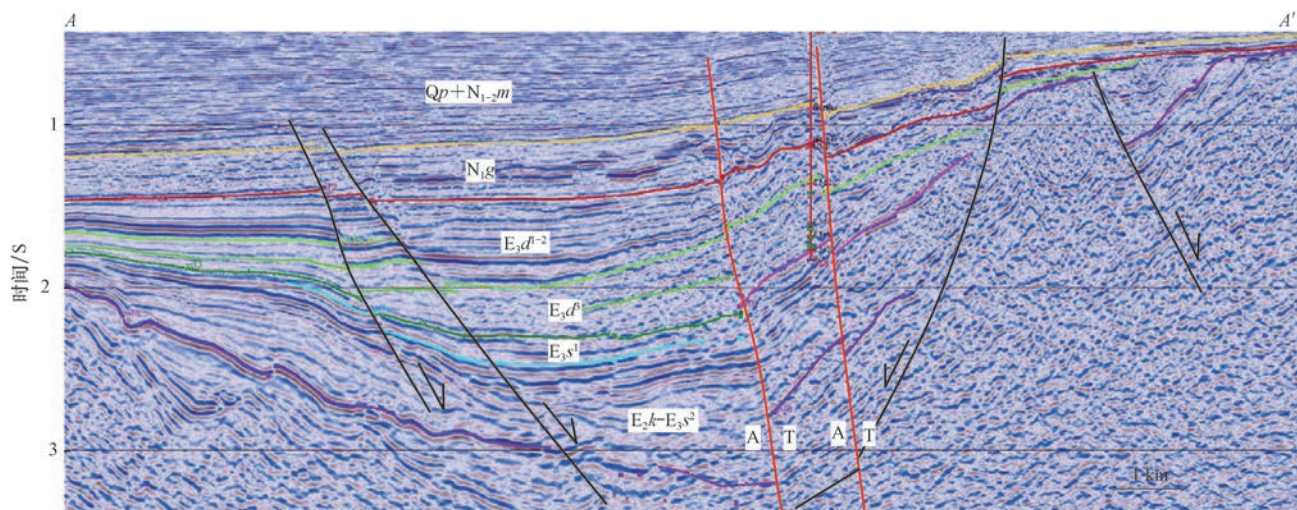


图2 渤南地区地震剖面(剖面位置见图1)

Fig.2 Seismic line across southern offshore Bohai Bay Basin (See Fig.1 for the location)

(红色表示郯庐走滑断裂带,黑色表示伸展断裂。)

