

文章编号: 1000-0747(2018)02-0200-12 DOI: 10.11698/PED.2018.02.03

# 张家口—蓬莱断裂渤海沙垒田凸起东北段 盆岭再造及其对油气成藏的影响

彭靖淞, 韦阿娟, 孙哲, 陈心路, 赵弟江

(中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452)

基金项目: 国家科技重大专项“渤海海域勘探新领域及关键技术研究”(2016ZX05024-003)

**摘要:** 以三维地震和钻井资料为基础, 通过地震属性分析、构造几何学分析、断层活动性分析、构造演化史分析和油气运移模拟等方法, 对张家口—蓬莱断裂带渤海沙垒田凸起东北段的构造样式、断裂活动性、走滑位移量、中央构造带的形成机制及其油气运聚进行分析。研究区是早期(古新世—始新世)伸展和晚期(渐新世、上新世—第四纪)走滑-拉分的叠合构造区; 张家口—蓬莱断裂渤海沙垒田凸起东北段左旋走滑活动有两个阶段, 即渐新世和上新世—第四纪, 渤海海域活动较陆地段更早; 新生代以来左旋走滑位移量共 4 km, 其中渐新世活动较弱(1 km), 上新世较强(3 km); 大规模的走滑活动导致了断裂带围区断裂活动的加剧和盆岭再造, 促进了中央构造带的形成和北东向构造带的协同演化; 张家口—蓬莱断裂渤海沙垒田凸起东北段及其共轭走滑断裂带剧烈的新构造运动控制了油气从深层往浅层运移的充注点/段, 从而控制了其浅层油气运移及成藏。图 13 表 1 参 48

**关键词:** 渤海湾盆地; 张家口—蓬莱断裂; 郯城—庐江断裂; 左旋走滑; 断距; 油气充注

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

## Sinistral strike slip of the Zhangjiakou-Penglai Fault and its control on hydrocarbon accumulation in the northeast of Shaleitian Bulge, Bohai Bay Basin, East China

PENG Jingsong, WEI Ajuan, SUN Zhe, CHEN Xinlu, ZHAO Dijiang

(CNOOC Tianjin Company, Tianjin 300452, China)

**Abstract:** The structural style, fault activity, strike-slip displacement, and the formation mechanism and hydrocarbon migration and accumulation in the center tectonic zone in the northeast Shaleitian Bulge of Zhangjiakou-Penglai Fault Zone were studied by seismic attribute analysis, structural geometric analysis, fault activity analysis, structure evolution history and simulation of hydrocarbon migration, based on 3-D seismic and drilling data. The main results are as follows: (1) The study area is a superimposed tectonic zone, which experienced early (Paleocene and Eocene) extension and late (Oligocene and Pliocene-Quaternary) strike-slip and pull-apart. (2) The sinistral strike slip of the northeast Shaleitian Bulge of Zhangjiakou-Penglai Fault Zone went through two periods, Oligocene and Pliocene-Quaternary, and the Bohai section was active earlier than the inland section. (3) The sinistral strike slip displacement of Zhangjiakou-Penglai Fault is 4 km since Cenozoic, including 1 km in the Oligocene, and 3 km in the Pliocene-Quaternary. (4) The strike-slip movements have resulted in the increase of fault activity and basin-mountain restructure in the fault zone, also contributed to the formation of the central tectonic belt and the conjugate evolution in north-east structural belt. (5) The conjugate strike slip of the Zhangjiakou-Penglai Fault Zone dominated the migration and accumulation of hydrocarbon in shallow formations by controlling the injection points and segments of hydrocarbon from the deep layers to shallow layers.

**Key words:** Bohai Bay Basin; Zhangjiakou-Penglai Fault; Tan-Lu Fault; sinistral strike slip; fault throw; hydrocarbon injection

引用: 彭靖淞, 韦阿娟, 孙哲, 等. 张家口—蓬莱断裂渤海沙垒田凸起东北段盆岭再造及其对油气成藏的影响[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 200-211.

PENG Jingsong, WEI Ajuan, SUN Zhe, et al. Sinistral strike slip of the Zhangjiakou-Penglai Fault and its control on hydrocarbon accumulation in the northeast of Shaleitian Bulge, Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(2): 200-211.

## 0 引言

走滑断裂对造山和成盆的作用一直是大地构造学

研究的热点<sup>[1-6]</sup>。渤海湾盆地被中国东部的两条巨型走滑断裂: 郯城—庐江断裂(下文简称郯庐断裂)和张家口—蓬莱断裂带(下文简称张蓬断裂)所切割, 走

滑样式丰富,盆岭关系复杂<sup>[3-9]</sup>。近年来,渤海海域油气勘探积累了大量钻井和三维地震资料,为走滑断裂的大地构造学研究提供了良好的资料基础。

张蓬断裂西起张家口附近,向东南经北京、天津、渤海,东南段沿山东半岛北缘和威海及沿海海域延伸,是一条走向近北西向的活动断裂带,总长度超过700 km,与北北东向的郯庐断裂带构成渤海海域新生代两个主要的活动构造带<sup>[6-9]</sup>。与郯庐断裂相似,张蓬断裂渤海段亦是渤海地区主要的油气聚集区带<sup>[10-12]</sup>,累计发现石油地质储量超过 $12 \times 10^8$  t,包括蓬莱9-1、渤中19-4、渤中8-4、曹妃甸12-6和曹妃甸6-4等断块油田。

张蓬断裂具有左旋走滑特征,现今仍非常活跃,地震活动频繁,其主干断裂被多条北东—南西向断裂所切割,分段差异性明显<sup>[6-9]</sup>。前人研究成果主要集中在张蓬断裂的陆上地区(张北—南口段、南口—宁河段和蓬莱—烟台段)<sup>[6-12]</sup>,对渤海海域段的研究相对缺乏,其走滑构造特征和走滑尺度不明。

渤海海域左旋张蓬断裂是右旋郯庐断裂的共轭走滑断裂<sup>[10-12]</sup>,共轭断裂具有同时、同步、协调活动的特征<sup>[10,13-14]</sup>。索艳慧等学者认为张蓬断裂陆地段第四纪(距今约2.6 Ma)开始左旋<sup>[6-9]</sup>,其渤海段的发育时间是否与陆地段相同?如果相同,这比郯庐断裂渐新世<sup>[15-17]</sup>右旋走滑开始时间(距今约30 Ma)要滞后近27 Ma,有悖于“共轭”断层同生、共生的认识,因此张蓬断裂渤海段的形成时间还需进一步落实。

受太平洋板块俯冲和喜马拉雅造山运动远程效应的共同影响<sup>[3,5-6,18-21]</sup>,渤海海域新生代以来具有伸展和走滑的双动力源,表现出早期(古新世—始新世)伸展、晚期(渐新世至今)走滑-拉分的叠合构造样式<sup>[18-24]</sup>。伸展构造会形成箕状断陷<sup>[18-24]</sup>,而走滑-拉分构造往往形成盆岭构造<sup>[1-6]</sup>。在早期先存的伸展构造基础上发生走滑,渤海地区的盆地和凸起的格局必然发生变化,笔者称之为“盆岭再造”。前人认为走滑弯曲、伸缩变形及其差异沉降/隆升是走滑带造山、造盆的主要机制<sup>[1-6,19-21]</sup>。笔者研究发现:除了以上机制,对于平移断距较大的走滑断层,两盘长距离错动形成的“海豚效应”<sup>[25-27]</sup>对盆岭再造的影响也值得重视,这将在下文中详细论述。

晚期成藏是渤海地区油气成藏的重要特征,新构造运动对活动断裂带的浅层成藏至关重要<sup>[10-12,28-35]</sup>。张蓬断裂是渤海湾盆地现今最为活跃的断裂带和油气富集区<sup>[5-6]</sup>,前人对其复杂断块油气藏的石油地质条件进行过一定的研究,认为张蓬断裂控制了圈闭的形成,

晚期活跃的断层把油气从深层输导到浅层在新近系成藏<sup>[10-12]</sup>。实际钻井和三维地震资料揭示,张蓬断裂带深浅断裂叠合程度不高,多期次构造发育,盆地叠合/再造特征明显,各个断块圈闭之间成藏差异较大,张蓬断裂带对油气成藏的控制作用有待进一步研究。

