

## 渤海辽东湾坳陷走滑断裂差异变形特征

余一欣<sup>1,2</sup>,周心怀<sup>3</sup>,徐长贵<sup>3</sup>,吴奎<sup>3</sup>,柳屿博<sup>3</sup>,杨克基<sup>1</sup>,周鑫<sup>3</sup>

[1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; 2. 中国石油大学 盆地与油藏研究中心,北京 102249; 3. 中海石油(中国)有限公司 天津分公司,天津 300452]

**摘要:**走滑断裂是渤海辽东湾坳陷内的一类重要断裂,属于郯庐断裂带的组成部分,对辽东湾坳陷的地质结构和油气成藏都产生了重要影响。通过三维地震资料精细解释,揭示了辽东湾坳陷走滑断裂带的空间展布和分段差异变形特征。走滑断裂主要分布在辽东和辽中地区,总体呈北东走向,连续性较好,在剖面上发育花状构造,在平面上发育走滑双重构造和伸展叠瓦扇构造。通过对比不同地区走滑断裂带的变形特点,可以发现走滑断裂带具有明显的分段差异变形特征。总体上,可将辽东和辽中地区的走滑断裂带划分为南部的压扭段和北部的凸起段两大段,而且凸起段还可进一步根据凸起发育特征细分为复合凸起段、隐伏凸起段和单一凸起段。辽东凸起的形成主要受走滑断裂带的压扭性活动影响,而辽西凸起的形成主要是受地幔上隆导致的伸展作用控制,开始隆升的时间也早于辽东凸起。

**关键词:**分段差异变形;走滑断裂;郯庐断裂带;辽东凸起;辽东湾坳陷

**中图分类号:**TE121.2

**文献标识码:**A

## Differential deformation of strike slip faults in the Liaodongwan Depression, offshore Bohai Bay Basin

Yu Yixin<sup>1,2</sup>, Zhou Xinhui<sup>3</sup>, Xu Changgui<sup>3</sup>, Wu Kui<sup>3</sup>, Liu Yubo<sup>3</sup>, Yang Keji<sup>1</sup>, Zhou Xin<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Tianjin Branch of CNOOC China Ltd., Tianjin 300452, China)

**Abstract:** As an important fault type in the Liaodongwan Depression, strike slip faults are components of the Tan-Lu fault zone, and they have exerted major influences on the structural framework and hydrocarbon accumulation in the depression. Based on detailed 3D seismic interpretation, this paper reveals the spatial distribution and segmented differential deformation characteristics of the strike slip faults in the Liaodongwan Depression. The strike slip faults mainly occur in the eastern and central Liaodongwan Depression, trend northeast as a whole, and have good continuity. They appear as flower structures on sectional view, while appear as strike slip duplex and imbricated structures on plane view. Comparison of deformation features of strike slip faults in different areas shows that the strike slip fault zone features in obvious segmented differential deformation. The strike slip faults can be divided into two segments, namely transpressional segment in the south and uplifting segment in the north. The uplifting segment can be subdivided into complex-uplifting, buried-uplifting and single-uplifting segments according to the shapes of the uplift. The development of the Liaodong uplift was mainly controlled by the transpressional movement of the strike slip faults, but the Liaoxi uplift with earlier initiation of uplifting was influenced by extensional stresses resulted from mantle uplifting.

**Key words:** segmented differential deformation, strike slip fault, Tan-Lu fault zone, Liaodong Uplift, Liaodongwan Depression

位于渤海海域最北端的辽东湾坳陷是渤海地区重要的油气产区和有利探区之一,最近几年由于地质认识的重要突破,相继发现了JZ25-1S, JX1-1, LD5-2和LD6-2等多个亿吨级油气田。郯庐走滑断裂带从渤海湾盆地东侧通过,受其影响,辽东湾坳陷走滑断裂发育<sup>[1-5]</sup>,并表现出一定的分段差异变形特征<sup>[6-7]</sup>。

前人根据地震资料和构造物理模拟实验等方面的证据,针对走滑断裂对辽东湾坳陷构造格局和地层沉积的影响开展了较深入的研究工作<sup>[1,8-11]</sup>,同时还探讨了走滑断裂的相互联接作用方式及其对油气聚集成藏的影响<sup>[12-14]</sup>。但目前对辽东湾坳陷内走滑断裂的具体展布位置、差异变形的表现形式及其分段边界等仍

收稿日期:2014-06-25;修订日期:2014-08-12。

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

基金项目:国家自然科学基金项目(41472117, 91114202);国家科技重大专项(2011ZX05002-006, 2011ZX05031-001, 2011ZX05029-002);中国石油大学(北京)基金项目(KYJJ2012-01-11)。