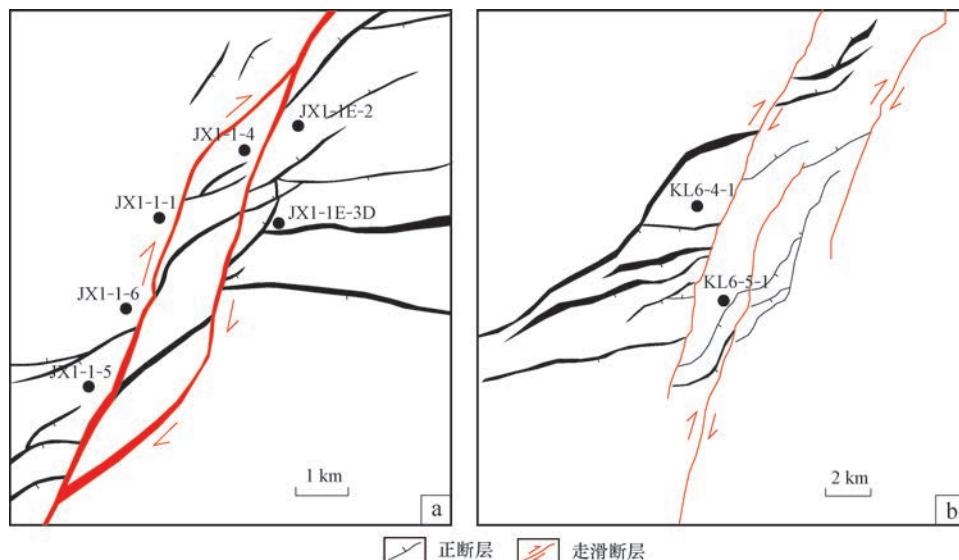


图3 渤海海域东部平面斜交型断裂相互作用特征

Fig.3 Oblique interaction of faults in eastern offshore Bohai Bay Basin

a. JX 构造区东二段底界断裂系统;b. KL6-5 构造及邻区东二段底界断裂系统

断裂位移在整个空间里保持守恒,如辽东湾坳陷 JZ9-3、LD27-2 构造区的断裂相互作用方式(图5c)。

断块型相互作用方式主要发生在侧列叠接的走滑断裂之间。渤海地区的郯庐断裂带实际上由多条走滑断裂(带)组成,这些走滑断裂在局部地区发生侧列叠接,进而通过叠置区内的断块构造发生相互作用。如位于辽东湾坳陷中部的 NE 向辽中 1 号走滑断裂带由 2~3 条分段断裂组成,并在 JX 构造区发生相互作用,形成了 JX 断块构造(图 3a)。此外,在渤南地区的黄河口凹陷中部和莱州湾凹陷东部地区,走滑断裂之间的断块型相互作用方式也比较常见(图 3b)。

2 断裂剖面相互作用方式

渤海地区断裂在剖面上的相互作用方式主要包括 X 型、混合型和叠加型等 3 类,其中最普遍,也是最重要的是 X 型断裂组合型式。

X 型断裂组合由两组具有相同走向和相反倾向的正断层组成,在剖面上多表现为简单或复杂的 X 型形态^[27]。根据断裂发育特征,可将渤海地区的 X 型断裂划分为两类。一类主要发育在浅部明化镇组内,规模较小,形态简单,表现为对称、单一的 X 型结构(图 6a)。另一类 X 型断裂在除辽东湾坳陷以外的

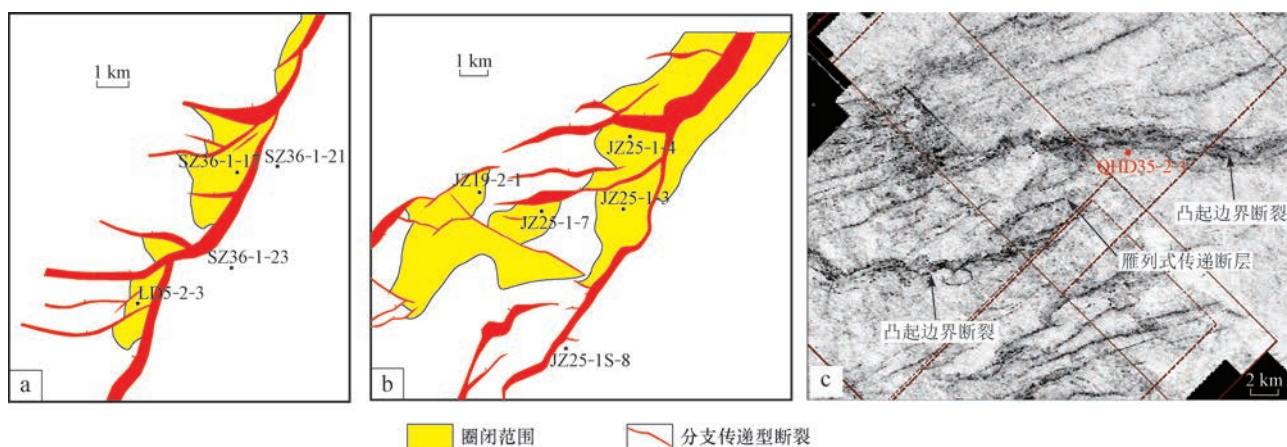


图4 渤海海域断裂局部平面相互作用特征

Fig. 4 Local interaction of faults in the offshore Bohai Bay Basin

a. LD5-2-SZ36-1 构造区东二段底界断裂系统; b. JZ25-1 构造区沙一段底界断裂系统; c. 石臼坨凸起南缘相干体切片 (1 000 ms)