本文研究以张蓬断裂渤海段的沙垒田凸起东北段为例,以三维地震资料和钻井资料为基础,通过构造解释、地震属性分析、构造几何分析、断层活动性分析、构造演化史分析和油气的运移模拟等方法,分析张蓬断裂带的构造样式、走滑位移量、中央构造带的形成机制、断裂走向上活动性差异及其对油气运移的影响,以期理清张蓬断裂的构造特征、活动期次和走滑规模,探索张蓬断裂带盆岭再造的机制,总结走滑带构造运动及其断裂活动对油气成藏的控制作用。

## 1 区域地质概况

研究区位于渤海湾盆地渤中坳陷沙垒田凸起东北部,张蓬断裂位于研究区西侧,北西—南东向贯通全区。该区域构造复杂,发育依附于张蓬断裂的中央构造带、与张蓬断裂斜交的渤中8-4和渤中8-3构造带(见图1)。地层可划分为深浅两部分,深层:古近系由浅到深依次发育东营组、沙河街组和孔店组,主要为多期扇三角洲—辫状河三角洲砂体和湖相泥岩的旋回沉积;浅层:新近系由浅到深依次发育明化镇组和馆陶组,主要为河流相和浅水三角洲相的砂砾岩和砂(泥)岩沉积<sup>[35-36]</sup>。

## 2 构造特征

### 2.1 断裂特征

#### 2.1.1 典型剖面特征

张蓬断裂渤海沙垒田凸起东北段(下文简称张蓬断裂沙东北段)具有典型的走滑断裂带特征:剖面上,其主走滑断裂及其派生断裂组合成负花状形态,表现出伸展-走滑的应力背景<sup>[19,22,25-27]</sup>;主走滑断面近乎直立,断裂倾向在研究区南段朝东、北段朝西,表现出走滑断层典型的丝带效应<sup>[25-27]</sup>(见图2)。同时,研究区的东侧为正断层、铲式正断层和“Y”形断层组合等伸展构造控制的箕状断陷(见图2)。可见研究区是伸展构造和走滑-拉分构造的叠合发育区,体现了渤海地区的双动力源特征<sup>[18-24]</sup>。

#### 2.1.2 走滑派生断层与走滑方向

张蓬断裂沙东北段在东营组以下的深层为一条北西—南东向贯穿全区的断层(见图3a、图3b),但在

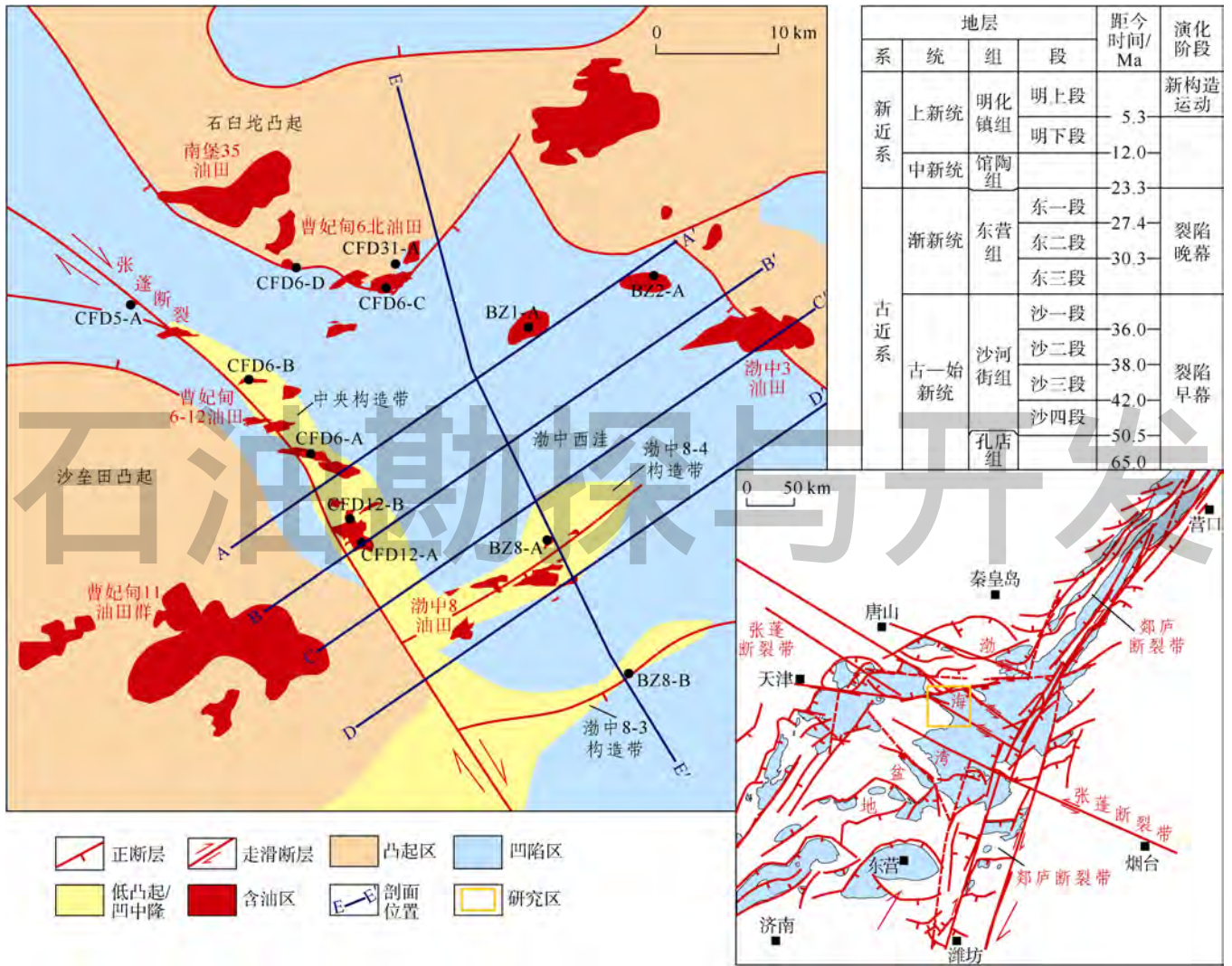


图1 研究区位置图

东营组及其上覆的浅层,张蓬断裂不再是一条断层,而是逐渐变成一系列具有走滑-伸展特征的派生断层,这些派生断层剖面上表现为花状构造的花瓣,平面上呈北东东—南西西雁列展布,形成了一个宽度为10~20 km的断裂带(见图3c、图3d)。同时,张蓬断裂沙东北段主断裂与派生断裂之间的夹角指示其新生代以来为左旋走滑构造<sup>[17,37]</sup>。

## 2.2 断裂活动期次

### 2.2.1 区域断裂演化

长期活动断裂的活动期次反映了构造的演化期次<sup>[38-39]</sup>。通过对研究区长期活动断裂的研究表明,研究区主要发育3期构造运动<sup>[17-22,28,35]</sup>(见图1、图4):①裂陷早幕,古新统孔店组—始新统沙河街组沉积时期,该阶段主要发育了一些控凹的正断层,断层的数量较少,但单条断层的活动速率较大,断层走向主要为北北西—南南东向;②裂陷晚幕,渐新统东营组沉积时期,该时期断裂的活动速率最高,走滑-伸展断层

的数量有一定程度的增加,断层的主要走向变成北东东—南西西向;③新构造运动,上新统明化镇组—第四系平原组沉积时期,经过中新世的整体热沉降后,断裂又重新活化,张蓬断裂带走滑-伸展特征派生断层的数量开始大量增加,其派生断层数量占到了全区断层的72%,且断层活动速率较大,断层的走向与裂陷晚幕基本一致,主要为北东东—南西西向(见图5)。

### 2.2.2 走滑构造的活动时间

在了解区域断裂活动史的基础上,对张蓬断裂沙东北段的走滑活动史进行了分析。由于几乎所有的走滑断裂活动,都会形成一系列张扭性的派生断裂,所以派生断裂活动史可以间接反映主走滑断裂的活动史<sup>[17]</sup>。通过对张蓬断裂沙东北段的走滑派生断层的分析表明,其走滑活动开始于渐新世裂陷晚幕,主要有两期走滑活动,即渐新世裂陷晚幕和上新世—第四纪新构造运动期,后者的断裂活动强度几乎是前者的3倍,形成了大量的派生断层(见图6)。



