

郯庐断裂带辽东湾段变形特征及展布规律

牛成民¹, 杨海风¹, 郭涛¹, 李伟^{2,3}, 吴智平^{2,3}

[1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459; 2. 山东省深层油气重点实验室, 山东 青岛 266580;
3. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛, 266580]

摘要:基于最新的大连片三维地震处理资料,对辽东湾坳陷主走滑断裂进行了系统判识,进一步结合前人研究成果探讨了辽东湾坳陷郯庐断裂带的分支组成与展布规律。结果表明,辽东湾坳陷郯庐断裂带应发育3条(组)分支断裂,东支发育在辽东地区,为辽东1号断裂;中支发育在辽中地区,新生界断裂为辽中1号和辽中2号断裂,在深层两条断裂合并为一条主走滑断裂;西支位于在辽西地区西部斜坡位置,新生界断裂为辽西走滑断裂。3条(组)分支断层均切割至深部基底,并可到达莫霍面,在重力异常图上具有明显的体现。辽东湾坳陷3条(组)郯庐断裂带分支断层构造变形特征存在明显差异,与渤海海域渤中-渤东段、渤南段也存在显著差异,走滑程度的强弱、先存断层的复活、地层厚度与岩性特征,以及基底性质的差异是造成这种差异性的主要原因。

关键词:构造特征;展布规律;重力异常;走滑断裂;郯庐断裂带;辽东湾坳陷

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Deformation characteristics and distribution of Tan-Lu fault zone in Liaodong Bay Depression

Niu Chengmin¹, Yang Haifeng¹, Guo Tao¹, Li Wei^{2,3}, Wu Zhiping^{2,3}

[1. Tianjin Technical Department of CNOOC, Tianjin 300459, China;

2. Key Laboratory of Deep Oil and Gas, Qingdao, Shandong 266580, China;

3. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China]

Abstract: Based on the recent 3D seismic interpretation of the Liaodong Bay Depression, we systematically identify the main strike-slip faults, and further discuss the branches and distribution pattern of the Tan-Lu fault zone in the depression in combination with previous research achievements. The results show that there are three (group) branch faults in the Tan-Lu fault zone: the east branch is located in Liaodong area, labeled as No. 1 Liaodong fault; the middle branch is developed in Liaozhong area, including the Cenozoic branches of No. 1 and No. 2 Liaozhong faults, which have got merged into one major strike-slip fault in the deep layer; the west branch is located in the western slope of Liaoxi area, the Cenozoic Liaoxi strike-slip fault. The three (group) branch faults root in the deep basement and even the Mohorovicic discontinuity, as obviously manifested on the gravity anomaly. There are significant differences in the structural deformation characteristics of the three branch faults in the Liaodong Bay Depression, and they are also significantly different from the Bozhong-Bodong section and Bonan section of the Bohai Sea, mainly resulting from the extent of strike-slip, reactivity of previous faults, thickness and lithology of strata and the property of basement.

Key words: structural characteristics, distribution pattern, gravity anomaly, strike-slip fault, Tan-Lu fault zone, Liaodong Bay Depression

引用格式:牛成民,杨海风,郭涛,等. 郯庐断裂带辽东湾段变形特征及展布规律[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 265-276. DOI: 10.11743/ogg20220202.

Niu Chengmin, Yang Haifeng, Guo Tao, et al. Deformation characteristics and distribution of Tan-Lu fault zone in Liaodong Bay Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 265-276. DOI: 10.11743/ogg20220202.

收稿日期:2020-11-22;修订日期:2022-01-21。

第一作者简介:牛成民(1966—),男,教授级高级工程师,油气地质勘探。E-mail: niuchm@cnooc.com.cn。

通讯作者简介:李伟(1978—),男,副教授,含油气盆地构造分析。E-mail: 20070017@upc.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05006-007);中海石油(中国)有限公司综合科研项目(YXKY-2017-TJ-01)。

郯庐断裂带作为中国三大巨型走滑断裂系统之一,发育于华北克拉通东部地区,由一系列平行或近平行的NNE向高角度基底断层(带)组成,沿断裂带发育一系列的中新生代盆地。郯庐断裂带自晚三叠世形成以来,经历了左旋走滑、伸展、挤压和右旋走滑等复杂的构造演化过程,现今表现为右旋走滑特征^[1]。前人依据郯庐断裂带所经过的构造单元、露头出露情况、断裂带特征和周缘盆地演化等,将其分为3段:南部的苏皖段、中部的山东段以及北部的沈阳-渤海段^[2-3]。郯庐断裂带贯穿渤海海域东部,长约450 km^[4],其演化对渤海海域东部盆地的形成、断裂演化、沉积充填和油气运聚等具有重要的控制作用。前人对渤海海域的郯庐断裂变形特征、展布规律、活动方式和控藏作用等进行了研究^[5-19],普遍认为受NW(W)向张家口-蓬莱断裂和秦皇岛-旅顺断裂的影响,在渤海海域郯庐断裂带又可以划分为辽东湾段、渤中-渤东段、渤南段3段,整体表现为自北向南断裂带变宽,主干走滑断裂数量增加的特征。

辽东湾坳陷是渤海海域东北部的含油气构造单元,前人对其断裂特征和构造演化过程和油气富集规律进行了大量的研究^[5,20-28],认为辽东湾坳陷发育走滑、伸展以及伸展-走滑复合3类断裂,且不同走向断裂具有不同的断裂性质,NNE向断裂走滑活动明显,NE向断裂以伸展-走滑性质为主,而近WE向断裂主要表现为伸展活动。尽管前人对辽东湾坳陷断裂特征进行了详细的分析,但是对于断裂的走滑活动方式仍然存在较大的争议,部分学者认为仅辽东湾坳陷东部的辽中2号断裂和辽东1号断裂是郯庐断裂带的主支^[4,16,23,29-30];也有学者认为NNE向主干断裂均为郯庐断裂带主支^[14,31]。除此之外,对郯庐断裂不同分支的断裂组合也存在着争议,其中胡惟等^[32]和詹润等^[33]认为辽东湾地区发育两条郯庐断裂的分支,西支位于辽西凸起的西界,东支位于辽东凸起的西界。整体而言,目前的研究对郯庐断裂带在辽东湾地区的发育特征及其展布规律已经取得了一定的成果认识,但就辽东湾地区郯庐断裂具体包含几条(组)分支断裂以及不同分支断裂间的组合关系尚存在争议。本文基于辽东湾坳陷最新的大连片三维地震处理资料,对辽东湾坳陷主走滑断裂的发育展布特征进行了系统研究,进一步结合前人研究成果探讨了辽东湾坳陷郯庐断裂带的分支组成与延伸关系。本文的研究有助于进一步明晰渤海海域郯庐断裂带的构造发育特征,为辽东湾坳陷盆地成因演化研究及油气勘探提供借鉴。

1 地质概况

辽东湾坳陷位于渤海海域东北部,西邻燕山褶皱带,东接胶辽隆起,南接渤中坳陷,整体呈NNE向的带状展布,构造上隶属于渤海湾盆地辽河坳陷的海域延伸部分^[2,25],郯庐断裂带自南向北贯穿整个辽东湾坳陷。依据坳陷内主干断裂发育及凹陷凸起分布,辽东湾坳陷又可以划分出辽西凹陷、辽西南凸起、辽西凸起、辽中凹陷、辽东凸起和辽东凹陷,整体呈“三凹夹三凸”的构造格局^[20-23,25-37](图1)。辽东湾坳陷内部新生代地层较全,包括古近系的孔店组(E_2k)、沙河街组(E_3s)和东营组(E_3d),新近系的馆陶组(N_1g)和明化镇组($N_{1-2}m$),以及第四系平原组(Qp)^[38]。

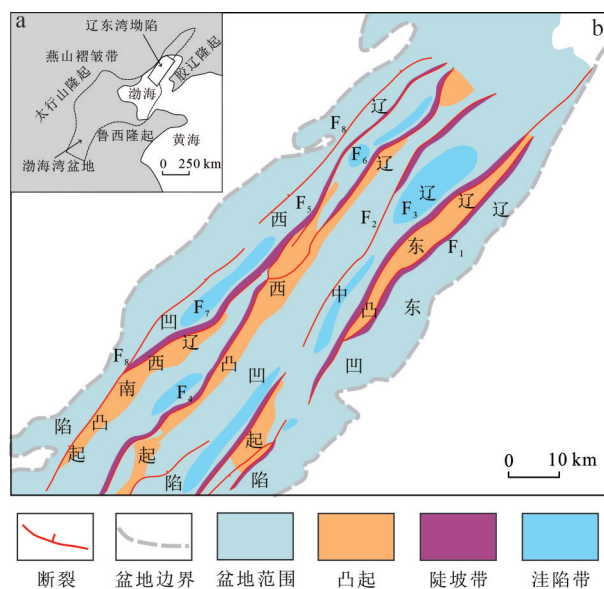


图1 辽东湾坳陷区域位置(a)和主要断裂展布及构造单元区划(b)