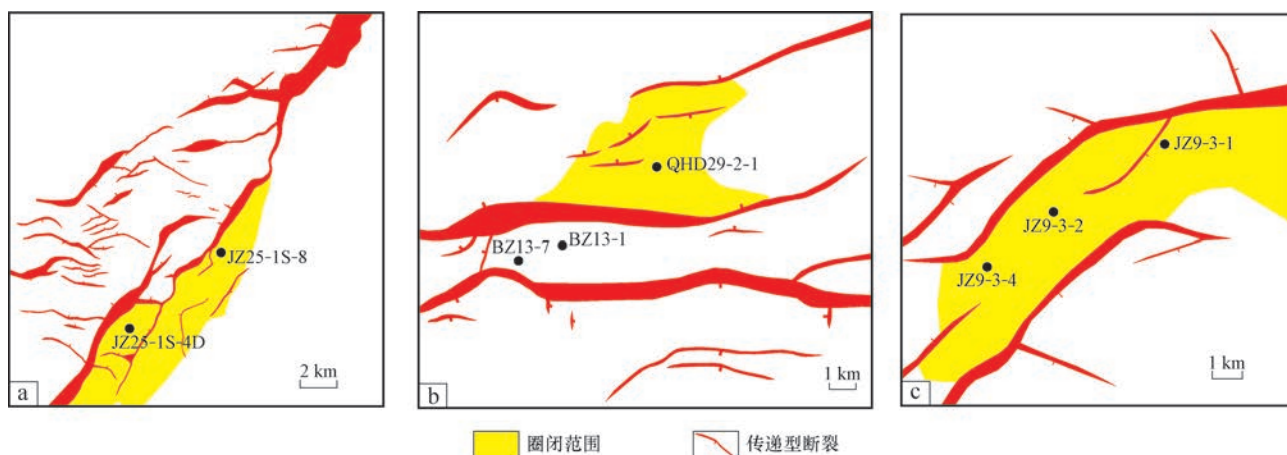


图5 渤海海域变换构造传递型断裂相互作用特征

Fig. 5 Transfer structures in the offshore Bohai Bay Basin

a. JZ25-1S 构造及邻区东二段底界断裂系统; b. QHD29-2 构造及邻区东三段底界断裂系统; c. JZ9-3 构造区沙一段底界断裂系统

地区都广泛发育,其下部断裂断至前新生代基底,断距较大,上部发育多条具有较小断距的分支断层,组合形成不同类型的 X 型结构(图 6b,c)。有些地区相邻的多个 X 型断裂还连接在一起,形成了形态复杂的连锁 X 型断裂系(图 6b)。已有研究表明,渤海地区简单的 X 型断裂主要发育在主干走滑断裂的旁侧,是在两组断层的同步滑动过程中形成的,而复杂 X 型断裂的形成主要受基底断裂的继承性活动影响^[28]。

混合型是指走滑断裂和伸展断裂的破裂面在不同时期被另一类断裂活动所利用,最终形成两类断裂系统相互叠加的复杂变形现象,在辽东湾坳陷东北部地区比较典型。该地区基底先存的郯庐断裂带中的部分断裂面被新生代伸展断裂利用和改造,而渐新世郯庐断裂带的走滑活动又利用和改造了始新世时期的伸展断裂面,从而形成了伸展断裂和走滑断裂混合在一起

的复杂构造变形系统(图 7)。

叠加型是指早期裂陷作用形成的伸展断裂受后期郯庐断裂带右行走滑活动影响,发生走滑位移,主干断裂多表现为上陡下缓的铲式正断层特征,其上盘发育多条同向或反向分支断裂,组成似花状构造。该类断裂相互作用方式主要发生在渤海东侧地区,如庙西北等凸起的两侧边界断裂都具有此特征^[12]。

3 油气地质意义

渤海地区的勘探实践已经证实,断裂相互作用区是有利的油气聚集成藏区,在此类部位已经发现了多个大中型油气田。这主要是由于断裂的相互作用会对圈闭发育、储层物性和油气运移等产生一些有利影响。