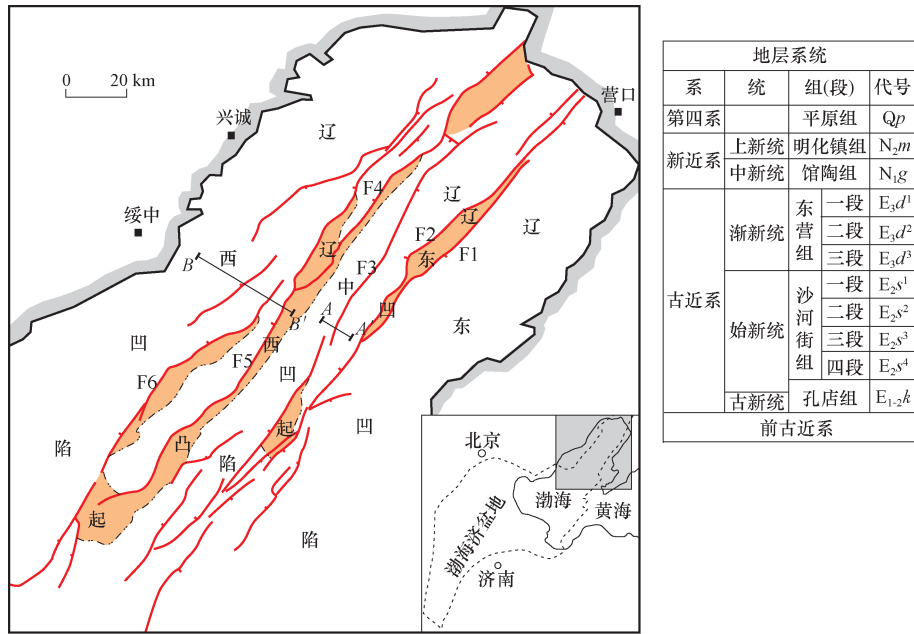


图 1 渤海辽东湾拗陷构造纲要和地层系统

Fig. 1 Simplified map showing structural framework and stratigraphic systems of the Liaodongwan Depression

F1. 辽东 1 号断裂; F2. 辽东 2 号断裂; F3. 辽中 1 号断裂; F4. 辽西 2 号断裂; F5. 辽西 1 号断裂; F6. 辽西 3 号断裂

存在较多争议。本文主要是在前人工作基础之上,通过对最新的高质量连片三维地震资料进行精细解释,进一步明确辽东湾拗陷走滑断裂的空间展布和分段差异变形特征及其分段边界,并简要分析走滑断裂对辽东湾拗陷结构的影响,这对深入认识辽东湾拗陷的油气富集规律和明确下一步油气勘探方向都具有重要意义。

## 1 地质概况

渤海湾盆地位于我国东部沿海地区,是一个发育在华北地台古生界盖层之上的中、新生代板内裂谷盆地<sup>[15]</sup>。渤海湾盆地包括陆地和海域两部分,辽东湾拗陷位于渤海海域的最北端,处于秦皇岛—旅顺一线以北地区,整体呈 NE 走向的倒“U”字形,面积约  $3 \times 10^4 \text{ km}^2$  (图 1)。辽东湾拗陷是渤海湾盆地辽河—辽东湾拗陷在海域的自然延伸,拗陷内新生代地层发育齐全,主要包括同裂谷期层序(古近系孔店组、沙河街组和东营组)和后裂谷期层序(新近系馆陶组、明化镇组和第四系平原组),其中东营组和沙河街组是主要的勘探目的层系(图 1)。

辽东湾拗陷馆陶组以下地层中断裂发育,性质复杂,包括走滑断裂、伸展断裂和伸展—走滑复合断裂等<sup>[5]</sup>。辽东湾拗陷内的主干断裂包括辽东 1 号断裂、辽东 2 号断裂、辽中 1 号断裂、辽西 2 号断裂、辽西 1 号断裂和辽西 3 号断裂等,这些主干断裂均呈 NE 向展布,连续性较好,延伸较长,将拗陷自东向西分隔为辽东凹陷、辽东凸起、辽中凹陷、辽西凸起和辽西凹陷等多个在平面上相间排列的次级构造单元。其中辽东

凸起断续分布,可分为南、北两部分,而辽西凸起则是连续分布(图 1)。

## 2 走滑断裂分布特征

地震资料解释结果表明,走滑断裂是辽东湾拗陷内的一类主要断裂,但主要集中分布在辽中 1 号断裂以东地区,如辽中 1 号断裂、辽东 1 号断裂和辽东 2 号断裂等都属于典型的走滑断裂。这些主干走滑断裂在剖面上多近直立,在浅层发育多条分支断裂,在部分地区表现出典型的花状构造特征(图 2),在平面上还发育走滑双重构造和伸展叠瓦扇构造<sup>[16]</sup>。因此,从断裂性质来看,辽东和辽中地区的这些走滑断裂都是属于郯庐走滑断裂带的组成部分是确定无疑的。

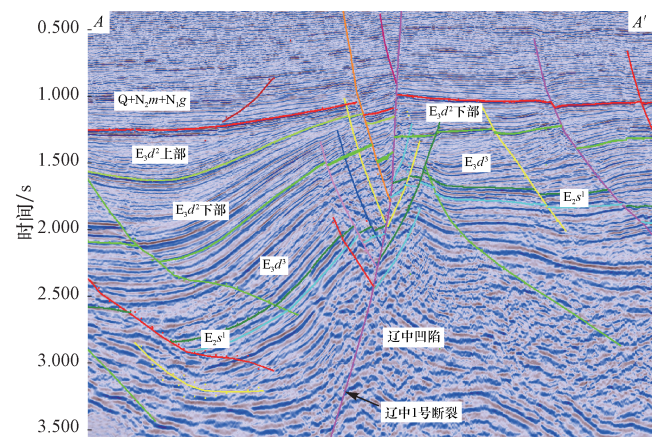


图 2 辽东湾拗陷典型走滑断裂特征(剖面位置见图 1)