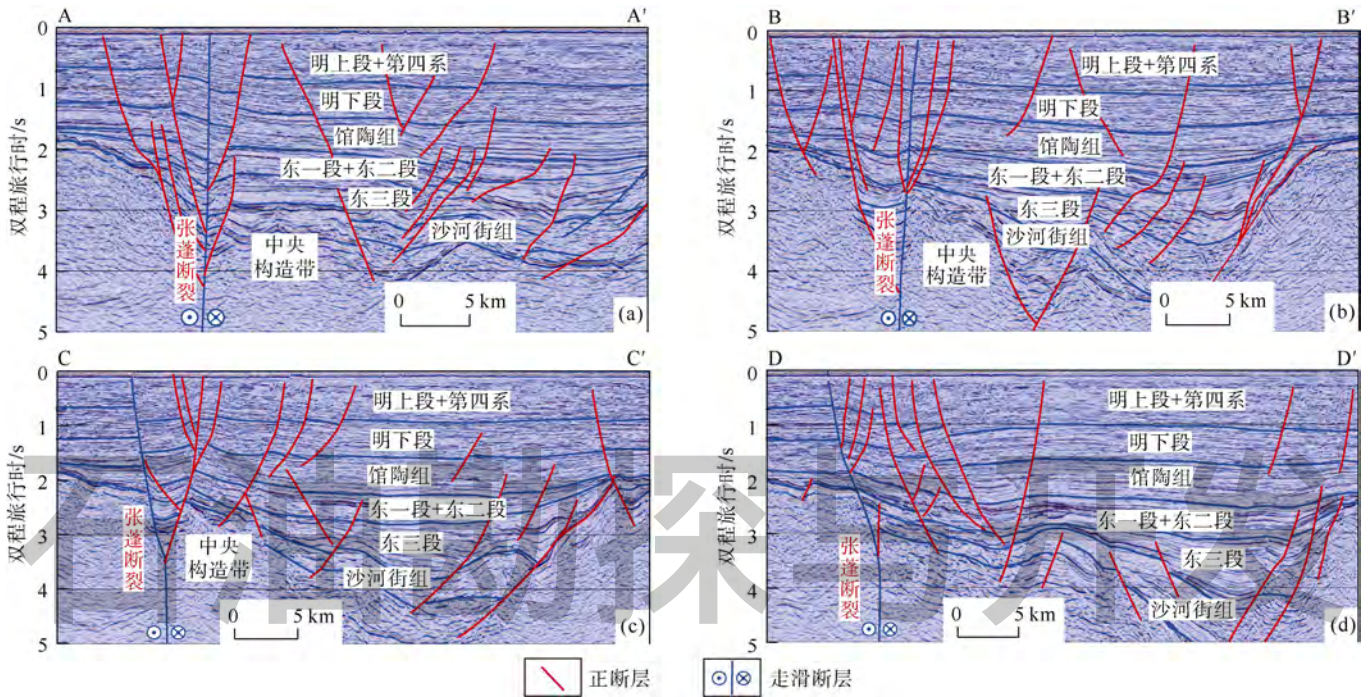


图2 张蓬断裂沙东北段剖面特征(剖面位置见图1)

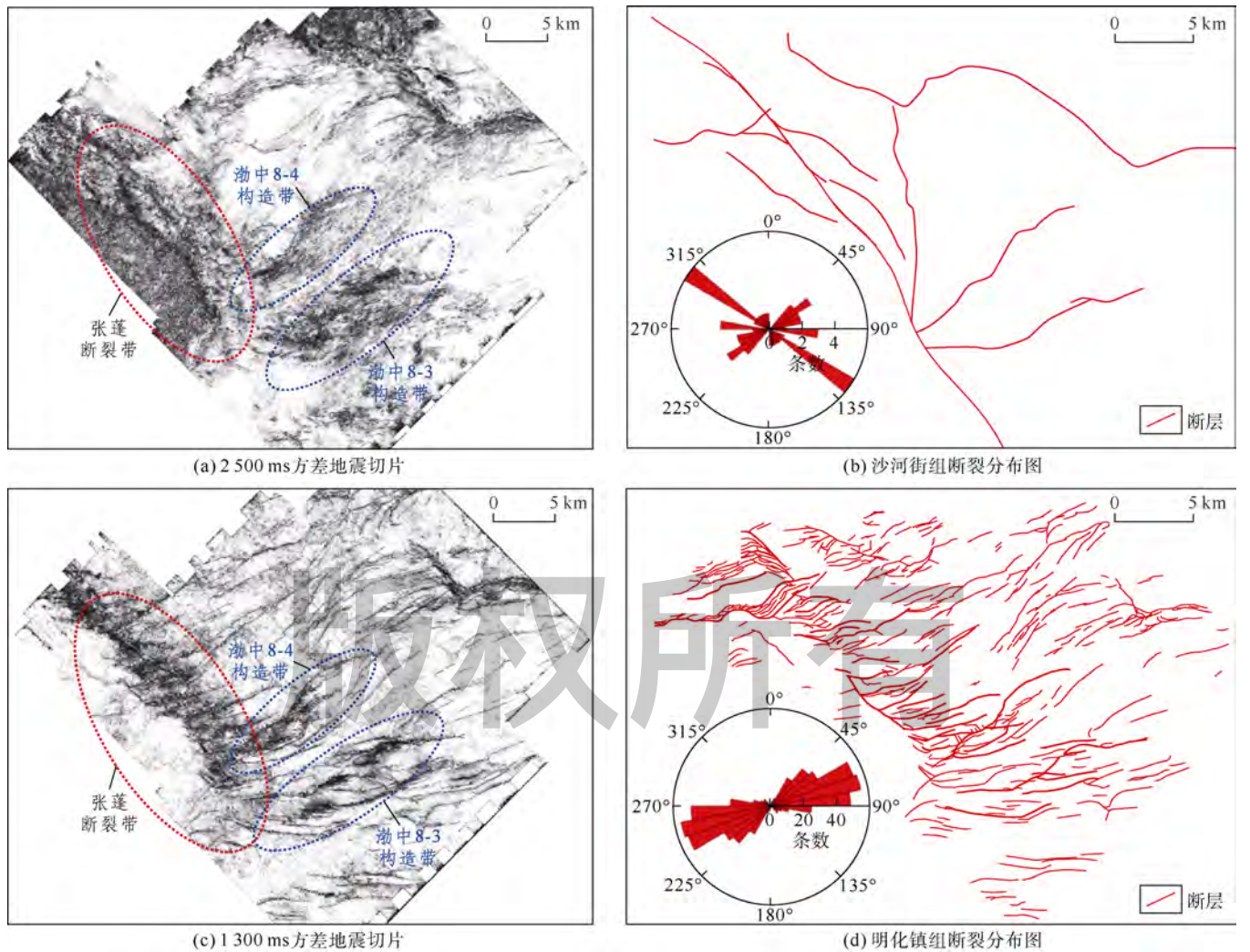


图3 研究区断裂平面展布图



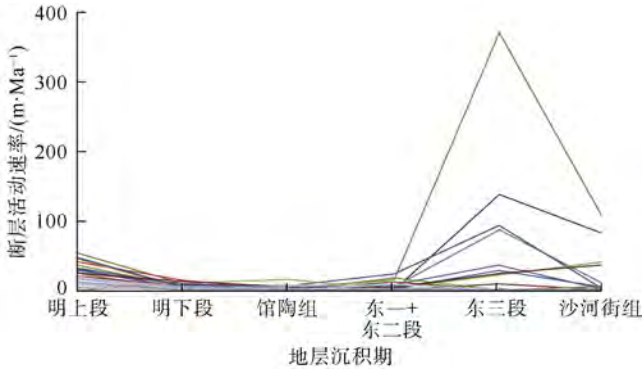


图4 研究区长期活动断层活动速率图  
(不同颜色线代表不同断层)

张蓬断裂的走滑活动发生在裂陷晚幕和新构造运动期,但“缺席”了伸展构造为主的裂陷早幕。笔者

认为,研究区是早期(裂陷早幕)伸展和晚期(裂陷晚幕,新构造运动)走滑-拉分的叠合构造发育区。

对比张蓬断裂陆地段的活动时间<sup>[6-9]</sup>,渤海沙东北段活动较陆地段活动更早,张蓬断裂可能是由渤海海域向陆地发育。

### 2.2.3 与郯庐断裂带的演化关系

结合郯庐断裂带<sup>[15-17]</sup>,笔者认为张蓬断裂的左旋走滑与郯庐断裂新生代的右旋走滑都没有发生在渤海海域的裂陷早幕,但几乎同时发育于渐新世裂陷晚幕和新构造运动时期,它们具有共轭走滑断裂同时、协同发育的特征,其共轭走滑活动促进了渤海海域在古—始新世伸展背景下,渐新世走滑-拉分再裂陷和上新世构造继承性活化(见表1)。