Fig. 1 Map showing the location (a) and distribution of main faults and structural units (b) in the Liaodong Bay Depression

F₁. 辽东1号断层; F₂. 辽中1号断层; F₃. 辽中2号断层;
F₄. 辽西1号断层; F₅. 辽西2号断层; F₆. 辽西3号断层;
F₇. 辽西南1号断层; F₈. 辽西走滑断裂

三维地震在辽东湾坳陷目前已基本实现了全覆盖,但以往的地震资料分为多个小工区,而且由于地震采集处理的时间和技术手段差异,导致了不同三维工区的构造和地层解释不一致、工区边界处反射特征不清,以及重叠部位存在多解性等问题,从而给地震解释和地质认识带来了困难,也制约了有利构造圈闭的发现。2014年中海石油天津分公司采用最新的技术手段对旧三维地震工区资料进行了重新统一连片处理,

面积超过 18 000 km²,大大降低了地质解释难度,也提高了解释的准确性。

2 辽东湾坳陷主走滑断裂发育特征

走滑断层的形成过程中断裂两盘地质体并非严格沿断裂走向移动,必然伴随断层倾向的滑动分量,因此自然界中并不存在严格意义上的“纯”走滑断裂^[39]。就辽东湾坳陷乃至整个渤海海域而言,走滑和伸展作用共同控制了新生代盆地的形成与演化,并由此导致了构造特征的复杂性和多样性,走滑断层判别和解释难度大。前人研究认为,剖面上断面直立、(似)花状构造,平面上发育雁列式、辫状或羽状等断裂组合,空间上发育的海豚效应和丝带效应等现象是走滑断裂的主要特征和标志^[7,39-42]。基于走滑断层的识别标志,利用新的大连片三维地震资料,本研究对辽东湾坳陷主走滑断裂进行了系统判别和解释,识别出了4条主走滑断裂。

2.1 辽东1号断裂

辽东1号断裂位于辽东湾坳陷东部,平面延伸130 km,为辽东凹陷的西界控凹断裂,同时控制了辽东凸起的形成演化过程。

平面上该断裂整体呈 NNE 走向,断裂连续,沿走向发生弱弯曲,古近系浅层整体连续性好且断裂带紧闭,深层北段断裂面依然较为紧闭,南部断裂带稍宽(图2a)。剖面上该断裂近于直立、倾角较陡,北段古

近系浅层次级断裂发育较少,表现为单一断裂,对辽东凹陷形成具有重要的控制作用(图2b);南段同样近于直立发育,但浅层次级断裂数量较多,与主断裂组合形成花状构造,并且切割了早期发育的辽中2号断裂,对辽东凹陷地层沉积的控制作用不明显(图2c)。

2.2 辽中1号断裂

辽中1号断裂位于辽东湾坳陷中部,延伸距离约125 km,北至辽东湾坳陷北部边界,最南端可延伸至辽中南洼内,贯穿整个辽中凹陷。

平面上该断裂整体呈 NNE 走向,沿走向弱弯曲,深、浅层断裂均清晰。剖面上整体表现为较为倾角较陡或近于直立断层,切割深度大,上部次级断裂较为发育,与主断裂共同组成花状构造或似花状构造。利用地震构造解释获取的断裂数据以及三维向不同方向的二维映射,本研究对辽中1号断裂倾向和倾角的定量属性进行了计算,其中倾角属性反映了断层的斜歪程度,能够进一步揭示断层走滑和拉张作用的强弱。辽中1号断裂整体产状较陡,近于垂直发育,体现出了明显的走滑特征(图3);而倾向具有由北向南由东倾转变为西倾再转变为东倾的特点,这种断裂倾向的变化正是走滑断裂所特有的“丝带效应”(图4a)。

根据断裂的倾向、构造样式特征以及走滑强度等方面的特征,可将辽中1号断裂分为北段、中段、南段以及辽中南洼段4段。北段主断裂附近次级断裂发育较多,与主断裂组合形成帚状断裂体系(图4b),剖面上断

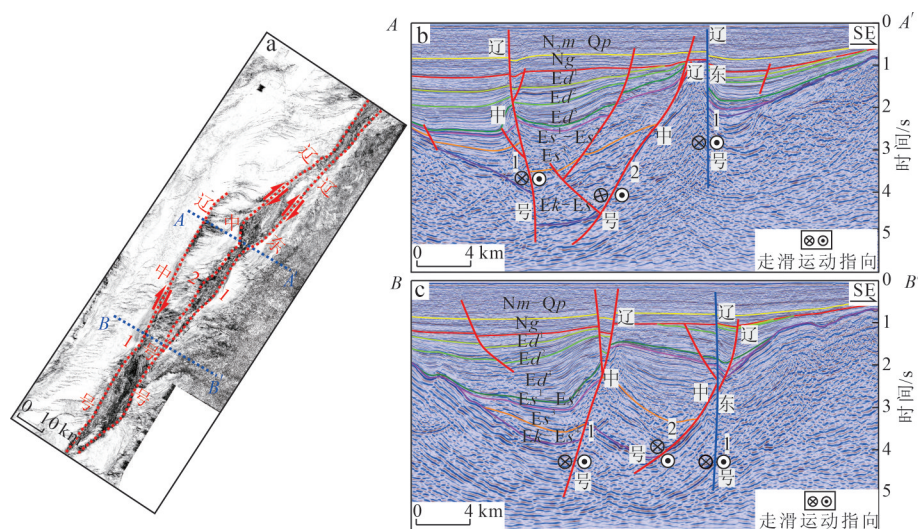


图2 辽东湾坳陷辽东1号断裂构造发育特征

Fig. 2 Structural development characteristics of No. 1 Liaodong fault in the Liaodong Bay Depression

a. 1400 ms 水平相干切片; b. 过辽东1号断裂北段地震剖面; c. 过辽东1号断裂南段地震剖面

Nm-Qp. 新近系明化镇组 and 第四系平原组; Ng. 新近系馆陶组; Ed¹. 古近系东一段; Ed². 古近系东二段; Ed³. 古近系东三段;

Es¹-Es² 古近系沙一段和沙二段; Es³. 古近系沙三段; Ek-Es⁴. 古近系孔店组和沙四段

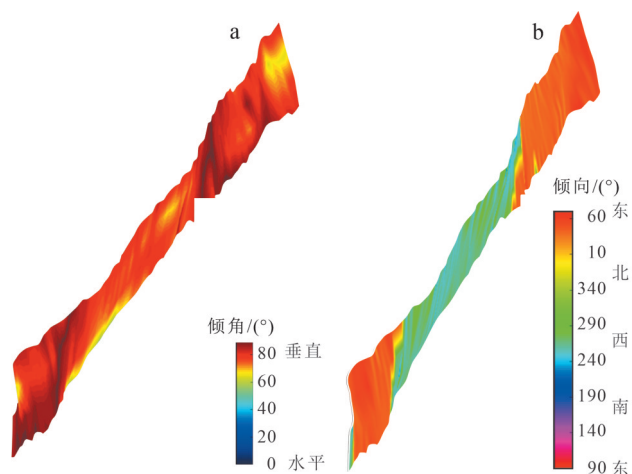


图3 辽东湾拗陷辽中1号断裂倾角(a)和倾向属性(b)

Fig. 3 Fault dip angle (a) and dip attributes (b) of No. 1 Liaozhong fault in the Liaodong Bay Depression

裂面东倾,角度较陡,垂向断距大,发育多级“Y”字形或似花状构造(图4c);中段平面上断裂面紧闭,连续性好,在剖面上普遍呈近直立发育,与次级断裂组成花状构造(图4d);南段断裂带较宽,连续性差(图4b),剖面上断裂面倾角变缓,倾向NW,浅部发育多级“Y”字形(图4e);辽中南洼段是辽中1号断裂向辽中南洼的延伸,近于直立,向南逐渐消失,平面上深层断裂带紧闭,为强走滑性质,浅层表现为雁列式次级断裂带。

2.3 辽中2号断裂

辽中2号断裂位于辽中凹陷东部,平面延伸约120 km,可分为南北两段,其中北段较为连续、断面清晰,控制辽中凹陷的形成,南段对沉积的控制作用减弱,断裂带逐渐变宽(图5a)。