Fig. 2 Typical strike slip faults in the Liaodongwan depression (see Fig. 1 for the section location)



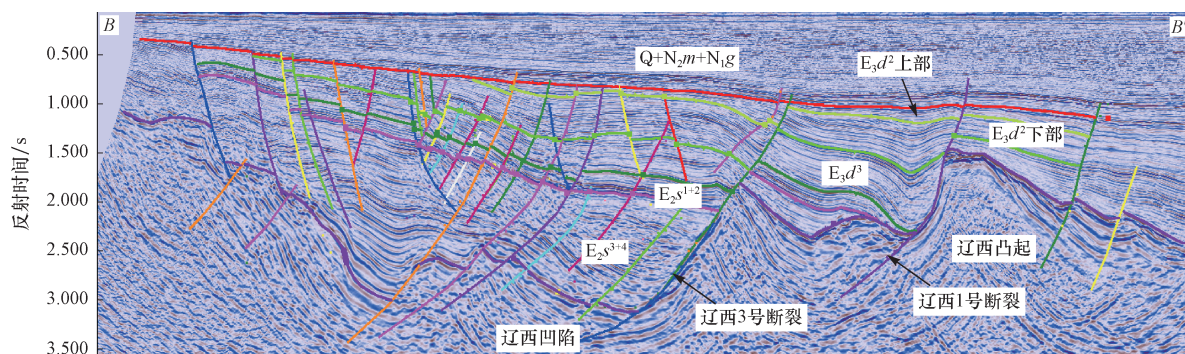


图3 辽西地区伸展断裂特征(剖面位置见图1)

Fig. 3 Normal faults in the western Liaodongwan Depression (see Fig. 1 for the section location)

与辽东和辽中地区相比,辽西地区大多数断裂以伸展性质为主,仅在局部地区发育少量走滑断裂。辽西地区的伸展断裂在剖面上多表现为上陡下缓的铲式正断层特征,局部地区规模较大的伸展断裂的上盘也发育一些分支断裂,而且这些分支断层基本都未断穿馆陶组底面,与主干伸展断裂一起组成“似花状”构造(图3)。这也表明辽西地区的部分伸展断裂在晚期受东部郯庐断裂带走滑作用的影响,可能在后期叠加了一定的走滑作用,从而具有伸展-走滑复合性质。因此,从断裂变形特征和形成机制来看,将辽西地区的主干伸展断裂也看成是郯庐走滑断裂带的组成部分并不合适。实际上,这些断裂的形成主要是受地幔上隆导致的伸展作用所控制,只是局部地区在晚期受到郯庐断裂带走滑作用的影响而发育少量规模较小的走滑断裂而已。

### 3 走滑断裂差异变形特征

辽东和辽中地区的断裂都属于郯庐断裂带的组成部分,不仅表现出典型的走滑性质,而且还具有明显的分段差异变形特征。根据断裂整体变形及其内部地层隆起特征的差异性,可以将这些主干走滑断裂带划分为两大段,即南部的压扭段和北部的凸起段,其中北部的凸起段还可进一步根据凸起发育特征细分为复合凸起段、隐伏凸起段和单一凸起段(图4)。

压扭段位于辽东凸起以南地区,主干走滑断裂呈“S”型弯曲展布,受右行走滑作用影响,断裂弯曲部位形成局部挤压作用区,从而形成压扭构造带。但由于压扭作用整体较北部辽东凸起区弱,导致地层隆起幅度不如辽东凸起区明显,沙河街组和东营组保存较全,在LD27-22构造带表现最为典型(图5)。LD27-22构造带位于辽东湾坳陷向渤中坳陷过渡的地区,也正是走滑断裂带的拐弯部位(图4)。该构造带东、西两侧被两条走滑断裂带夹持,深部的中生界底界明显向下凸出,而中、浅层的地层则向上凸出。而且随着东、

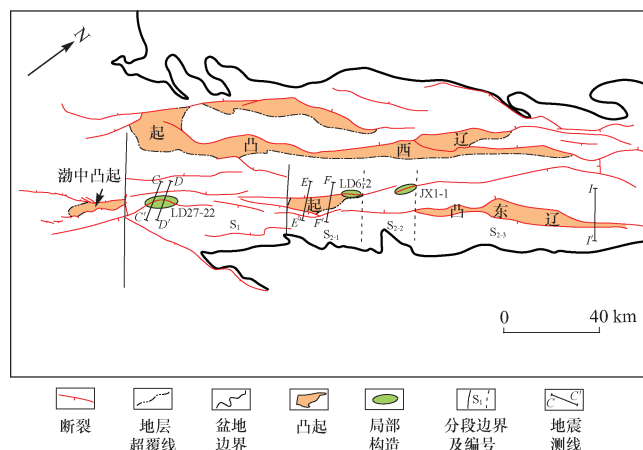


图4 辽东湾坳陷东部走滑断裂分段示意图

Fig. 4 Schematic map showing segments of strike slip faults in the eastern Liaodongwan Depression