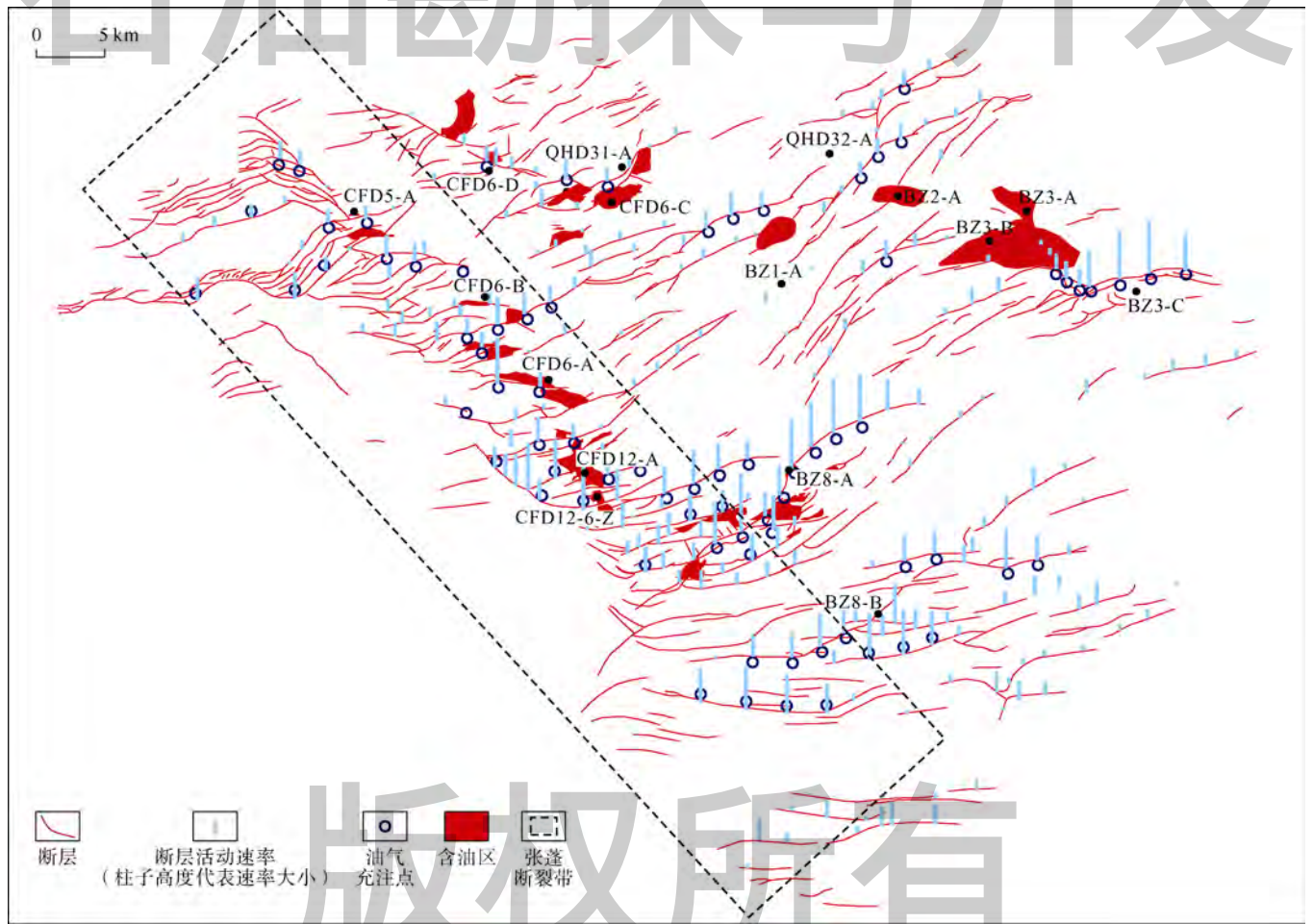


图5 明化镇组沉积期断裂展布及断层上新世活动速率图(油气充注点根据断裂活动速率分析和有利于浅层油气成藏的门限筛选得到)

### 2.3 走滑断距的确定

张蓬断裂现今仍处于左旋走滑的构造活动中<sup>[6-9]</sup>,但其走滑位移量尚缺乏研究。走滑断距的估算一直是走滑构造研究的难点<sup>[40-43]</sup>。笔者综合采用了基底参考点走滑断距分析法、基底地貌相似性走滑断距分析法、沉积体系对比走滑断距分析和走滑活动断距累加

原理,对张蓬断裂沙东北段渐新世、上新世—第四纪两个主要走滑时期的走滑量和新生代总走滑量进行了估算。

#### 2.3.1 新生代总走滑量

新生界基底在张蓬断裂沙东北段左旋走滑过程中发生错动,其错动的距离是张蓬断裂沙东北段新生代

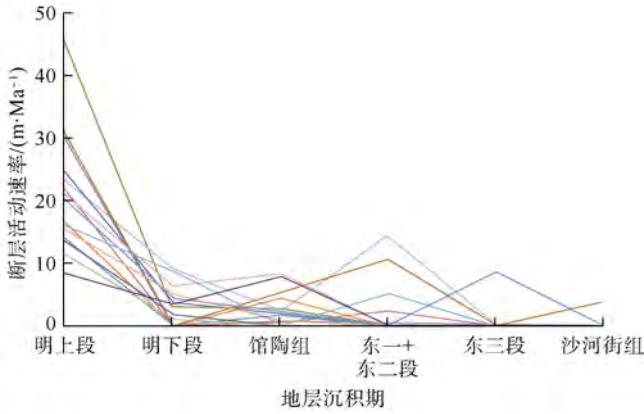


图6 研究区走滑派生断层活动速率图(不同颜色线代表不同断层)

表1 张蓬断裂沙东北段与郯庐断裂带共轭关系表<sup>[15-17]</sup>

断裂	构造样式	断裂带走向	派生断裂走向	走滑方向	新生代断裂活动性质	走滑断距	断裂规模	应力背景
张蓬断裂沙东北段	花状构造、丝带效应、反转构造	北西—南东向	近东西向	左旋	渐新世和上新世—第四纪左旋走滑断层	约4 km	区域大断裂	早期不存在，晚期走滑
郯庐断裂带	花状构造、丝带效应、双重构造、反转构造	北东—南西向	近东西向	右旋	古新世—始新世伸展断层、渐新世和上新世—第四纪右旋张扭断层	约20 km	区域大断裂	早期伸展，晚期走滑

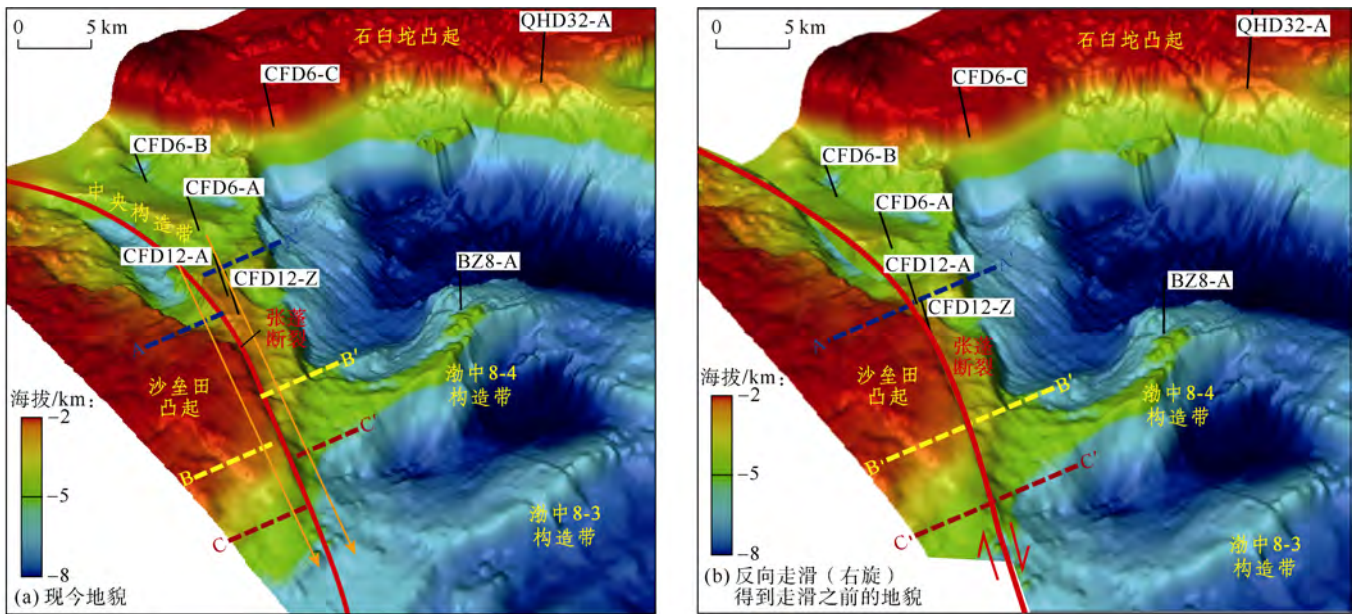


图7 基底参考点走滑断距分析图

②基底地貌相似性走滑断距分析法。同样根据走滑前两盘地貌相似原理<sup>[25]</sup>，通过基底地貌相似性断距分析法计算断距：选取走滑断裂附近两盘沿走滑断裂走向的4 km古地貌线为样本，对样本线进行200等分，并将两盘匀速按着每步200 m反左旋，即右旋错动恢复古地貌（见图8），依次计算每一次错动对应两盘海拔差平方和：