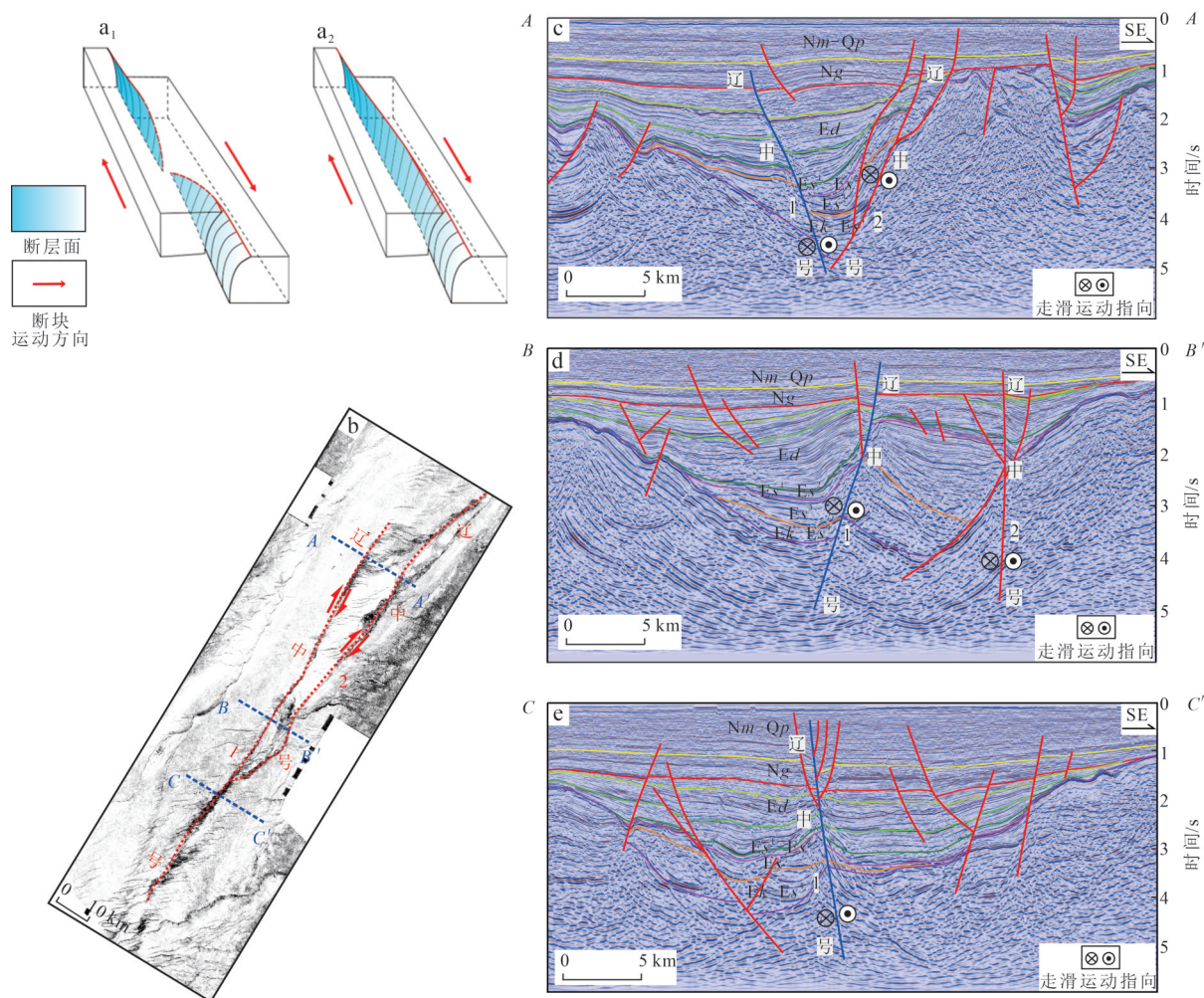


图4 辽东湾拗陷辽中1号断裂构造发育特征

Fig. 4 Structural development characteristics of No. 1 Liaozhong fault in the Liaodong Bay Depression

a₁. 走滑断裂分段演化阶段; a₂. 走滑断裂连接阶段; b. 1400 ms水平相干切片; c. 过辽中1号断裂北段地震剖面;

d. 过辽中1号断裂中段地震剖面; e. 过辽中1号断裂南段地震剖面

Nm-Qp. 新近系明化镇组和平原组; Ng. 新近系馆陶组; Ed. 古近系东营组; Es¹-Es²古近系沙一段和沙二段;

Es³. 古近系沙三段; Ek-Es⁴. 古近系孔店组和沙四段

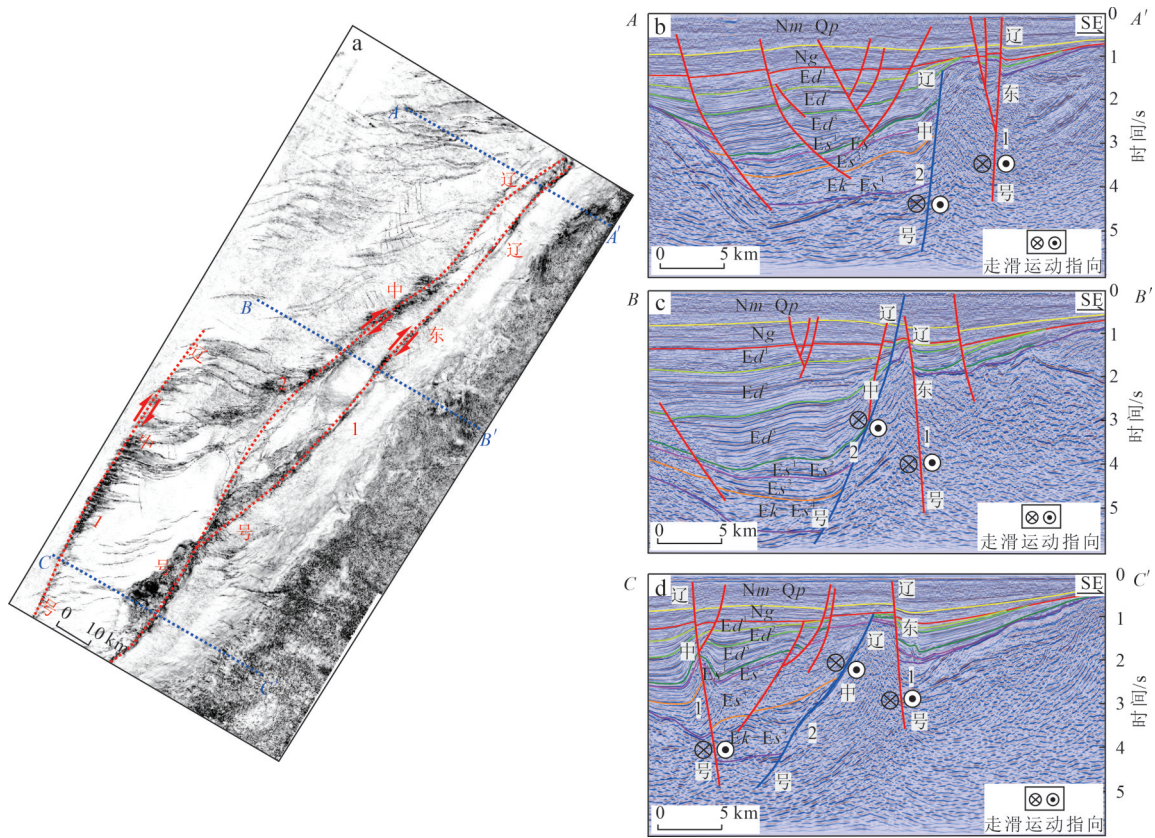


图5 辽东湾拗陷辽中2号断裂构造发育特征

Fig. 5 Structural development characteristics of No. 2 Liaozhong fault in the Liaodong Bay Depression

a. 1 000 ms 水平相干切片; b, c. 过辽中2号断裂北段地震剖面; d. 过辽中2号断裂南段地震剖面

Nm-Qp. 新近系明化镇组和第四系平原组; Ng. 新近系馆陶组; Ed¹. 古近系东一段; Ed². 古近系东二段; Ed³. 古近系东三段;

Es¹-Es² 古近系沙一段和沙二段; Es³. 古近系沙三段; Ek-Es⁴. 古近系孔店组和沙四段

平面上辽中2号断裂整体为NNE-NE走向,表现为弱“S”型弯曲。剖面上辽中2号断裂南北两段差异明显。北段断裂主断面西倾,倾角较陡、近乎直立,向南倾角逐渐变缓,转变为大型的铲式正断层,次级断层发育较多,与主断裂组成似花状构造或多级“Y”字形(图5b,c);南段断裂产状逐渐变缓,向南断裂发育的层位逐渐变深,被辽东1号断裂切割,并逐渐消失(图5d,图2c)。