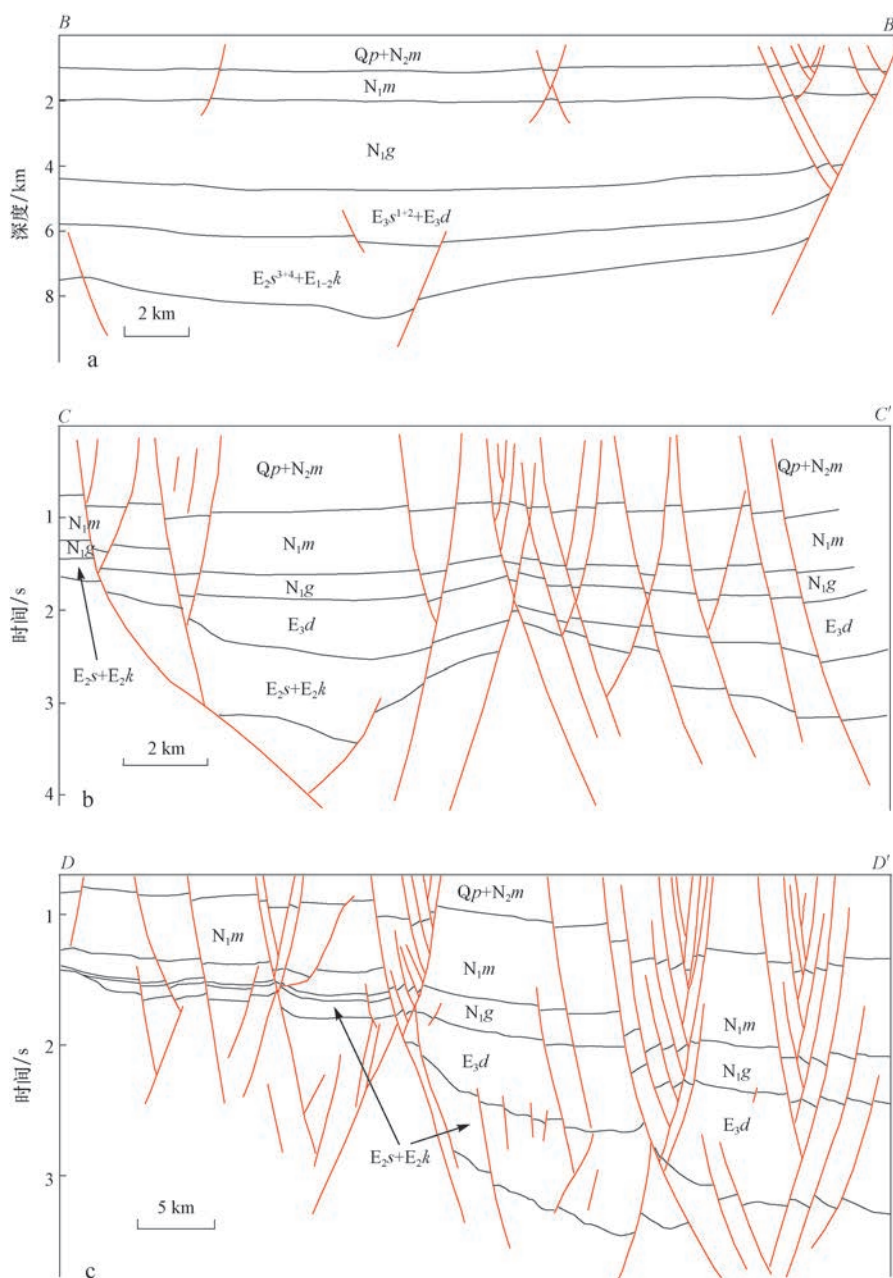


图 6 渤海海域 X 型断裂组合样式(剖面位置见图 1)

Fig. 6 X-type faults in the offshore Bohai Bay Basin (See Fig. 1 for the location)

渤南地区伸展断裂和走滑断裂发生的直交型相互作用不仅影响了凹陷结构(图 2),对局部的圈闭发育也产生了一定影响。如 KL9-1 构造的东、西两侧均被郯庐断裂带的分支断裂所限制,其南侧边界则由一条近 EW 走向的伸展断裂充当,在该地区已发现了较丰富的油气资源(图 8a)。与主干走滑断裂发生斜交型相互作用的次级伸展断裂可以充当油气运移通道,进而控制油气富集程度和聚集层位。如 LD6-2 构造的南部地区次级断层发育,而北部次级断层较少,导致南区的储量丰度明显大于北区(图 8b)。JX 构造区和 KL6-4 构造区主干走滑断裂带旁侧都发育多条与之