$$P_k = \sum_{i=1}^{200} (H_i - H_{i+k})^2 \quad (1)$$

的总断距。笔者采用两种方法对其走滑量进行了计算。

①基底参考点走滑断距分析法。走滑活动前，东西两盘的基底地貌应该是相似度最高的<sup>[25]</sup>。根据此原理，在走滑断裂的两盘各选取两组以上地貌特征比较相似的参考点，量取各组断点在走滑断裂上垂直投影位置之间的距离，并求取平均值。通过这个方法，在张蓬断裂沙东北段主走滑断层两盘基底上选取了3组参考点（A和A'、B和B'、C和C'），量取3组断距，计算平均值，得到新生代平均断距为4 km。同时，通过反向走滑（右旋）4 km，得到张蓬断裂沙东北段活动之前的古地貌，古地貌过渡平顺，也证明了走滑量估计合理（见图7）。

当  $P_k$  为最小值时，两盘的地貌最为接近，则走滑断距为：

$$L = 0.2k_{\min} \quad (2)$$

经过计算机编程计算发现，当右旋步数为20时  $P_k$  最小，进而计算出新生代走滑断距为4 km。这与参考点分析法估算的断距相等，证明了新生代走滑断距应该为4 km。通过反向走滑（右旋）4 km，得到张蓬断裂沙东北段活动之前的古地貌，古地貌过渡平顺，证明新生代走滑量估计合理。



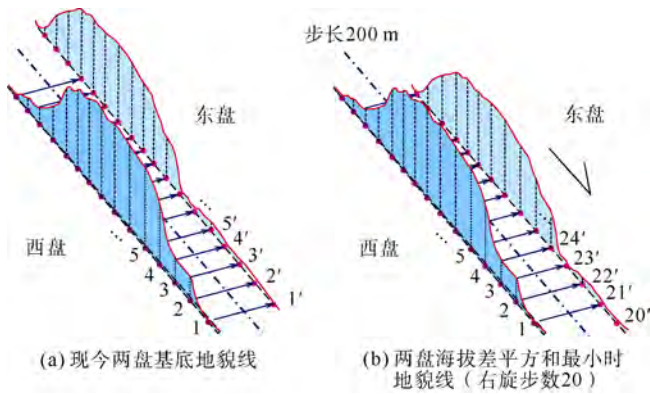


图8 基底地貌相似性断距分析法示意图(东西两盘的地貌参考线位置见图7a)

### 2.3.2 上新世—第四纪走滑量

如果走滑断层切割沉积体,那么沉积体会发生错动,因此沉积体记录了沉积之后的走滑位移量<sup>[43]</sup>。据此原理,笔者采用沉积体系对比走滑断距分析法估算了馆陶组上新世—第四纪的走滑量:馆陶组砂砾岩体的地震相为中—弱振幅弱连续性反射,根据地震属性刻画了该砂砾岩体的范围,发现张蓬断裂沙东北段主走滑断裂东西两侧的砂砾岩体错动明显(见图9)。通过东西两盘砂砾岩体及其沉积体系的参考点分析与测量,馆陶组沉积之后上新世—第四纪的走滑断距是3 km(见图9)。

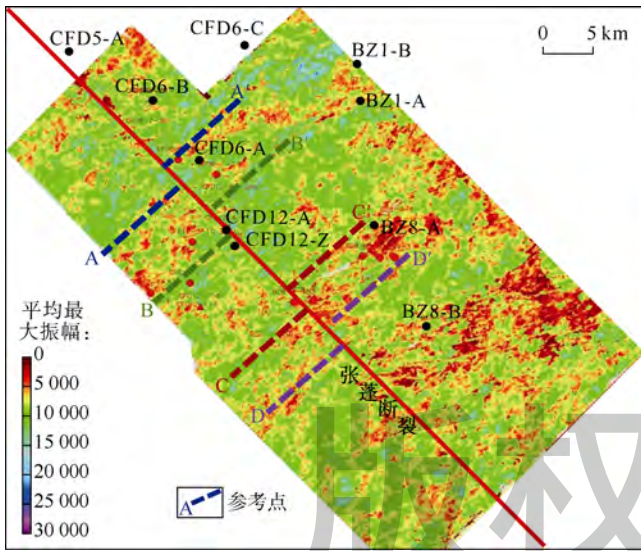


图9 走滑断距分析图

### 2.3.3 渐新世走滑位移量

根据走滑活动断距的累加原理,新生代走滑位移量等于渐新世走滑位移量与上新世以来走滑位移量之和,因此,渐新世走滑位移量等于新生代走滑位移量(4 km)减去上新世以来走滑位移量(3 km),由此可得渐新世走滑位移量为1 km。

通过以上研究表明:新生代张蓬断裂沙东北段总的走滑位移量为4 km,其中渐新世走滑位移量为1 km,上新世—第四纪走滑错动3 km,上新世—第四纪走滑活动较渐新世更为强烈。这与走滑派生断层的断层活动变化速率趋势一致,也符合张蓬断裂第四纪以来活动较强、地震活动频繁的构造背景<sup>[6-9]</sup>。

与其共轭走滑断裂——郟庐断裂新生代的右旋走滑特征相比<sup>[15-17]</sup>(见表1),张蓬断裂沙东北段总的左旋走滑位移量为4 km,远小于郟庐断裂10~20 km的右旋走滑位移量<sup>[3,5,19,40]</sup>,这说明张蓬断裂活动尺度弱于郟庐断裂。郟庐断裂渐新世的活动强于上新世—第四纪,张蓬断裂上新世—第四纪活动强于渐新世,即前者早强晚弱,而后者早弱晚强。渐新世以来,张蓬断裂与郟庐断裂活动强度互为消长。笔者推测,从古近纪到新近纪,喜马拉雅运动的远端效应和太平洋板块俯冲方向变化的共同作用使华北板块由向北东向挤出变为向东挤出<sup>[3,5-6,19]</sup>,由此导致共轭断裂之间活动强度的相互转化,同时也造成现今张蓬断裂带的地震活动较郟庐断裂更为活跃。

## 3 走滑断裂带的盆岭再造与构造演化

### 3.1 走滑构造带的盆岭再造

综合研究表明,研究区是早期(裂陷早幕)伸展、晚期(裂陷晚幕—新构造运动)走滑-拉分的叠合区域。晚期的走滑-拉分运动是在早期伸展构造背景下的盆地格局的重要变革,发生盆岭再造,形成了中央构造带。

张蓬断裂沙东北段的左旋活动控制了中央构造带的演化(见图10):①走滑错动形成的“海豚效应”奠定了中央构造带的基础。张蓬断裂左旋斜切了沙垒田凸起高部位的“一角”,这“一角”相对于西盘沙垒田凸起的主体向北错动了4 km,平移到了凹陷区,发生“海豚效应”<sup>[25-27]</sup>,形成了凹陷区相对较高的中央构造带的雏形(见图7、图10)。可见左旋走滑的“海豚效应”是形成中央构造带的基础。②走滑拉分、差异升降促使中央构造带进一步强化。在张蓬断裂沙东北段主走滑断裂斜切凸起“一角”的同时,由于研究区张蓬断裂的断面为“S”形弯曲,因此在凸起边缘产生了一个局部的“左旋左阶”的走滑拉分区<sup>[44-45]</sup>(见图10),地层下陷,盆地边缘向西再造,促使中央构造带西侧剧烈沉降,也导致了中央构造带的相对隆升。