S<sub>1</sub>: 压扭段; S<sub>2-1</sub>: 复合凸起段; S<sub>2-2</sub>: 隐伏凸起段; S<sub>2-3</sub>: 单一凸起段

西两条边界走滑断裂带的间距向北逐渐减小,压扭构造带的隆起幅度也随之增强(图5)。

北部凸起段基本与辽东凸起的发育位置相对应,走滑断裂整体沿NE向线性延伸,局部呈“S”型弯曲,分东、西两支夹持辽东凸起(图4)。凸起段内深层断裂体系发育,而馆陶组及以上地层内断裂较少。根据走滑断裂控制的辽东凸起发育特征,进一步将凸起段细分为复合凸起段、隐伏凸起段和单一凸起段(图4)。

复合凸起段位于辽东凸起南半部分,辽东1号断裂和辽中1号断裂充当辽东凸起的东、西边界。辽中1号断裂在平面上比较平直,旁侧次级断裂发育,而辽东1号断裂弯曲展布。在剖面上,这两条断裂形态都较简单(图6)。此段内的辽东凸起地层剥蚀严重,并由两个断块体(图6中的断块体A和B)复合而成,其中西侧的断块体形态基本保持不变,而东侧的断块体规模向北逐渐变小,断块体的旋转作用则造成地层的强烈掀斜(图6)。