斜交的次级伸展断裂,进而也极大改善了这些部位的含油气性(图 3)。

断裂相互作用区的应力都比较集中,属于强应变区,而且地层易发生掀斜,可以形成断背斜、断块和断鼻等多类圈闭(图 4,图 5)。变换斜坡还是沉积物源进入沉积区的主要通道,可以控制碎屑物质的富集位置,从而有利优质储层的发育。如来自西南方向的物源通过变换斜坡进入 JZ25-1S 构造区后,发生卸载和堆积,形成了扇三角洲等有利储集相带^[19]。而且受断裂相互作用区的强应变影响,变换斜坡部位的储层一般都发育较多的构造裂缝,从而可以提高储集性能。如

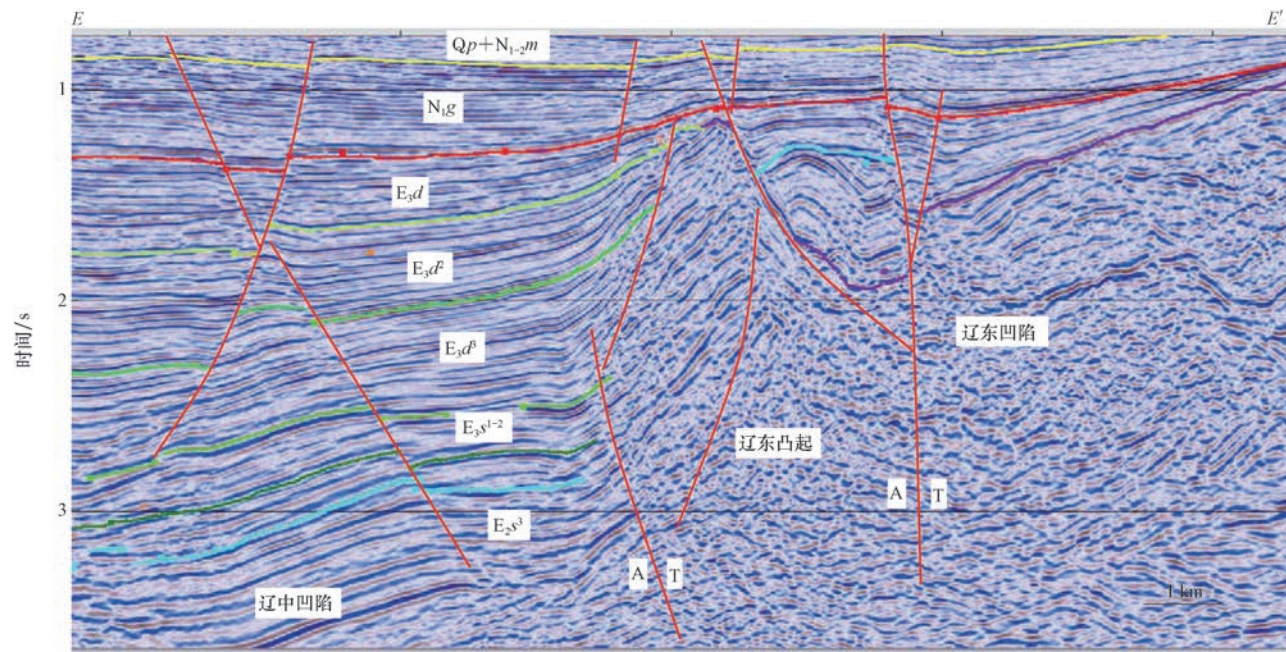


图 7 渤海辽东湾凹陷伸展断裂和走滑断裂混合作用特征(剖面位置见图 1)

Fig. 7 Hybrid interaction of extensional faults and strike-slip faults in the Liaodongwan depression (See Fig. 1 for the location)