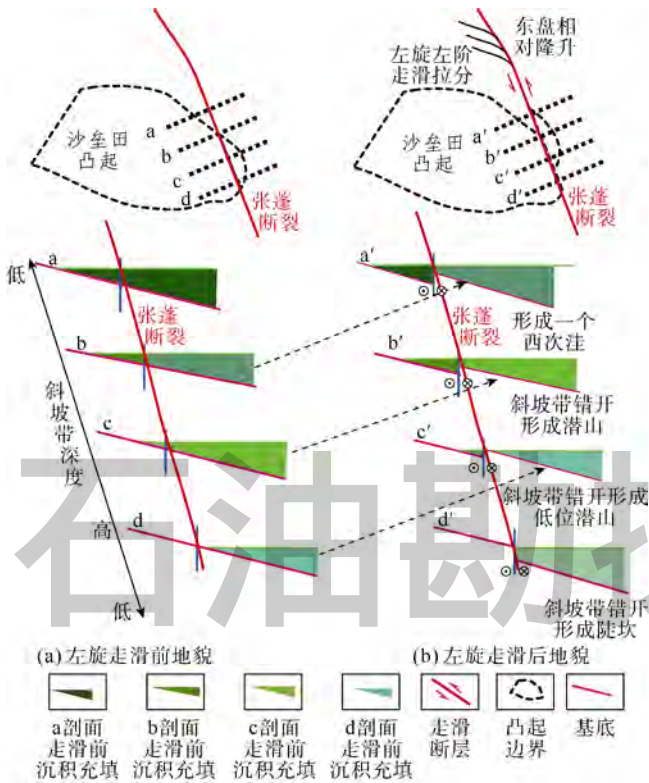


图10 中央构造带形成机制示意图

由此可见，除了差异沉降，走滑错动的“海豚效应”也是断裂带内伸展、走滑-拉分叠合和盆岭再造的重要原因。

### 3.2 研究区构造演化

通过对北西向中央构造带与北东向渤中 8-4 和渤中 8-3 构造带演化剖面的对比分析（见图 11）发现，渤中 8-4、渤中 8-3 构造带与中央构造带早期独立演化，晚期协同演化。①裂陷早幕，古新世—始新世时期，发生伸展背景下的早期裂陷，形成渤中 8-4 和渤中 8-3 构造带，此时中央构造带还是沙垒田凸起的一部分；②裂陷晚幕，渐新世时期，伴随着张蓬断裂左旋走滑的剧烈活动，在早期伸展构造背景下叠合发育走滑构造，中央构造带走滑错动形成，并与渤中 8-4 和渤中 8-3 构造带凹中隆协同演化；③新构造运动，上新世—第四纪时期，伴随着张蓬断裂走滑-拉分作用的加强，正断层大量发育，研究区构造进一步破碎化并最终定形，上新世是张蓬断裂带圈闭群形成的主要时期，这为油气的“晚期成藏”<sup>[10-12,28-35]</sup>奠定了基础。

由此可见，研究区的盆岭再造是早期伸展，晚期走滑-拉分这个盆地格局剧烈改变过程中构造叠加的结果，它既包含了新构造带——中央构造带的形成，也影响了先存构造带——渤中 8-4、渤中 8-3 构造带的继承性发育和定形。

## 4 走滑及其派生断裂活动对油气运移的控制作用

综合研究表明，张蓬断裂沙东北段渐新世以来的走滑运动及其断裂活动，导致了围区的盆岭再造，这一过程对研究区的晚期成藏<sup>[10-12]</sup>有重要影响。

①盆岭再造形成低势区，从而控制了深层油气运移。张蓬断裂沙东北段的走滑活动发生盆岭再造，导致了北西向中央构造带在渐新世的形成和上新世流体低势的强化，同时控制了北东向的渤中 8-4 和渤中 8-3 这两个先存构造带在渐新世—上新世以来的继承性发育（见图 11），由此形成了研究区主要的几个流体低势区，从而控制了深层油气运移。实际钻探资料揭示：研究区整体上为深、浅复合成藏，浅层富集区与深层聚集区叠合较好，说明油气深层聚集区应该为浅层富集区的油气中转站<sup>[13]</sup>（见图 5、图 12），可见张蓬断裂沙东北段的剧烈活动导致的盆岭再造控制了研究区油气运移主要方向。

②重塑了纵向上的油气运移通道，从而控制了“浅层油气运移”。研究区主要的成藏时间为上新世以来<sup>[10-12,28-35]</sup>，这恰好是张蓬断裂左旋最为强烈的新构造运动时期，形成了大量的走滑-伸展断层。但并不是所有的断层都是油气运移通道，而且断层在走向上其活动速率会发生变化，达到一定活动速率的断裂点/段才是油气充注点/段<sup>[28,46-48]</sup>。这些油源断裂充注点/段是浅层油气横向运移的“起始点”，对于浅层的油气运移非常关键（见图 5、图 13）。

对研究区及其周围油田的断层活动速率和浅层储量占比的关系统计表明，当斜坡带断层活动速率低于 20 m/Ma，凹陷区断层活动速率低于 30 m/Ma 时，油气主要在深层古近系成藏；当斜坡带断层活动速率高于 20 m/Ma，凹陷区断层活动速率低于 30 m/Ma 时，油气主要在浅层成藏。所以断层活动速率 20 m/Ma 和 30 m/Ma 分别是斜坡带和凹陷区在浅层形成油气有效充注的门限。

根据这两个门限，对研究区的油源断裂的油气充注点/段进行了识别（见图 5），分析表明：①张蓬断裂及其派生断裂控制了研究区 85% 的充注点/段分布；②浅层断裂虽然有 137 条，但只有 31 条断层是油源断层，且只有 17% 的断面成为了充注点/段，研究区断层虽多，但能作为油气运移通道的却很少。



通过这些充注点/段的约束进行了油气运移模拟 (见图 13), 预测了浅层的油气运移路径与成藏部位。模拟结果与现今浅层油气藏的吻合度达到 85% (见图 5、图 13)。这说明, 一方面本文分析方法、模拟结果

可靠, 能很好地预测复杂断块区的浅层油气运移路径, 具有很好的实用性; 另一方面证明了张蓬断裂带沙东北段控制浅层油气运移的起始点、充注点/段, 从而控制了研究区浅层的油气成藏。