2.4 辽西走滑断裂

前人对辽西凹陷是否发育郯庐断裂带分支存在争议,本研究基于新的三维大连片地震资料,通过水平切片和地震剖面分析,在辽西凹陷内识别出了一条规模较大的走滑断裂带。该断裂带发育于辽西凹陷西斜坡,自南向北贯穿于整个辽西凹陷,在新生界底界面立体显示图上可以发现辽西南凸起、辽西凹陷被明显切割错断,尤其是南部具有明显的右旋走滑特征(图6a)。

辽西走滑断裂整体为NNE走向,依据断裂走向及

剖面断裂特征,可将其分为3段:北段发育于辽西凹陷北部洼陷带,对地层沉积不起控制作用,剖面上主断裂直立发育,次级断层发育,组合成花状构造(图6b);中段发育于辽西凹陷南部斜坡带,走向NE-NNE,断裂较为连续,剖面上主断裂表现为倾角有所变缓,上部次级断裂发育,与主断裂组合成花状构造或似花状构造(图6c);南段发育于辽西南地区,走向NNE,主断面直立,次级断裂发育少(图6d)。

3 辽东湾拗陷郯庐断裂带展布规律

受以往地质资料及勘探研究程度所限,对渤海海域郯庐断裂带的发育条数及展布规律尚存在争议,尤其是西部是否存在郯庐断裂带分支断裂。本研究基于三维连片地震资料的精细解释,充分利用了立体显示、相干分析和地震剖面等分析手段,在辽东湾拗陷识别出了4条走滑断层,其走滑特征明显,规模巨大,垂向上可以从新近系-第四系一直切割到深部基底。进一步明确了辽西地区发育大型走滑断裂这一认识,为明确

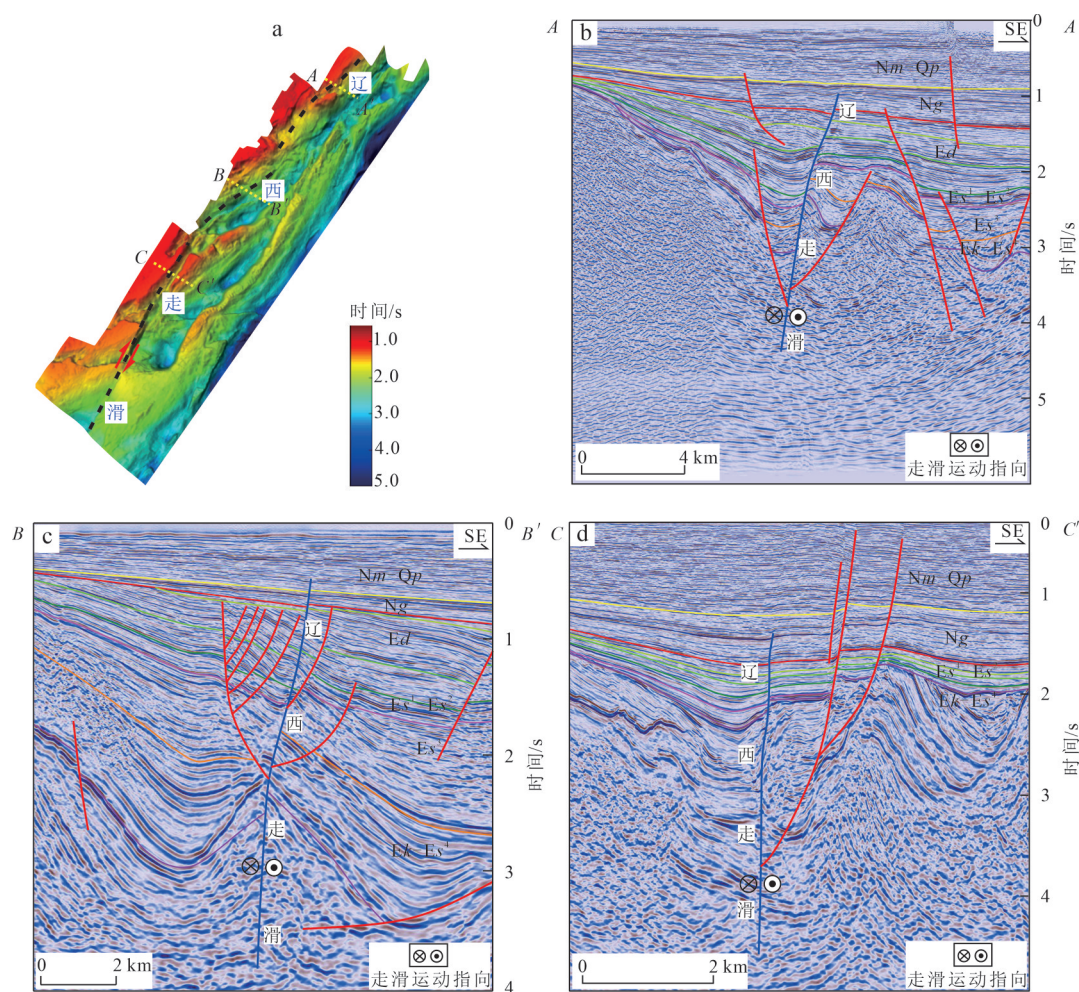


图6 辽西走滑断裂带构造发育特征

Fig. 6 Structural development characteristics of Liaoxi strike-slip fault

a. 新生界底界面立体显示; b. 过辽西走滑断裂北段地震剖面; c. 过辽西走滑断裂中段地震剖面; d. 过辽西走滑断裂南段地震剖面

Nm-Qp. 新近系明化镇组和平原组; Ng. 新近系馆陶组; Ed. 古近系东营组; Es¹-Es²古近系沙一段和沙二段;

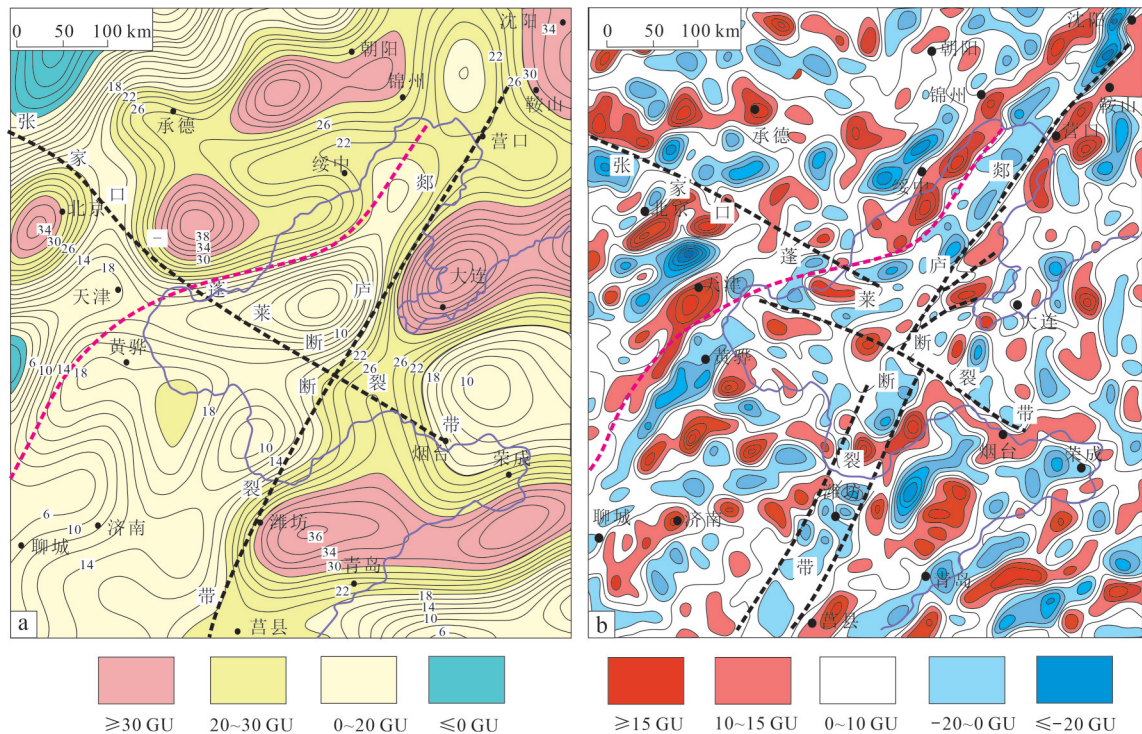
Es³. 古近系沙三段; Ek-Es⁴. 古近系孔店组和沙四段

辽东湾坳陷郯庐断裂带的展布规律提供了可靠依据。

结合前人研究成果,漆家福等^[40]认为辽东湾坳陷东部存在一条贯穿全区的重力梯度带,两侧异常值、等值线走向差异明显,很好地揭示了郯庐断裂带东部分支的存在,并且深、浅层存在一定差异。本研究分析认为,除了东部走滑分支断裂外,在辽东湾坳陷西部同样具有明显的重力异常差异,差异界线主要沿锦州、绥中一线以东分布(图7中红色虚线位置),切割深度较大。就异常值大小而言,深部和浅部均体现出了西侧异常值普遍较高、东侧相对较低的特点。就等值线展布方向而言,该界线以西深部125 km滤波重力异常主要为NE、近WE向,而东侧则主要为NE-NNE向展布;浅层20 km滤波重力异常尽管等值线展布方向相近,但西侧整体为NNE向展布、连续性好,而东侧则较为分散,且异常值差异明显。此外,从重力异常等值线上可以