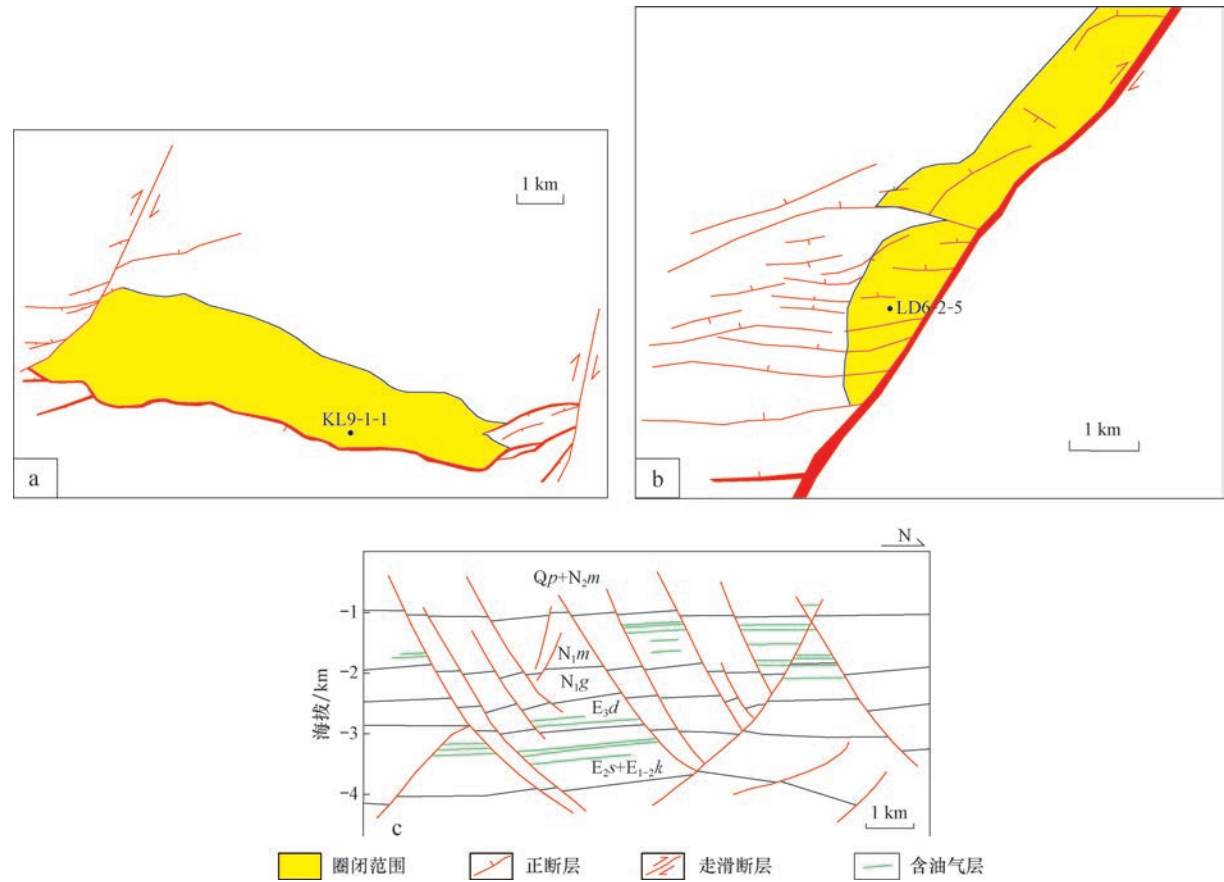


图 8 渤海海域断裂相互作用与典型油气田

Fig. 8 Interaction of faults and typical oil and gas fields in the offshore Bohai Bay Basin

a. KL9-1 构造区明化镇组底界断裂系统;b. LD6-2 构造区东二段底界断裂系统;c. 黄河口凹陷 BZ34 油田剖面

辽西 JZ25-1S 地区的太古界潜山裂缝发育,具有孔、洞、缝并存,非均质程度较高的双重介质特点^[19]。目前已在渤海地区断裂的局部相互作用区发现了 LD5-2, QHD35-2, JZ25-1S, QHD29-2 和 LD27-2 等多个油气田(图4,图5)。