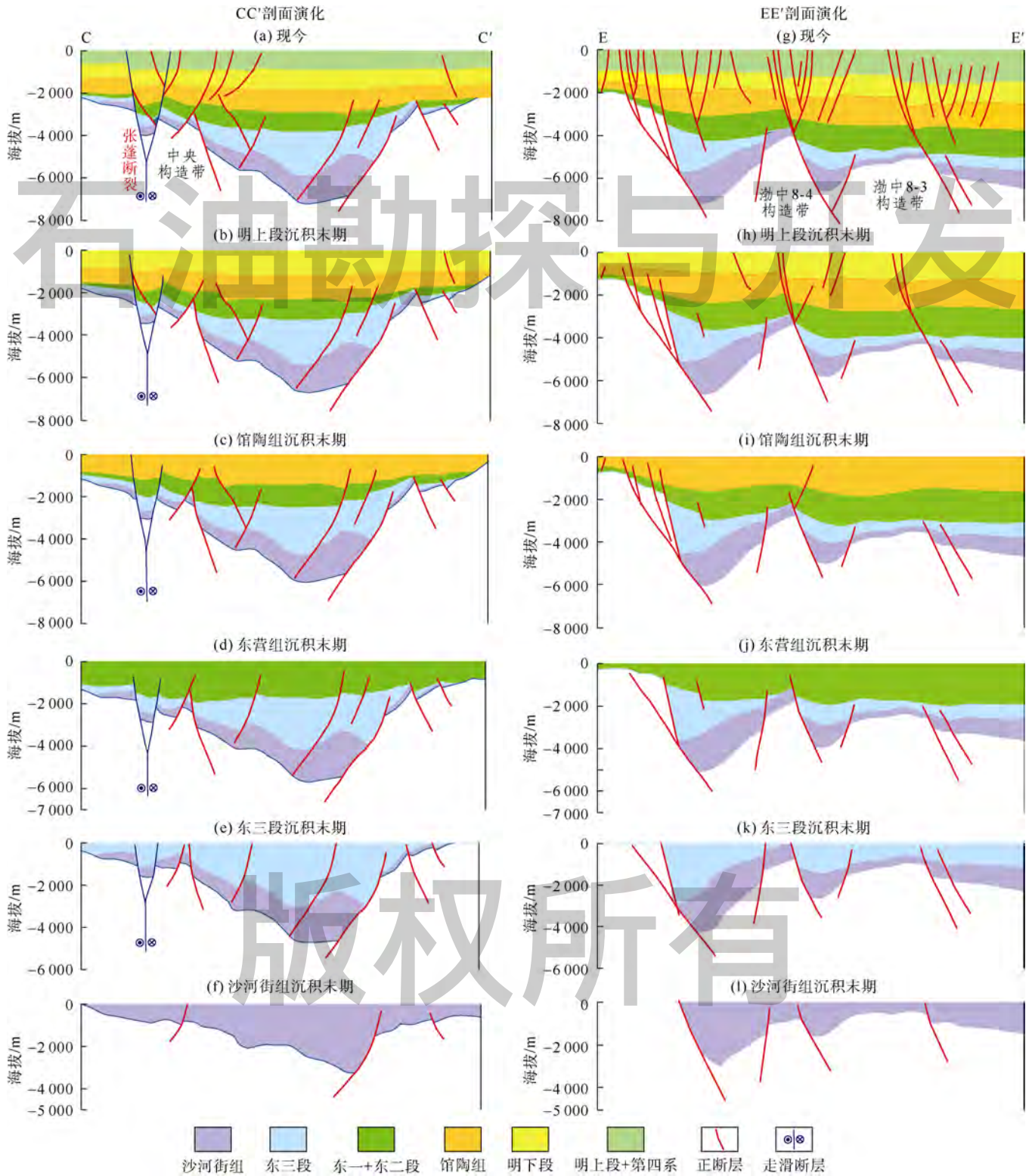


图 11 中央构造带与北东向构造共轭演化图 (剖面位置见 1)

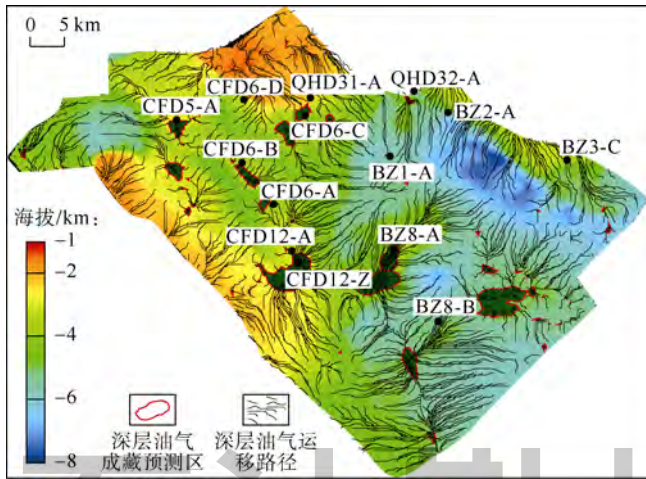


图12 深层油气迁移模拟图

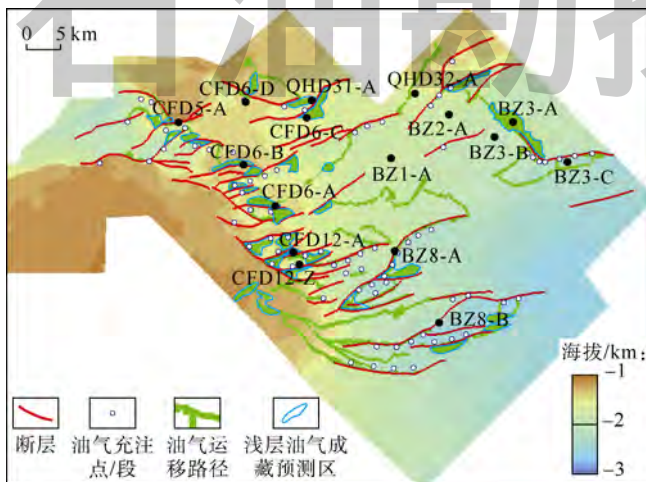


图13 基于充注点分析的浅层油气迁移图(图中仅标出了比较重要的油气迁移断层和控圈断层)

## 5 结论

研究区是早期(古—始新世)伸展和晚期(渐新世、上新世—第四纪)走滑-拉分的叠合构造发育区,张蓬断裂渤海沙东北段左旋走滑的主要时期为渐新世和上新世—第四纪。基底地貌和沉积体系对比表明:张蓬断裂沙东北段新生代以来左旋走滑位移量共计4 km,其中渐新世活动较弱为1 km,上新世—第四纪较强为3 km。上新世—第四纪的新构造运动是张蓬断裂左旋活动最为剧烈的时期。

张蓬断裂与郯庐断裂活动强度互为消长:张蓬断裂沙东北段上新世—第四纪活动强于渐新世,郯庐断裂渐新世活动强于上新世—第四纪,前者早弱晚强,而后者早强晚弱。研究区的盆岭再造是早期伸展、晚期走滑-拉分盆地格局剧烈改变过程中构造叠加的结果,它既包含了新构造带——中央构造带的形成,也影响了先存构造带——渤中8-4、渤中8-3构造带的继承性发育和定形。走滑带除了差异沉降,走滑错动的海

豚效应也是断裂带内盆岭再造的重要机制。

张蓬断裂沙东北段的走滑活动及其新构造运动导致了盆岭再造和低势区的形成,从而控制了深层油气运移,其大量发育的派生断裂重塑了纵向上的油气运移通道,从而控制了浅层油气运移。这一认识及其分析方法对于复杂断裂带油气的深浅复合勘探有重要借鉴意义。

致谢:感谢中海油天津分公司徐长贵、牛成民、王德英、杜晓峰和张新涛等专家在张蓬断裂带构造演化研究工作中给予的支持和帮助。

符号注释:

$H$ ——海拔, m;  $i$ ——样本点序号,  $i=1, 2, \dots, 200$ , 无因次;  $k$ ——断层错动次数, 无因次;  $k_{\min}$ —— $P_k$  为最小值时对应的右旋步数, 无因次;  $L$ ——走滑断距, km;  $P_k$ ——第  $k$  次错动对应断层两盘海拔差平方和,  $m^2$ 。

参考文献:

- [1] 徐嘉伟. 论走滑断层作用的几个主要问题[J]. 地质前缘, 1995, 2(2): 125-136.  
XU Jiawei. Some major problems on strike slip faulting[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(2): 125-136.
- [2] 刘和甫, 夏义平, 殷进垠, 等. 走滑造山带与盆地耦合机制[J]. 地质前缘, 1999, 6(3): 121-132.  
LIU Hefu, XIA Yiping, YIN Jinyin, et al. Coupling mechanism of strike-slip orogeny and basin[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(3): 121-132.
- [3] 朱光, 王道轩, 刘国生, 等. 郯-庐断裂带的演化及其对西太平洋板块运动的响应[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 36-49.  
ZHU Guang, WANG Daoxuan, LIU Guosheng, et al. Evolution of the Tan-Lu fault zone and its response to plate movement in West Pacific basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1): 36-49.
- [4] YIN A, NIE S. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam Fault Systems, eastern Asia[J]. Tectonics, 1993, 12(4): 801-813.
- [5] 吴根耀, 梁兴, 陈焕疆. 试论郯城—庐江断裂带的形成、演化及其性质[J]. 地质科学, 2007, 42(1): 160-175.  
WU Genyao, LIANG Xing, CHEN Huanjiang. An approach to the Tancheng-Lujiang fault zone: Its creation, evolution and character[J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(1): 160-175.
- [6] 索艳慧, 李三忠, 刘鑫, 等. 中国东部 NWW 向活动断裂带构造特征: 以张家口-蓬莱断裂带为例[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 953-966.  
SUO Yanhui, LI Sanzhong, LIU Xin, et al. Structural characteristics of NWW trending active fault zones in East China: A case study of the Zhangjiakou-Penglai Fault Zone[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(3): 953-966.
- [7] 李西双, 刘保华, 华清峰, 等. 张家口-蓬莱断裂带渤海段晚第四纪活动特征[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(3): 332-341.  
LI Xishuang, LIU Baohua, HUA Qingfeng, et al. Characters of the Zhangjiakou-Penglai fault zone activity in the Bohai Sea since late Quaternary[J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(3): 332-341.
- [8] 徐杰, 宋长青, 楚全芝. 张家口—蓬莱断裂带地震构造特征的初