隐伏凸起段位于LD6-2油田和JX1-1油田之间,辽东凸起呈隐伏状态(图4)。辽中1号断裂表现出明显的走滑断裂特征,发育平面上的走滑双重构造



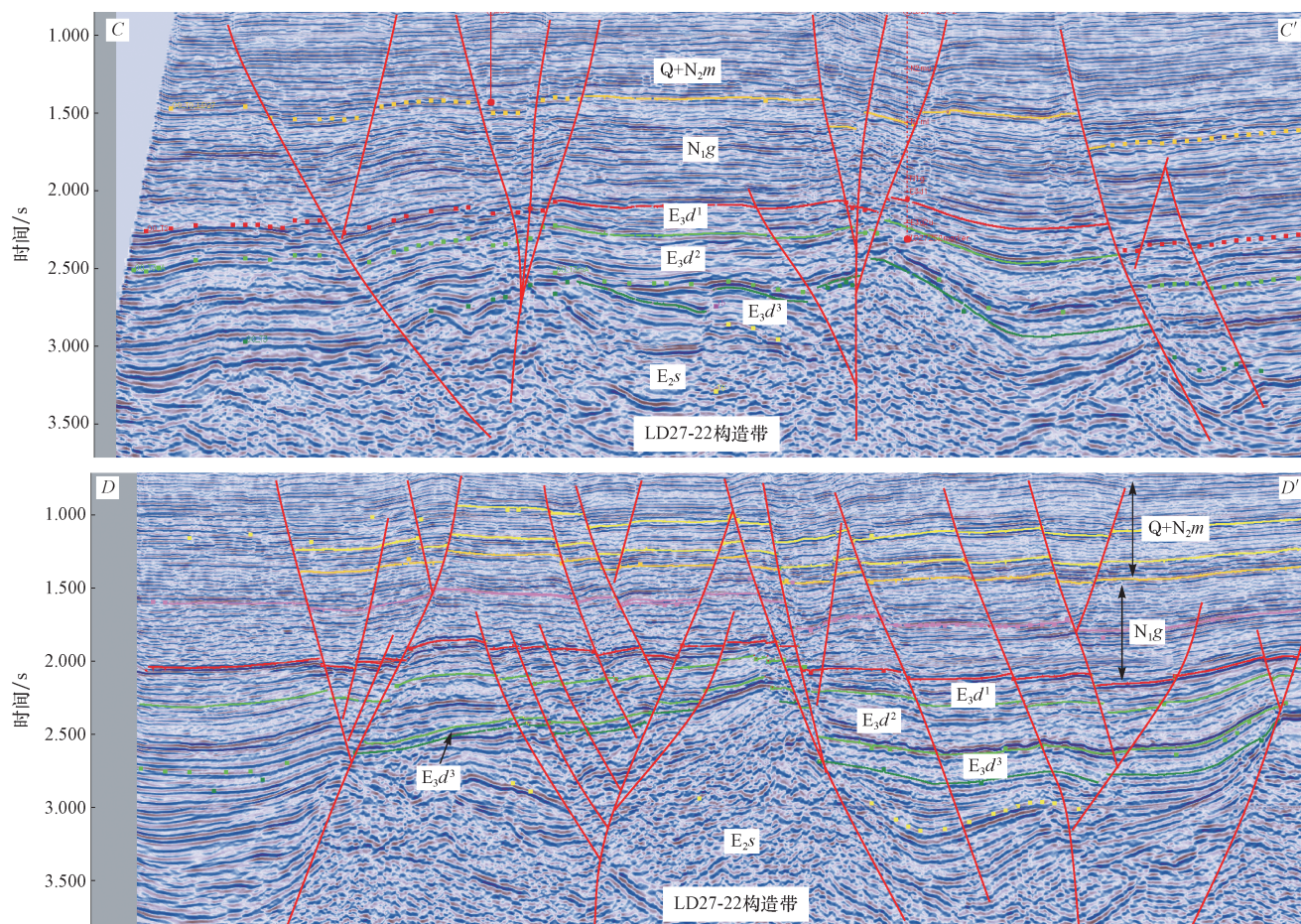


图5 辽东湾拗陷走滑断裂压扭段特征(剖面位置见图4)

Fig. 5 Transpressional segments of strike slip faults in the eastern Liaodongwan Depression(see Fig. 4 for the section location)

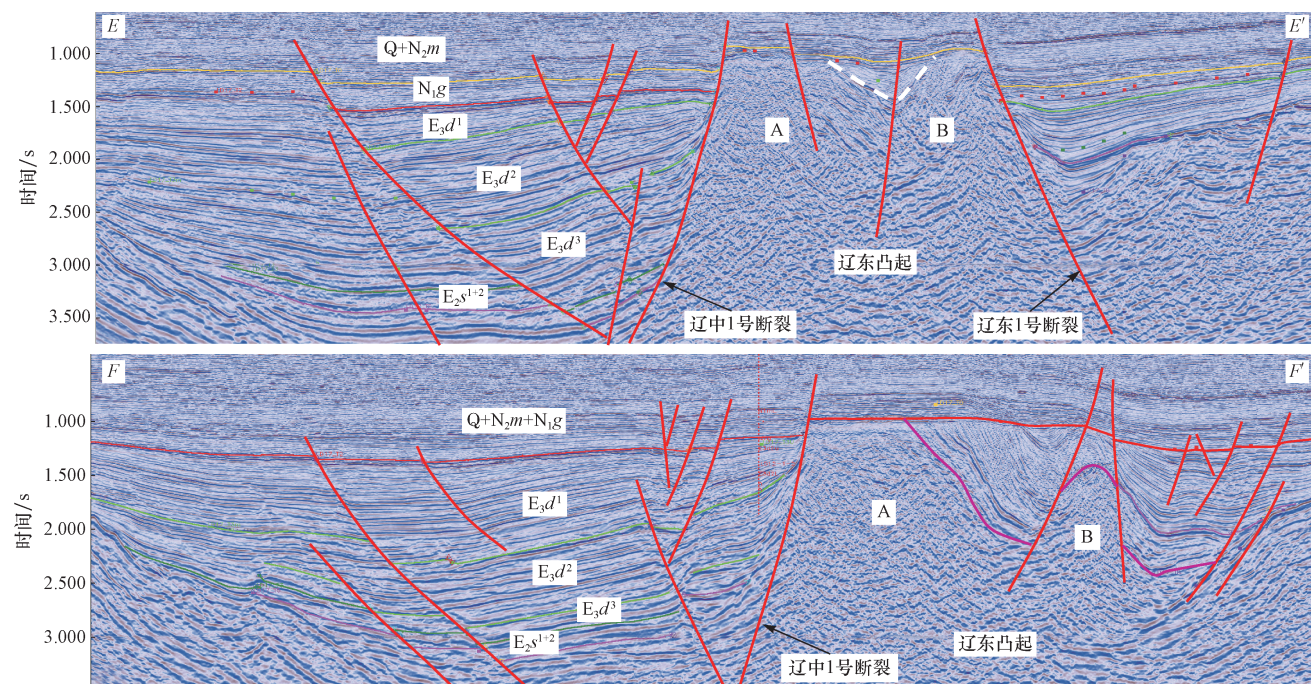


图6 辽东湾拗陷走滑断裂复合凸起段特征(剖面位置见图4)

Fig. 6 Complex-uplifting segments of strike slip faults in the eastern Liaodongwan Depression(see Fig. 4 for the section location)

和伸展叠瓦扇构造以及剖面上的花状构造,旁侧次级断裂较少(图7,图8)。辽中1号断裂的走滑作用还在

JX1-1地区形成了“鱼跃式”砂体发育模式<sup>[11]</sup>。辽东1号走滑断裂在剖面上也形成负花状构造,但分支断



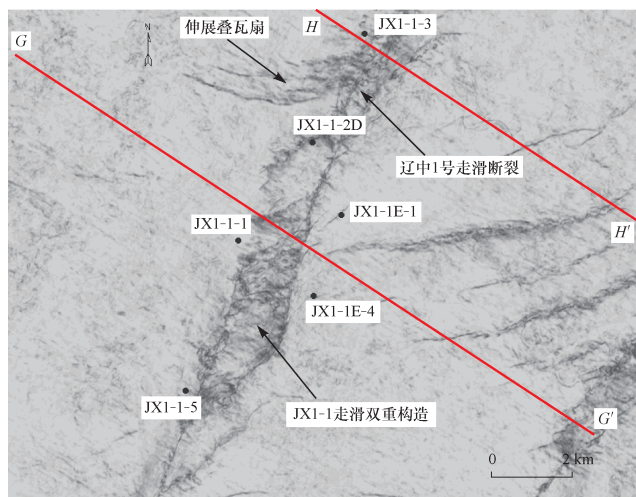


图7 JX1-1构造及邻区方差切片(1 000 ms)