走滑断裂的组合方式及走滑方向共同决定了圈闭发育状况。如果走滑断裂的侧列叠接部位是局部的挤压区,易形成背斜类圈闭,规模也较大。如果是拉张区,则易形成断块类圈闭,圈闭规模小且分散。在黄河口凹陷中部的 BZ28 和 BZ34 构造区以及莱州湾凹陷东部的 KL6-5 构造区,郯庐断裂带的分支断裂均呈左阶右行方式叠置,在挤压性的叠接区内发育了多个背斜类圈闭群(图3b)。而在辽东湾坳陷的 JX 构造区,两条郯庐断裂带的分支断裂呈右阶右行方式叠置,形成了拉张性的 JX 走滑双重构造,以断块型圈闭为主,而且断层的侧向封堵能力也较差,走滑双重构造内部并不有利于油气的大规模聚集(图3a)。

由于独特的断裂组合型式,不仅易在 X 型断裂的上、下部及邻侧形成断块圈闭和地层-岩性圈闭,而且由于 X 型断裂多已断至基底,能起到沟通油源的作用,有利于浅层油气藏的形成。目前已在 X 型断裂作用区发现了多个油气田,如 BZ13-1S, QHD34-3, BZ25-1S 和 BZ34-1 等(图8c)。但需要注意的是,由于 X 型断裂交叉点处的断距一般都较小,有时不能形成有效圈闭,如辽东湾坳陷 JZ27-2 构造的钻探失利就有这方面的原因。

4 结论

受地幔上隆和区域走滑作用影响,渤海海域发育大量不同方位与规模的伸展断裂、走滑断裂及其复合断裂,在不同尺度范围内断裂也通过多种方式发生了相互作用。区域范围内断裂发生的相互作用方式包括共轭型、直交型和斜交型,局部地区的相互作用则包括帚状传递型、分支传递型、雁列断层传递型和变换构造传递型等,而且变换构造传递型进一步可分为斜坡型、地垒型和断块型等。断裂在剖面上的相互作用方式主要包括 X 型、混合型和叠加型。渤海地区不同类型的断裂相互作用不仅控制了圈闭发育,对油气运移及其储层发育和储集性能的提高也有重要影响,断裂相互作用区的含油气性值得关注。

参 考 文 献

[1] Klemme H D. Petroleum basins-classification and characteristics[J].

Journal of Petroleum Geology, 1980, 3(2): 187-207.

[2] Fraser S I, Fraser A J, Lentini M R, et al. Return to rifts-the next wave: fresh insights into the petroleum geology of global rift basins [J]. Petroleum Geoscience, 2007, 13 (2): 99-104.

[3] Mann P, Gahagan L, Gordon M B. Tectonic setting of the world's giant oil and gas fields[C]//Halbouty M T. Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999, AAPG Memoir, 78, 2003, 15-105.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 于开财, 李胜利, 于兴河, 等. 裂谷盆地深层石油地质特征与油气成藏条件[J]. 地学前缘, 2010, 17(5): 289-295

Yu Kaicai, Li Shengli, Yu Xinghe, et al. Geological characteristics of rift basin's deep buried strata and conditions of petroleum reservoir formation[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(5): 289-295.

[9] 王涛. 中国东部裂谷盆地油气藏地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.

Wang Tao. Oil and gas reservoir geology of rift basins in east China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.

[10] Hao F, Zhou X H, Zhu Y M, et al. Mechanisms of petroleum accumulation in the Bozhong sub-basin, Bohai Bay basin, China. Part 1: origin and occurrence of crude oils[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(8): 1528-1542.

[11] 漆家福. 渤海湾新生代盆地的两种构造系统及其成因解释[J]. 中国地质, 2004, 31(1): 15-22.

Qi Jiafu. Two tectonic systems in the Cenozoic Bohai Bay basin and their genetic interpretation[J]. Geology in China, 2004, 31(1): 15-22.

[12] 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.

[13] 龚再升. 中国近海含油气盆地新构造运动与油气成藏[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2004, 29(5): 513-517.