清晰地看出该界线向南继续延伸至渤海海域渤中地区,直至黄骅坳陷中部,推测与渤海湾盆地中部发育的盐山-歧口-兰聊断裂带相接(图7)。

池英柳^[31]和汤良杰等^[14]认为辽东湾坳陷发育的主干断裂都应属于郯庐断裂带,胡惟等^[32]和詹润等^[33]认为郯庐断裂西支位于辽西凸起的西界,东支位于辽东凸起的西界;宋国奇^[44-45]认为郯庐断裂中段(山东段)发育3组分支断层;张婧等^[46-47]本文的作者在前期对渤海海域渤南地区的研究中,认为在渤南地区郯庐断裂带具有3组分支断裂,其中最西一支可延伸至济阳坳陷东北部滩海地区。结合周边地区郯庐断裂带的空间展布,童亨茂等^[48]认为辽河西部坳陷存在明显的走滑断层,浅层发育宏观尺度的雁列式断层构造带,剖面上花状构造发育,显性和隐伏走滑断层并存;漆家福等^[18]认为宏观上的“郯庐断裂带”可延伸至辽河西部

图7 渤海海域滤波剩余重力异常分布^[43]Fig. 7 Distribution of residual gravity anomalies in the Bohai Sea area^[43]

a. 125 km 尺度滤波剩余重力异常(重力异常值单位为 GU, 间距为 2 GU); b. 20 km 尺度滤波剩余重力异常(重力异常值单位为 GU, 间距为 5 GU)
(黑虚线为文献^[43]推测的郯庐断裂带发育位置;红虚线为本研究认为存在的郯庐断裂带西部分支。)

凹陷。但周立宏等^[49]、李三忠等^[50]和李理等^[51]认为辽河西部凹陷的走滑断裂应该为兰聊断裂的向北延伸部分,在深部与郯庐断裂带交汇。从地理位置上看,辽河西部凹陷的走滑断裂应该可向南延伸,过辽西地区,与兰聊断裂带相连,图7中的重力异常资料也证实了这一观点。因此,本研究认为在南、北两端均发育巨型走滑断裂带分支断裂的情况下,加持于中部的渤海海域辽东湾拗陷辽西地区走滑断裂带也应属于中国东部郯庐断裂带的一部分。

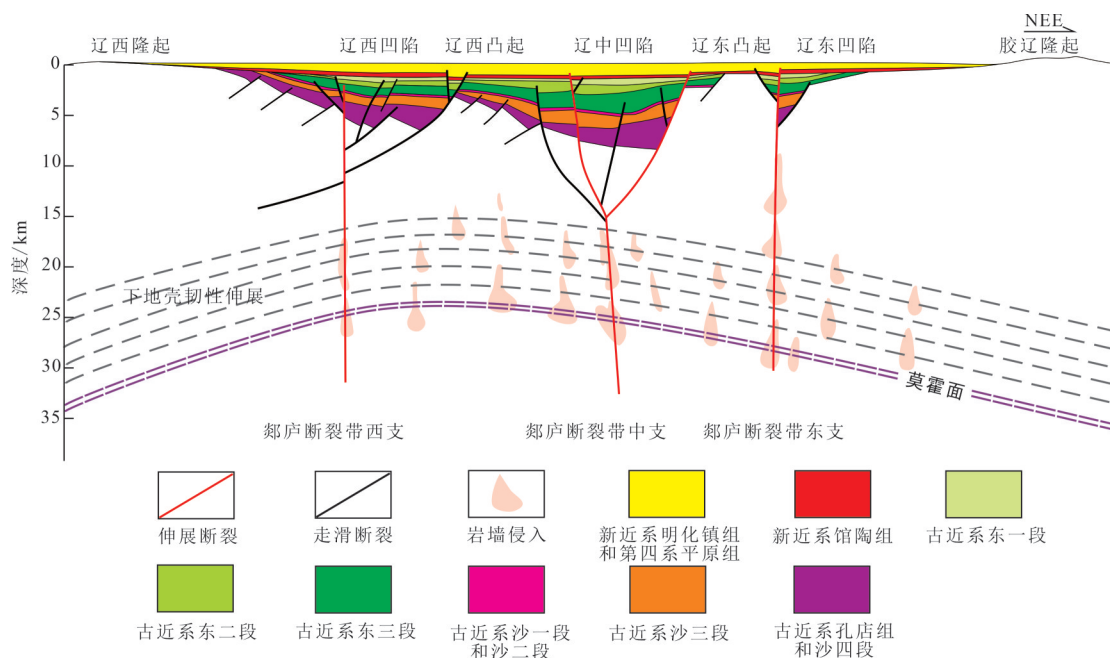
综合以上分析,辽东湾拗陷郯庐断裂带应发育3条(组)分支断层,东支发育在辽东地区,新生界断裂为辽东1号断裂;中支发育在辽中地区,新生界断裂为辽中1号和辽中2号断裂,在深层两条断裂合并为一条主走滑断裂;西支位于辽西地区西部斜坡位置,新生界发育辽西走滑断裂。3条分支断层均切割至深部基底,并可到达莫霍面(图8)。

4 讨论与结论

基于断裂的精细解释,本研究在辽东湾拗陷识别出了4条主走滑断裂,进一步结合前人研究成果及区域重力异常资料,认为在辽东湾拗陷郯庐断裂带应存

在3条(组)分支断裂,均切割至深部基底,并可到达莫霍面。

作为中国三大巨型走滑断裂系统之一,郯庐断裂带延伸距离长、切割深度大,其发育特征具有明显的分段性,在渤海海域可以分为辽东湾段、渤中-渤东段和渤南段。本研究认为辽东湾段发育3条(组)分支断裂,而在渤中-渤东段则主要由中央走滑断裂、渤东1号-渤东2号断裂两条(组)分支断裂构成^[24],在渤南地区则发育3组分支断裂,每组又有2~3条断裂构成^[46],整体而言,沿郯庐断裂带走向不同分段的发育特征及展布规律具有明显差异。龚再升等^[52]认为NW(W)向的大连-秦皇岛、张家口-蓬莱是导致郯庐断裂带在渤海走向发生变化的主要原因,王应斌等^[4]认为导致这种分段性的原因可能是多方面的,主要应受控于深部地质过程。此外,基底性质也可能会影响不同区段走滑断裂的分段差异,根据周立宏等^[49]的研究成果,辽东湾拗陷位于胶辽异常区,其西侧为阴山-燕山异常区;渤中-渤东位于胶辽异常区和渤鲁异常区的交界部位;渤南地区位于渤鲁异常区,其东侧紧邻苏鲁异常区。不同基底构造单元的岩性特征、物理性质存在明显差异,进而影响郯庐断裂带不同区段的走滑变形特征。

图8 辽东湾坳陷郯庐断裂带结构模型^[43]Fig. 8 Geometric structure model of Tan-Lu fault zone in the Liaodong Bay Depression^[43]

除了这种沿走向的分段差异外,同一分段横向上不同分支也存在差异,就辽东湾坳陷而言,前人之所以对辽西地区是否发育郯庐断裂带分支断裂存在疑问,除了受旧地震资料的品质和精度所限难以判识外,主要在于辽西地区发育了两条伸展特征明显的辽西1号和辽西2号断裂(图7),因此部分学者认为在辽西地区不发育走滑断裂。与辽西地区相比,辽中和辽东地区的走滑断裂由于同时对古近纪地层沉积具有一定的控制作用,剖面上较易识别,而辽西走滑断裂对地层沉积基本没有控制作用(图7),后期活动也没有利用早期的先存伸展断裂,为活动时间较晚的改造断裂,加之剖面上难以判识,因此容易被忽略。整体而言,中国东部新生代以来处于濒太平洋构造域^[52-64],渤海湾盆地的演化过程及郯庐断裂带的活动方式主要受控于太平洋板块俯冲过程的影响^[65],因此在区域上辽东湾坳陷走滑断裂应该普遍发育,而造成辽西与辽中和辽东地区走滑断裂差异的主要原因可能在于后期走滑的选择性成因机制。辽中和辽东地区先存断裂主要为NNE向,因此在后期近NS向区域伸展作用下复活,由于先存断裂与区域伸展方向小角度相交,先存断裂复活且走滑特征明显;而辽西地区先存断裂主要为NE向,加之断裂倾角较缓,在后期近NS向区域伸展作用下不容易发生复活,而是新生了NNE走向的辽西走滑断裂,对先存的NE向伸展断裂进行了切割改造。