Fig. 7 Time slice of the JX1-1 and adjacent areas in the Liaodongwan Depression

裂一般未断穿馆陶组底界,而且花状构造内部的地层即使是在相邻的地区也表现出不同的背斜和向斜形态(图8)。此外,辽中1号断裂和辽东1号断裂的走滑活动对断裂带之间的地层沉积的影响也不一样,如JX1-1构造南部两条走滑断裂之间深部的东营组和沙河街组向东倾斜,而北部相邻不远处两条走滑断裂之间的相应地层则向西倾斜(图8)。这也是辽东湾坳陷走滑断裂分段差异变形的重要表现之一。

单一凸起段位于辽东凸起北半部分,辽东凸起被辽东1号断裂和辽东2号断裂夹持(图4)。在平面上,东侧的辽东1号断裂较平直,连续性较好,而西侧的辽东2号断裂呈明显的“S”型弯曲,旁侧的圈闭规模较大,浅层发育一些呈雁列式展布的次级断裂。在剖面上,这两条边界走滑断裂都是近直立发育,但花状构造特征不明显,辽东凸起由单一的断块体组成(图9)。

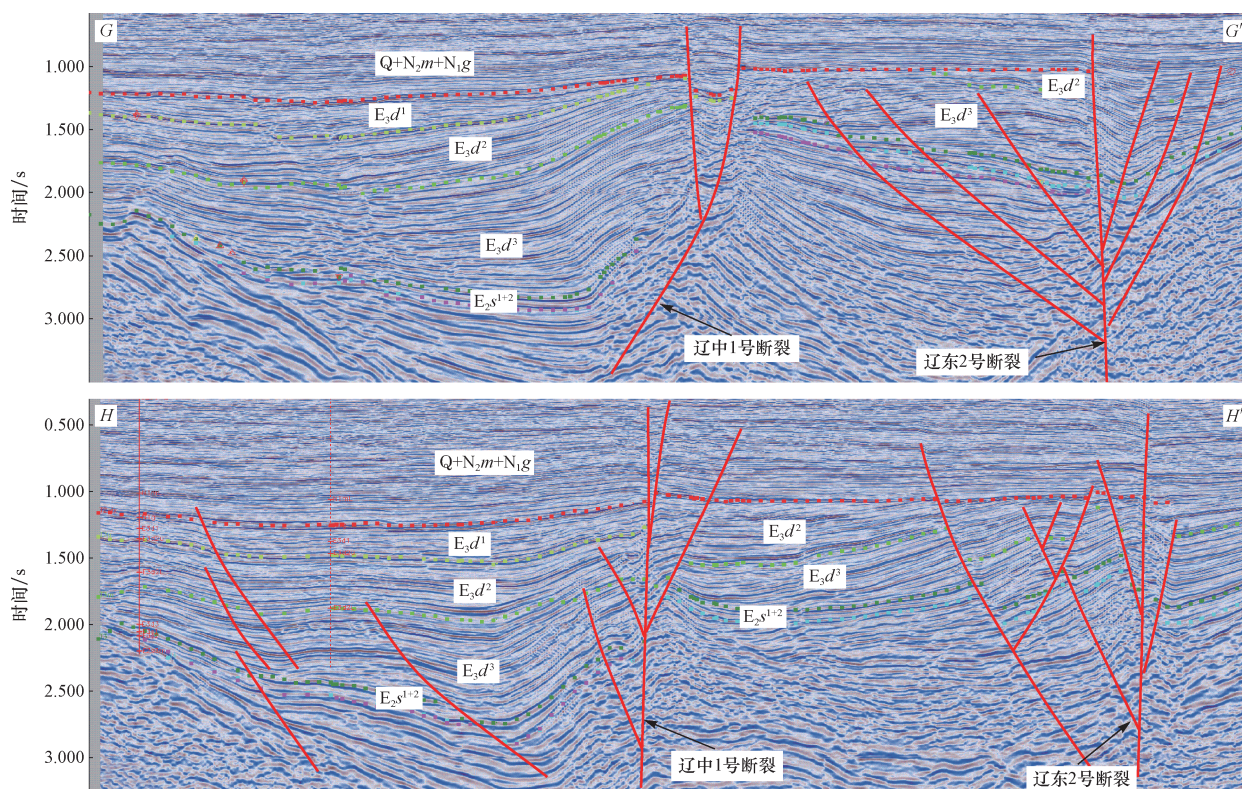


图8 辽东地区隐伏凸起段走滑断裂特征(剖面位置见图7)

Fig. 8 Buried-uplifting segments of strike slip faults in the eastern Liaodongwan Depression(see Fig. 7 for the section location)