Gong Zaisheng. Neotectonics and petroleum accumulation in offshore Chinese basins. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(5): 513-517.

[14] 周心怀, 牛成民, 滕长宇. 环渤中地区新构造运动期断裂活动与油气成藏关系[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 469-475.

Zhou Xinhui, Niu Chengming, Teng Changyu. Relationship between

- faulting and hydrocarbon pooling during the Neotectonic movement around the central Bohai Bay[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(4): 469–475.
- [15] 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 Tan-Lu fault system, Liaodong Bay, Bohai, offshore China[J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(1): 71–97.
- [16] 漆家福, 邓荣敬, 周心怀, 等. 渤海海域新生代盆地中的郯庐断裂带构造[J]. *中国科学(D辑)*, 2008, 38(增刊 I): 19–29.
- Qi Jiafu, Deng Rongjing, Zhou Xinhui, et al. Structural characteristics of the Tan-Lu fault zone in Cenozoic basins offshore the Bohai Sea[J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 38(S1): 19–29.
- [17] 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 等. 渤海辽东湾坳陷走滑断裂差异变形特征[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(5): 632–638.
- Yu Yixin, Zhou Xinhui, Xu Changgui, et al. Differential deformation of strike slip faults in the Liaodongwan Depression, offshore Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(5): 632–638.
- [18] 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]. *古地理学报*, 2008, 10(5): 555–560.
- Yu Yixin, Zhou Xinhui, Wei Gang, et al. Structural transfer zones and the ir hydrocarbon significances in Bohai Bay area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(5): 555–560.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 等. 渤海辽东湾坳陷金县构造变换带发育特征[J]. *现代地质*, 2013, 27(5): 999–1004.
- Yu Yixin, Zhou Xinhui, Xu Changgui, et al. Formation of JX transfer zone in the Liaodongwan depression, offshore Bohai Bay basin[J]. *Geoscience*, 2013, 27(5): 999–1004.
- [23] 徐长贵, 余一欣, 吴奎, 等. 渤海辽东湾坳陷断裂联接及其控油气作用[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(4): 456–462.
- Xu Changgui, Yu Yixin, Wu Kui, et al. Fault linkages and their control on hydrocarbon accumulation in the Liaodongwan depression, offshore Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(4): 456–462.
- [24] 黄雷, 周心怀, 刘池洋, 等. 渤海海域新生代盆地演化的重要转折期—证据及区域动力学分析[J]. *中国科学(D辑)*, 2012, 42(6): 893–904.
- Huang Lei, Zhou Xinhui, Liu Chiyang, et al. The important turning points during evolution of Cenozoic basin offshore the Bohai Sea: Evidence and regional dynamics analysis[J]. *Science in China (Series D)*, 2012, 42(6): 893–904.
- [25] 徐杰, 马宗晋, 陈国光, 等. 中国大陆东部新构造期北西向断裂带的初步探讨[J]. *地学前缘*, 2003, 10(特刊): 193–198.
- Xu Jie, Ma Zongjin, Chen Guoguang, et al. NW trending active fault zones of the eastern Chinese continent in Neotectonic time[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(Suppl): 193–198.
- [26] 蔡东升, 罗毓晖, 姚长华. 渤海莱州湾走滑拉分凹陷的构造研究及其石油勘探意义[J]. *石油学报*, 2001, 22(2): 19–25.
- Cai Dongsheng, Luo Yuhui, Yao Changhua. Strike-slip and pull-apart structures study and its significance to petroleum exploration on Laizhouwan sag, Bohai area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(2): 19–25.
- [27] Ferrill D A, Morris A P, McGinnis R N. Crossing conjugate normal faults in field exposures and seismic data[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(11): 1471–1488.
- [28] 余一欣, 周心怀, 汤良杰, 等. 渤海湾地区 X 型正断层及油气意义[J]. *地质学报*, 2009, 83(8): 1083–1088.
- Zhou Xinhui, Yu Yixin, Tang Liangjie, et al. X-pattern normal faults in the offshore Bohai Bay basin and its significance on hydrocarbon[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(8): 1083–1088.

(编辑 董立)