另外一个值得注意的问题是主走滑断裂的垂向构

造变形差异。整体而言,辽东湾坳陷主走滑断裂在深层主要表现为单一断裂,而在浅层雁列式的次级断层代替了主干断裂。实际上,这种垂向差异已为众多学者所发现^[21,24,46-47,66]。构造物理模拟实验结果表明,伴随着走滑程度的逐渐增强,走滑断裂带的演化可以划分为萌芽阶段、R剪切断裂发育阶段、P剪切与Y剪切断裂发育阶段,及走滑带贯穿阶段^[67],表明雁列式断裂系为走滑程度较弱时的构造表现形式。王伟锋等^[68]将这种发育在浅层盖层中的雁列式断裂系命名为断裂趋势带,认为其属于断裂带形成演化早期或中期的弱变形构造带。此外,Stefanov和Bakeevc^[69]认为地层厚度影响了走滑作用的有效应力分布,进而影响了走滑变形特征;Dooley和Guido Schreurs^[70]通过干砂和湿粘土的剪切物理模拟实验发现,同等走滑强度下塑性地层主走滑带和P剪切更为发育;李艳友等^[71]认为盖层中走滑变形的样式和强度主要受基底断层走滑位移量的控制,而地层岩性和盖层厚度主要控制了盖层中走滑变形的范围和幅度。就辽东湾坳陷而言,古近系厚度显著大于新近系-第四系,在沙四段、沙三段、沙一段和东营组发育大套泥岩,而新近系则以厚层砂岩发育为主。但目前对辽东湾坳陷新生代走滑强度的研究相对较少,断裂的构造变形样式和组合关系仍然是定性分析走滑强度的主要依据,特别是在盆地覆盖区缺乏有效地定量表征断层走滑强度的方法。因此,在定性的断裂发育特征和控沉作用研究的基础上,

定量的走滑位移量计算是研究走滑断层活动强度最直接的方法和手段,这也是今后对辽东湾拗陷乃至整个渤海海域郯庐断裂带走滑研究的一个重要方向。

综上所述,郯庐断裂带不仅在辽东湾拗陷表现出了明显的垂向和横向差异,就整个渤海海域而言,辽东湾段与渤中-渤东段、渤南段同样存在明显差异,具体表现在沿断裂走向不同分段、垂直断裂走向不同分支以及断裂不同切割深度3个方面,前人的研究尽管已有涉及,但尚未形成系统和明确的认识,尤其是对导致这种差异性的控制因素以及如何定量表征各种控制因素的强弱,这也是今后需要进一步深入研究的问题。

参 考 文 献

- [1] 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:地球科学,2008,38(S1):19-29.
Qi Jiafu, Deng Rongjing, Zhou Xinhui, et al. Structure of Tanlu fault zone in Cenozoic Basin of Bohai Sea[J]. Chinese Science: Earth Science, 2008, 38(S1):19-29.
- [2] Qi J F, Yang Q. Cenozoic structural deformation and dynamic processes of the Bohai Bay basin province, China[J]. Marine & Petroleum Geology, 2010, 27(4):757-771.
- [3] 张鹏,王良书,石火生,等. 郯庐断裂带山东段的中新生代构造演化特征[J]. 地质学报,2010,84(9):1316-1323.
Zhang Peng, Wang Liangshu, Shi Huosheng, et al. The Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the Shandong Segment of the Tan-Lu Fault Zone[J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 84(9):1316-1323.
- [4] 王应斌,黄雷. 渤海海域营潍断裂带展布特征及新生代控盆模式[J]. 地质学报,2013,87(12):1811-1818.
Wang Yingbing, Huang Lei. Distribution characteristic of the Ying-Wei fault zone offshore the Bohai Sea and Cenozoic basin-controlling model [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87 (12) : 1811-1818.
- [5] 余一欣,周心怀,徐长贵,等. 渤海海域断裂相互作用及其油气地质意义[J]. 石油与天然气地质,2018,39(1):11-19.
Yu Yixin, Zhou Xinhui, Xu Changgui, et al. Fault interactions and their significances for hydrocarbon accumulation in offshore Bohai Bay Basin, eastern China[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39 (1):11-19.
- [6] 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 Liuhui, Yao Changhua. Strike-slip and pull-apart structure study and its significance to petroleum exploration on Laizhouwan Sag, Bohai Area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(2):19-25.
- [7] 周心怀,张新涛,牛成民,等. 渤海湾盆地南部走滑构造发育特征及其控油气作用[J]. 石油与天然气地质,2019,40(2):215-222.
Zhou Xinhui, Zhang Xintao, Niu Chengmin, et al. Growth of strike-slip zone in the southern Bohai Bay Basin and its significances for hydrocarbon accumulation [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 215-222.
- [8] 徐佑德,柳忠泉. 郯庐断裂带营潍段走滑断裂特征[J]. 石油天然气学报,2006,28(6):12-15.
Xu Youdeng, Liu Zhongquan. Characteristics of strike-slip fault in Yingwei Section of Tanlu fault zone [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 28(6):12-15.
- [9] 杨海风,徐长贵,牛成民,等. 渤海湾盆地黄河口凹陷新近系油气富集模式与成藏主控因素定量评价[J]. 石油与天然气地质,2020,41(2):259-269
Yang Haifeng, Xu Changgui, Niu Chengmin, et al. Quantitative evaluation of hydrocarbon accumulation pattern and the controlling factors in the Neogene of Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 259-269
- [10] 姜建平. 营口-潍坊断裂带新生代运动学特征[J]. 海洋地质与第四纪地质,2008,28(4):57-64.
Jiang Jianpin. Cenozoic kinematics of the Yingkou-Weifang fault zone in eastern China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(4):57-64.
- [11] 彭文绪,史浩,孙和风,等. 郯庐走滑断层右旋走滑的地震切片证据[J]. 石油地球物理勘探,2009,44(6):755-759.
Peng Wenxu, Shi Hao, Sun Hefeng, et al. Dextral strike-slip evidence on seismic slice for Tanlu strike-slip fault[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(6):755-759.
- [12] 万桂梅,汤良杰,金文正. 辽东湾JZ27-33区块伸展型右行走滑双重构造系统[J]. 中国地质,2010,37(6):1584-1591.
Wan Guimei, Tang Liangjie, Jin Wenzheng. The extensional dextral strike-slip duplex of JZ27-33 Block in Liaodong Bay[J]. Geology in China, 2010, 37(6):1584-1591.
- [13] 陈书平,吕丁友,王应斌,等. 渤海盆地新近纪-第四纪走滑作用及油气勘探意义[J]. 石油学报,2010,31(6):894-899.
Chen Shuping, Lv Dingyou, Wang Yingbing, et al. Neogene-Quaternary strike-slip movement in Bohai Basin and its significance in petroleum exploration [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31 (6) : 894-899.
- [14] 汤良杰,陈绪云,周心怀,等. 渤海海域郯庐断裂带构造解析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(1):170-176.
Tang Liangjie, Chen Xuyun, Zhou Xinhui, et al. Structural analysis of Tan-lu fault zone in the Bohai Sea[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33(1):170-176.
- [15] 徐长贵. 渤海走滑转换带及其对大中型油气田形成的控制作用[J]. 地球科学,2016,41(9):1548-1560.
Xu Changgui. Strike-slip transfer zone and its control on formation of medium and large-sized oilfields in Bohai Sea area[J]. Earth Science, 2016, 41(9):1548-1560.
- [16] 余一欣,周心怀,徐长贵,等. 渤海海域郯庐断裂带差异构造变形与油气聚集[J]. 地质论评,2017(S1):81-82.
Yu Yixin, Zhou Xinhui, Xu Changgui, et al. Differential structural deformation of Tan-Lu fault zone and hydrocarbon accumulation in offshore Bohai Bay Basin [J]. Geological Review, 2017 (S1):81-82.
- [17] 李伟,蒙美芳,陈兴鹏,等. 渤海海域东部弯曲走滑断裂派生伸