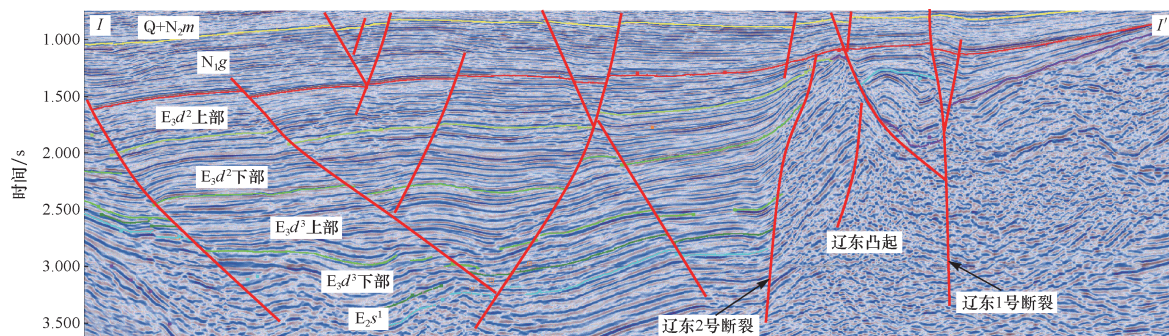


图9 辽东地区单一凸起段走滑断裂特征(剖面位置见图4)

Fig. 9 Single-uplifting segment of strike slip faults in the eastern Liaodongwan Depression(see Fig. 4 for the section location)



## 4 走滑断裂对拗陷结构的影响

如前所述,渤海辽东湾拗陷的主干走滑断裂主要分布在辽东和辽中地区,这些走滑断裂带不仅具有明显的分段差异变形特征,同时还影响了辽东湾拗陷的整体结构特征。通过对比分析辽东凸起和辽西凸起的结构及其演化特征,可以发现走滑断裂在辽东凸起的形成过程中起到了重要作用。

辽东凸起整体被辽中1号断裂、辽东1号断裂和辽东2号断裂等主干走滑断裂带所围限,凸起边界均为双断式(图6,图9)。辽东凸起在平面上也不是连续发育,而是呈串珠状断续分布,而且这种串珠状凸起的发育可以一直向南延伸到渤中凸起(图4)。这在一定程度上也反映了辽东凸起和渤中凸起的形成与走滑断裂带的活动密切相关,应该是郯庐走滑断裂带内部的压扭构造带。边界走滑断裂带之间的距离及走滑活动的强度决定了凸起的隆起幅度,如压扭作用较弱的地区,就形成了深部地层保存较完整的LD27-22压扭构造带,而压扭作用较强的地区则形成了隆起幅度较高、地层剥蚀较严重的辽东凸起。而且从残余地层的分布特征来看,辽东凸起在早期并未发育,也未起到分隔辽东凹陷和辽中凹陷的作用,只是后期随着郯庐断裂带右行走滑活动的发生而逐渐发育起来。

辽西凸起在平面上呈北东向连续展布,并只有东侧边界受断层控制,而且控制凸起东侧边界的主干断裂在剖面上都呈上陡下缓的铲式正断层形态,辽西凹陷为一个箕状半地堑(图3)。这就说明辽西凸起的形成主要受地幔上隆所导致的北西-南东向伸展作用控制,而且形成应该早于辽东凸起<sup>[1]</sup>。因此,辽西凸起是一个先成凸起,而辽东凸起则是一个后成凸起,而且两个凸起的形成机制也不一样。

## 5 结论

1) 走滑断裂是渤海辽东湾拗陷内的一类重要断裂,主要分布在辽东和辽中地区,都属于郯庐走滑断裂带的重要组成部分。而辽西地区的主干断裂多是上陡下缓的铲式正断层,仅在局部地区受郯庐断裂带走滑作用影响而发育少量具有走滑性质的断层。