- 展与挤压作用的定量表征及其油气地质意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(5): 23-32.
- Li Wei, Meng Meifang, Chen Xingpeng, et al. Quantitative characterization of extension and compression derived from bending strike-slip faults and their petroleum geological significance of the eastern Bohai Sea [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(5): 23-32.
- [18] 李伟, 平明明, 周东红, 等. 辽东湾坳陷新生代主干断裂走滑量的估算及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(3): 445-454.
- Li Wei, Ping Mingming, Zhou Donghong, et al. Estimation of the cenozoic strike-slip displacement for major faults in the Liaodong Bay Depression and its geological significance[J]. Geotectonic et. Metallogenia, 2018, 42(3): 445-454.
- [19] Li W, Jia Hb, Wu Zp, et al. Controls of strike-slip faults on geomorphology and sediment dispersal in the Paleogene Bohai Bay area—From a source to sink perspective [J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 126: 104946.
- [20] 漆家福, 张一伟, 陆克政, 等. 渤海湾新生代裂陷盆地的伸展模式及其动力学过程[J]. 石油实验地质, 1995, 17(4): 316-323.
- Qi Jiafu, Zhang Yiwei, Lu Kezheng, et al. Extensional pattern and dynamic process of the Cenozoic rifting basin in the Bohai Bay [J]. Petroleum Geology & Experiment, 1995, 17(4): 316-323.
- [21] 漆家福, 李晓光, 于福生, 等. 辽河西部凹陷新生代构造变形及“郯庐断裂带”的表现[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(8): 1324-1337.
- Qi Jiafu, Li Xiaoguang, Yu Fusheng, et al. Cenozoic structural deformation and expression of the “Tan-Lu fault zone” in the West Sag of the Liaohe Depression, Bohaiwan basin province, China. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(8): 1324-1337.
- [22] 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.
- Xu Yixin, Zhou Xinhui, Wei Gang, et al. Structural transfer zones and their hydrocarbon significances in Bohai Bay area [J]. Journal of Paleogeography, 2008, 10(5): 555-560.
- [23] 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.
- [24] 吴智平, 薛雁, 颜世永, 等. 渤海海域渤东地区断裂体系与盆地结构[J]. 高校地质学报, 2013, 19(3): 463-471.
- Wu Zhiping, Xue Yan, Yan Shiyong, et al. The development characteristics of the fault system and basin structures of the Bohai Sag, East China [J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(3): 463-471.
- [25] 徐长贵, 任健, 吴智平, 等. 辽东湾坳陷东部地区新生代断裂体系与构造演化[J]. 高校地质学报, 2015, 21(2): 215-222.
- Xu Changgui, Ren Jian, Wu Zhiping, et al. Cenozoic fault system and tectonic evolution of the eastern Liaodong Bay Depression [J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(2): 215-222.
- [26] 李伟, 刘超, 张江涛, 等. 北部湾盆地迈陈凹陷东部断裂系统成因演化机制的构造物理模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(3): 38-46.
- Li Wei, Liu Chao, Zhang Jiangtao, et al. Structure physical modeling experiment of evolutionary mechanism about fault system in eastern area of Maichen Sag, Beibu-gulf Basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 2015, 39(3): 38-46.
- [27] 任健, 吴智平, 徐长贵, 等. 辽东凸起北段新生代隆升时间的确定: 来自裂变径迹的证据[J]. 世界地质, 2015, 34(2): 408-418.
- Ren Jian, Wu Zhiping, Xu Changgui, et al. Determination of uplifting ages during Cenozoic in northern Liaodong Uplift: Evidence from fission track dating [J]. Global Geology, 2015, 34(2): 408-418.
- [28] Cheng Y, Wu Z, Yu L. Seismic-reflection imaging of a pull-apart sag within Tan-Lu strike-slip fault zone: Cenozoic structure and evolution of the Weibei Sag, southeastern Bohai Bay Basin, China [J]. The Journal of Geology, 2016, 124(3): 377-393.
- [29] 曹忠祥. 营口-潍坊断裂带新生代走滑拉分-裂陷盆地伸展量、沉降量估算[J]. 地质科学, 2008, 43(1): 65-81.
- Cao Zhongxiang. Calculation of extension and subsidence the Cenozoic pull-apart and rift-basins along the Yingkou-Weifang fault zone [J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(1): 65-81.
- [30] 宗奕, 邹华耀, 滕长宇. 郯庐断裂带渤海段断裂活动差异性对新近系油气成藏的影响[J]. 中国海上油气, 2010, 22(4): 237-239.
- Zong Yi, Zou Huayao, Teng Changyu. Impacts of differential faulting along Bohai segment of Tanlu fault zone on neogene hydrocarbon accumulation [J]. China Offshore Oil and Gas, 2010, 22(4): 237-239.
- [31] 池英柳. 渤海新生代含油气系统基本特征与油气分布规律[J]. 中国海上油气(地质), 2001, 15(1): 3-10.
- Chi Yingliu. Basic characteristics and hydrocarbon distribution in Cenozoic petroleum systems, Bohai Sea [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2001, 15(1): 3-10.
- [32] 胡惟. 郯庐断裂带渤海段新构造活动方式与深部背景[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2014.
- Hu Wei. Neotectonics active modes and deep background of the Bohai Segment of the Tan-Lu fault zone [D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2014.
- [33] 詹润, 朱光, 杨贵丽, 等. 渤海海域新近纪断层成因与动力学状态[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 151-165.
- Zhan Run, Zhu Guang, Yang Guili, et al. The genesis of the faults and the geodynamic environment during Neogene for offshore of the Bohai sea [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 151-165.
- [34] Cheng Yj, Wu Zp, Yan Sy, et al. Cenozoic tectonic evolution of Liaodong Dome, northeast Liaodong Bay, Bohai, Offshore China, constraints from seismic stratigraphy, vitrinite reflectance and apatite fission track data [J]. Tectonophysics, 2015, 659: 152-165.
- [35] 杨克基. 渤海海域辽东湾地区断裂特征及其与油气成藏关系[D]. 石家庄: 石家庄经济学院, 2014.
- Yang Keji. The fault features of Liaodong Bay in Bohai Sea and relation with hydrocarbon accumulations [D]. Shijiazhang: Shijiazhang University of Economics, 2014.