2) 辽东湾拗陷内的走滑断裂具有明显的分段差异变形特征,可分为压扭段和凸起段两大段,其中凸起段还可进一步细分为复合凸起段、隐伏凸起段和单一凸起段。

3) 辽东凸起是郯庐走滑断裂带内部的压扭构造带,其形成主要受走滑断裂带活动影响。而辽西凸起

的形成主要是受地幔上隆导致的伸展作用影响,开始发育的时间也早于辽东凸起。

## 参 考 文 献

- [1] 王国纯. 郯庐断裂与渤海海域反转构造及花状构造[J]. 中国海上油气(地质), 1998, 12(5): 289-295.  
Wang Guochun. Relationship of Tanlu fault to the inversion and flower structures in Bohai Bay[J]. China Offshore Oil and Gas(Geology), 1998, 12(5): 289-295.
- [2] 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.
- [3] Chen Shuping, Zhou Xinhui, Tang Liangjie, et al. Wrench-related folding: A case study of Bohai Sea basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(1): 179-190.
- [4] Qi Jiafu, Yang Qiao. Cenozoic structural deformation and dynamic processes of the Bohai Bay basin province, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(4): 757-771.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 柳永军, 朱文森, 杜晓峰, 等. 渤海海域辽中凹陷走滑断裂分段性及其对油气成藏的影响[J]. 石油与天然气学报, 2012, 34(7): 6-10.  
Liu Yongjun, Zhu Wensen, Du Xiaofeng, et al. Strike-slip fault subsections and its influence on hydrocarbon accumulation in Liaozhong depression of Bohai Sea area[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(7): 6-10.
- [8] 曹忠祥, 任凤楼, 宋国奇, 等. 营口-潍坊断裂带对辽东湾拗陷东部凸起的形成及构造分段的控制作用—来自物理模拟实验和断层几何学特征的证据[J]. 地质科学, 2008, 43(2): 238-250.  
Cao Zhongxiang, Ren Fenglou, Song Guoqi, et al. Formation and segmentation of the East Rise, Liaodong Bay Depression controlled by the Yingkou-Weifang fault zone: Evidence from physical modeling and structural geometry[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(2): 238-250.
- [9] 杨桥, 魏刚, 马宝军, 等. 郯庐断裂带辽东湾段新生代右旋走滑变形及其模拟实验[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 483-489.  
Yang Qiao, Wei Gang, Ma Baojun, et al. Characteristics and modeling of the Cenozoic right-lateral slip deformation in the Liaodong Bay segment of the Tan-Lu fault zone[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 483-489.
- [10] Hsiao L Y, Graham S A, Tilander N. Stratigraphy and sedimentation in a rift basin modified by synchronous strike-slip deformation: southern Xialiao basin, Bohai, offshore China[J]. Basin Research, 2010,



- 22(1):61-78.
- [11] 徐长贵. 陆相断陷盆地源-汇时空耦合控砂原理:基本思想、概念体系及控砂模式[J]. 中国海上油气, 2013, 25(4):1-11.  
Xu Changgui. Controlling sand principle of source-sink coupling in time and space in continental rift basin: basic idea, conceptual systems and controlling sand models[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(4):1-11.
- [12] 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.
- [13] 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 off shore of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(6):837-840.
- [14] 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.  
Yu Yixin, Zhou Xinhui, 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.
- [15] 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.
- [16] 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.

(编辑 董立)

(上接第631页)

- [32] 徐国盛, 袁海峰, 马永生, 等. 川中-川东南地区震旦系-下古生界沥青来源及成烃演化[J]. 地质学报, 2007, 81(8):1143-1152.  
Xu Guosheng, Yuan Haifeng, Ma Yongsheng, et al. The source of Sinian and Lower Palaeozoic bitumen and hydrocarbon evolution in the middle and southeast of the Sichuan basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8):1143-1152.
- [33] 黄文明. 四川盆地地下古生界油气地质条件及勘探前景[D]. 成都理工大学, 2011.  
Huang Wenming. Petroleum geological conditions and exploration prospects of Lower Paleozoic in Sichuan basin[D]. Chengdu University of Technology, 2011.
- [34] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. TSR对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造——四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式[J]. 岩石学报, 2006, 22(8):2182-2194.  
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR: an important type of deep buried high quality carbonate reservoirs in Sichuan basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8):2182-2194.
- [35] Cai C F, Xie Z Y, Worden R H, et al. Methane-dominated thermochemical sulphate reduction in the Triassic Feixianguan Formation in East Sichuan Basin, China: toward prediction of fatal H<sub>2</sub>S concentrations[J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(1):1265-1279.
- [36] 马永生, 郭彤楼, 朱光有, 等. 硫化氢对碳酸盐岩储层溶蚀改造作用的模拟实验证据——以川东飞仙关组为例[J]. 科学通报, 2007, 52(1):178-183.  
Ma Yongsheng, Guo Tonglou, Zhu Guangyou, et al. Simulated experiment evidences of the corrosion and reform actions of H<sub>2</sub>S to carbonate reservoirs: an example of Feixianguan Formation, East Sichuan[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(1):178-183.
- [37] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地威远气田硫化氢的成因及其证据[J]. 科学通报, 2006, 51(23):2780-2788.  
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. The genesis of H<sub>2</sub>S in the Weiyuan gas field, Sichuan Basin and its evidence[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(23):2780-2788.
- [38] 黄文明, 刘树根, 马文辛, 等. 四川盆地奥陶系油气勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3):461-473.  
Huang Wenming, Liu Shugen, Ma Wenxin, et al. Petroleum exploration potential of the Ordovician in the Sichuan basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3):461-473.
- [39] 刘晓峰, 解习农. 与盐构造相关的流体流动和油气运聚[J]. 地学前缘, 2001, 8(4):343-349.  
Liu Xiaofeng, Xie Xinong. Fluid flow, hydrocarbon migration and accumulation associated with salt structure[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(4):343-349.
- [40] 聂明龙, 吴蕾, 孙林, 等. 阿姆河盆地查尔朱阶地及邻区盐相关断裂特征与油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6):803-808.  
Nie Minglong, Wu lei, Sun lin, et al. Salt-related fault characteristics and their petroleum geological significance in Zarzhu terrace and its adjacent areas, the Amu Darya Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6):803-808.

(编辑 李军)