- [36] 柳永军,徐长贵,吴奎,等. 辽中南洼走滑反转带的形成及其对油藏的控制作用[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(3): 16-21.
Liu Yongjun, Xu Changgui, Wu Kui, et al. Formation of the strike-slip inverse structural belt and its controlling action on the oil reservoirs in Liaozhong South Subsag[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(3): 16-21.
- [37] 周心怀,余一欣,汤良杰,等. 渤海海域新生代盆地结构与构造单元划分[J]. 中国海上油气, 2010, 22(5): 285-289.
Zhou Xinhui, Yu Yixin, Tang Liangjie, et al. Cenozoic offshore basin architecture and division of structural elements in Bohai Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2010, 22(5): 285-289.
- [38] 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, 5(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, 5(5): 999-1004.
- [39] 夏义平,刘万辉,徐礼贵,等. 走滑断层的识别标志及其石油地质意义[J]. 中国石油勘探, 2007, 12(1): 17-23.
Xia Yiping, Liu Wanghui, Xu Ligui, et al. Identification of strike-slip fault and its petroleum geology significance [J]. Petroleum Geology, 2007, 12(1): 17-23.
- [40] 徐嘉伟. 论走滑断层作用的几个主要问题[J]. 地学前缘, 1995, 2(2): 125-136.
Xu Jwei. Some major problems on strike-slip faulting[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(2): 125-136.
- [41] 孙洪斌,张凤莲. 辽河盆地走滑构造特征与油气[J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26(1): 16-21.
Sun Hongbin, Zhang Fenglian. Relationship between characteristics of strike-slip structure and oil-gas in the Liaohe Basin[J]. Geotectonic et. Metallogenia, 2002, 26(1): 16-21.
- [42] 李思伟,王璞珺,丁秀春,等. 辽河东部凹陷走滑构造及其与火山岩分布的关系[J]. 地质论评, 2014, 60(3): 591-600.
Li Siwei, Wang Pujun, Ding Xiuchun, et al. The relationship of strike-slip belts and volcanic rocks distribution in the Eastern Depression Liaohe Basin[J]. Geological Review, 2014, 60(3): 591-600.
- [43] 漆家福,周心怀,王谦身. 渤海海域中郯庐深断裂带的结构模型及新生代运动学[J]. 中国地质, 2010, 37(5): 1231-1242.
Qi Jiafu, Zhou Xinhui, Wang Qianshen. Structural model and cenozoic kinematics of Tan-Lu deep fracture zone in Bohai Sea area [J]. Geology in China, 2010, 37(5): 1231-1242.
- [44] 宋国奇. 郯庐断裂带鲁苏皖段大地电磁测深剖面与地壳结构[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(6): 1-4.
Song Guoqi. Magnetotelluric depth sounding sections of Tanlu fault zone and its crustal structure in Shandong, Jiangsu and Anhui Provinces [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(6): 1-4.
- [45] 宋国奇. 郯庐断裂带渤海段的深部构造与动力学意义[J]. 合肥工业大学学报, 2007, 30(6): 663-667.
Song Guoqi. Deep structures of the Bohai part of the Tan-Lu fault zone and their dynamic implications [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2007, 30(6): 663-667.
- [46] 张婧,李伟,吴智平,等. 郯庐断裂带渤南段构造特征及其控制作用[J]. 地球科学, 2017, 42(9): 1549-1564.
Zhang Jing, Li Wei, Wu Zhiping, et al. Structural characteristics of Tan-Lu fault zone in South Area of Bohai Sea and its control on Basin Structure [J]. Earth Science, 2017, 42(9): 1549-1564.
- [47] 张婧,吴智平,李伟,等. 辽东湾坳陷新生代构造特征及演化[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(11): 9-17.
Zhang Jing, Wu Zhiping, Li Wei, et al. Cenozoic tectonic characteristics and evolution of Liaodong Bay Depression [J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(11): 9-17.
- [48] 童亨茂,宓荣三,于天才,等. 渤海湾盆地辽河西部凹陷的走滑构造作用[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1017-1026.
Tong Hengmao, Mi Rongsan, Yu Tiancai, et al. The strike-slip tectonics in the western Liaohe Depression, Bohai Bay Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(8): 1017-1026.
- [49] 周立宏,李三忠,赵国春,等. 华北克拉通中东部基底构造单元的重磁特征[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(1): 91-100.
Zhou Lihong, Li Sanzhong, Zhao Guochun, et al. Gravity and magnetic features of crystalline basement in the central and Eastern North China Craton [J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(1): 91-100.
- [50] 李三忠,索艳慧,周立宏,等. 华北克拉通内部的拉分盆地: 渤海湾盆地黄骅坳陷结构构造与演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(5): 1362-1379.
Li Sanzhong, Suo Yanhui, Zhou Lihong, et al. Pull-apart basins within the North China Craton: Structural pattern and evolution of Huanghua Depression in Bohai Bay Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(5): 1362-1379.
- [51] 李理,赵利,刘海剑,等. 渤海湾盆地晚中生代-新生代伸展和走滑构造及深部背景[J]. 地质科学, 2015, 50(2): 446-472.
Li Li, Zhao Li, Liu Haijian, et al. Late mesozoic to cenozoic extension and strike slip structures and deep background of Bohai Bay Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 50(2): 446-472.
- [52] 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.
- [53] 张岳桥,董树文,赵越,等. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新认识[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1462-1480.
Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Zhao Yue, et al. Jurassic tectonics of North China: A synthetic view [J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 81(11): 1462-1480.
- [54] 李三忠,余珊,赵淑娟,等. 东亚大陆边缘的板块重建与构造转换[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(3): 65-94.
Li Sanzhong, Yu Shan, Zhan Shujuan, et al. Tectonic transition and plate reconstructions of the east Asian continental margin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(3): 65-94.
- [55] Dmitrienko L V,王鹏程,李三忠,等. 东亚大汇聚与中-新生代地球表层系统演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(4): 34-64.
Dmitrienko L V, Wang Pengcheng, Li Sanzhong, et al. Meso-Cenozoic evolution of earth surface system under the east Asian tec-

- tonic super convergence[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(4):34-64.
- [56] 杨威,周刚,李海英,等. 碳酸盐岩深层走滑断裂成像技术[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(2):246-252.
- Yang Wei, Zhou Gang, Li Haiying, et al. Seismic imaging technology for deep strike-slip faults in carbonate reservoirs[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(2):246-252.
- [57] 韩俊,况安鹏,能源,等. 顺北5号走滑断裂带纵向分层结构及其油气地质意义[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(2):152-160.
- Han Jun, Kuang Anpeng, Neng Yuan, et al. Vertical layered structure of Shunbei No. 5 strike-slip fault zone and its significance on hydrocarbon accumulation[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(2):152-160.
- [58] 张云银,张伟忠,毛振强,等. 走滑——拉张断裂活动性量化表征及控藏作用——以东营凹陷南坡金家地区为例[J]. *断块油气田*, 2021, 28(2):200-204.
- Zhang Yunyin, Zhang Weizhong, Mao Zhenqiang, et al. Quantitative characterization and reservoir control of strike-slip and extension fault activity: a case study of Jinjia area in the south slope of Dongying Sag[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(2):200-204.
- [59] 吴梅莲,刘永福,彭鹏,等. 轮南古潜山走滑断裂特征及其对油气成藏的影响[J]. *断块油气田*, 2021, 28(4):456-462.
- Wu Meilian, Liu Yongfu, Peng Peng, et al. Characteristics of strike-slip faults in Lunan buried hill and its influence on hydrocarbon accumulation[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(4):456-462.
- [60] 林波,云露,张旭,等. 一种板内小尺度走滑断层平面分段研究方法:以塔里木盆地顺北5号断层中北段为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(4):1006-1018.
- Lin Bo, Yun Lu, Zhang Xu, et al. A method for plane segmentation of small-scale intraplate strike-slip faults: A case of the middle-north segment of Shunbei No. 5 Fault in Tarim Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(4):1006-1018.
- [61] 何光玉,顾忆,赵永强,等. 塔里木盆地北缘沙雅隆起两阶段走滑变形的证据[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(2):172-176.
- He Guangyu, Gu Yi, Zhao Yongqiang, et al. Evidence of two-stage strike-slip structural deformation of Shaya Uplift, northern Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(2):172-176.
- [56] 林波,云露,李海英,等. 塔里木盆地顺北5号走滑断层空间结构及其油气关系[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6):1344-1353.
- Lin Bo, Yun Lu, Li Haiying, et al. Spatial structure of Shunbei No. 5 strike-slip fault and its relationship with oil and gas reservoirs in the Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6):1344-1353.
- [62] 张永,郑孟林,陈赅俊,等. 塔里木盆地巴楚隆起玛扎塔格断裂带几何学与运动学特征[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(2):325-337.
- Zhang Yong, Zheng Menglin, Chen Jiajun, et al. Geometrical and kinematical characteristics of the Mazartag fault zone in Bachu Uplift, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(2):325-337.
- [63] 马庆佑,曾联波,徐旭辉,等. 塔里木盆地肖尔布拉克剖面走滑断裂带内部结构及控储模式[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1):69-78.
- Ma Qingyou, Zeng Lianbo, Xu Xuhui, et al. Internal architecture of strike-slip fault zone and its control over reservoirs in the Xiaoerbulake section, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1):69-78.
- [64] 罗彩明,梁鑫鑫,黄少英,等. 塔里木盆地塔中隆起走滑断裂的三层结构模型及其形成机制[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1):118-131, 148.
- Luo Caiming, Liang Xinxin, Huang Shaoying, et al. Three-layer structure model of strike-slip faults in the Tazhong Uplift and its formation mechanism[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1):118-131, 148.
- [65] Zhu G, Jiang Dz, Zhang Bl, Chen Y. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: Evidence from crustal deformation kinematics[J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(1):86-103.
- [66] 许立青,李三忠,索艳慧,等. 渤海湾盆地大歧口凹陷断裂系统与陆内拉分断陷[J]. *地质科学*, 2015, 50(2):489-502.
- Xu Liqing, Li Sanzhong, Sou Yanhui, et al. Fault system and basin prototype of the great Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50(2):489-502.
- [67] 肖阳,邬光辉,雷永良,等. 走滑断裂带贯穿过程与发育模式的物理模拟[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(3):340-348.
- Xiao Yang, Wu Guanghui, Lei Yongliang, et al. Analogue modelling of through-going process and development pattern of strike-slip fault zone[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(3):340-348.
- [68] 王伟锋,周维维,徐守礼. 沉积盆地断裂趋势带形成演化及其控藏作用[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 2017, 42(4):613-624.
- Wang Weifeng, Zhou Weiwei, Xu Shouli. Formation and evolution of concealed fault zone in sedimentary basins and its significance in hydrocarbon accumulation[J]. *Earth Science*, 2017, 42(4):613-624.
- [69] Stefanov Y P, Bakeev R A. Deformation and fracture structures in strike-slip faulting[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, 129(11):102-111.
- [70] Dooley T P, Schreurs G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results[J]. *Tectonophysics*, 2012, (574-575):1-71.
- [71] 李艳友,漆家福,周赏. 走滑构造差异变形特征及其主控因素分析——基于砂箱模拟实验[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(5):711-715.
- Li Yanyou, Qi Jiafu, Zhou Shang. Differential deformation and its main controls on strike-slip structures: Evidence from sandbox experiments[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(5):711-715.