- 步探讨[J]. 地震地质, 1998, 20(2): 146-154.
- XU Jie, SONG Changqing, CHU Quanzhi. Preliminary study on the seismotectonic characters of the Zhangjiakou-Penglai fault zone[J]. *Seismology and Geology*, 1998, 20(2): 146-154.
- [9] 高战武. 张家口—蓬莱断裂带地震地质特征研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2001: 9-117.
- GAO Zhanwu. A study on characteristics of earthquake geology of the Zhangjiakou-Penglai Fault zone[D]. Beijing: Institute of Geology, CEA, 2001: 9-117.
- [10] 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.
- [11] 李新琦, 李慧勇, 于海波, 等. 张家口—蓬莱断裂带渤海段断裂特征及其与油气差异成藏的关系[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(5): 16-22.
- LI Xinqi, LI Huiyong, YU Haibo, et al. Fault characteristics and its relationship with differential hydrocarbon accumulation of Zhangjiakou-Penglai Fault in Bohai region[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(5): 16-22.
- [12] 董月霞, 汪泽成, 郑红菊, 等. 走滑断层作用对南堡凹陷油气成藏的控制[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(4): 424-430.
- DONG Yuexia, WANG Zecheng, ZHENG Hongju, et al. Control of strike-slip faulting on reservoir formation of oil and gas in Nanpu Sag[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(4): 424-430.
- [13] 田鹏, 马庆佑, 吕海涛. 塔里木盆地北部跃参区块走滑断裂对油气成藏的控制[J]. 石油实验地质, 2016, 38(2): 156-161.
- TIAN Peng, MA Qingyou, LYU Haitao. Strike-slip faults and their controls on hydrocarbon reservoirs in the Yuecan block of the Northern Tarim Uplift, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(2): 156-161.
- [14] 田继强, 贾承造, 段书府, 等. 海拉尔盆地贝尔凹陷走滑断层特征及石油地质意义[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(2): 293-298.
- TIAN Jiqiang, JIA Chengzao, DUAN Shufu, et al. Features of strike-slip faults in Beier Sag, Hailaer Basin and geological significance for petroleum[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(2): 293-298.
- [15] 董亨茂, 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.
- [16] 朱光, 宋传中, 王道轩, 等. 郯-庐断裂带走滑时代的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究及其构造意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2001, 31(3): 250-256.
- ZHU Guang, SONG Chuanchong, WANG Daoxuan, et al. Studies on  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  thermochronology of strike-slip time of the Tan-Lu fault zone and their tectonic implications[J]. *SCIENCE CHINA Earth Sciences*, 2001, 44(11): 1002-1009.
- [17] 彭靖淞, 徐长贵, 吴奎, 等. 郯-庐断裂带辽东凸起的形成与古辽中洼陷的瓦解[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 274-285.
- PENG Jingsong, XU Changgui, WU Kui, et al. Formation of Liaodong uplift and collapse of the ancient Liaozhong sag in Tanlu fault zone[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(3): 274-285.
- [18] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(6): 845-851.
- HOU Guiting, QIAN Xianglin, CAI Dongsheng. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic Time[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2001, 37(6): 845-851.
- [19] 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: 地球科学, 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 CHINA Earth Sciences*, 2012, 55(3): 476-487.
- [20] 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 modeling of through-going process and development pattern of strike-slip fault zone[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(3): 340-348.
- [21] 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 等. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造[J]. 地质学报, 1983, 57(1): 22-32.
- MA Xingyuan, LIU Hefu, WANG Weixiang, et al. Meso-Cenozoic taphrogeny and extensional tectonics in eastern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1983, 57(1): 22-32.
- [22] 漆家福, 周心怀, 王谦身, 等. 渤海海域中郑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, et al. Structural model and Cenozoic kinematics of Tan-Lu deep fracture zone in Bohai Sea area[J]. *Geology in China*, 2010, 37(5): 1231-1242.
- [23] 漆家福, 陈发景. 辽东湾-下辽河裂陷盆地的构造样式[J]. 石油与天然气地质, 1992, 13(3): 272-283.
- QI Jiafu, CHEN Fajing. Structural style in Liaodongwan-Xialiaohe Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 1992, 13(3): 272-283.
- [24] 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): 483-496.
- 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): 483-496.
- [25] 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, 48.
- XIA Yiping, LIU Wanhui, XU Ligui, et al. Identification of strike-slip fault and its petroleum geology significance[J]. *China Petroleum Exploration*, 2007, 12(1): 17-23, 48.
- [26] 王超, 吕延防, 王权, 等. 油气跨断层侧向运移评价方法: 以渤海湾盆地冀中拗陷霸县凹陷文安斜坡史各庄鼻状构造带为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 880-888.
- WANG Chao, LYU Yanfang, WANG Quan, et al. Evaluation of oil and gas lateral migration across faults: A case study of Shigezhuang nose structure of Wen'an slope in Baxian sag, Jizhong depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(6): 880-888.
- [27] 罗小龙, 汤良杰, 谢大庆, 等. 塔里木盆地雅克拉断凸走滑作用及其形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 257-263.
- LUO Xiaolong, TANG Liangjie, XIE Daqing, et al. Strike-slip movement and its genetic mechanism in Yakela faulted salient, the Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(2): 257-263.
- [28] 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, 482.
- ZHOU Xinhui, NIU Chengmin, TENG Changyu. Relationship between faulting and hydrocarbon pooling during the neotectonic movement around the central Bohaibay[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009,

- 30(4): 469-475, 482.
- [29] 邓运华. 断裂-砂体形成油气运移的“中转站”模式[J]. 中国石油勘探, 2005, 10(6): 14-17.  
DENG Yunhua. "Transfer station" model of oil-gas migration formed by fault-sandbody[J]. China Petroleum Exploration, 2005, 10(6): 14-17.
- [30] 徐长贵, 周心怀, 邓津辉. 渤海锦州 25-1 大型轻质油气田的发现与启示[J]. 中国石油勘探, 2010, 15(1): 34-38.  
XU Changgui, ZHOU Xinhui, DENG Jinhui. Discovery of large-scale Jinzhou 25-1 light oil & gas field in Bohai sea area and its enlightenment[J]. China Petroleum Exploration, 2010, 15(1): 34-38.
- [31] 邓运华, 李建平. 浅层油气藏的形成机理: 以渤海油区为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.  
DENG Yunhua, LI Jianping. Shallow reservoir formation mechanism: Taking Bohai oil province for example[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [32] 龚再升, 蔡东升, 张功成. 郑-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.
- [33] 孙和风, 周心怀, 彭文绪, 等. 渤海南部黄河口凹陷晚期成藏特征及富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(3): 307-313.  
SUN Hefeng, ZHOU Xinhui, PENG Wenxu, et al. Late-stage hydrocarbon accumulation and enrichment in the Huanghekou sag, southern Bohai Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(3): 307-313.
- [34] 彭靖淞, 徐长贵, 韦阿娟, 等. 渤海湾盆地辽中南洼压力封存箱的破裂与油气运移[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 386-395.  
PENG Jingsong, XU Changgui, WEI Ajuan, et al. Hydrocarbon migration caused by rupture of pressure compartment in south Liaozhong sag, Bohai Bay Basin, Offshore China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 386-395.
- [35] 周心怀, 刘震, 李潍莲. 辽东湾断陷油气成藏机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.  
ZHOU Xinhui, LIU Zhen, LI Weilian. Accumulation mechanism of oil and gas in Liaodongwan Depression[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [36] 王洪亮, 邓宏文. 渤海湾盆地第三系层序地层特征与大中型气田分布[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(2): 100-103.  
WANG Hongliang, DENG Hongwen. Tertiary sequence stratigraphy and major gas fields in Bohai Bay Basin[J]. China Offshore Oil and Gas(Geology), 2000, 14(2): 100-103.
- [37] 赵利, 李理. 济阳拗陷内正断层与平移断层关系[J]. 地质论评, 2017, 63(1): 50-60.  
ZHAO Li, LI Li. The relationships between normal fault and strike-slip fault in Jiyang Depression[J]. Geological Review, 2017, 63(1): 50-60.
- [38] 赵勇, 戴俊生. 应用落差分析研究生长断层[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 13-15.  
ZHAO Yong, DAI Junsheng. Identification of growth fault by fault fall analysis[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 13-15.
- [39] 刘建国, 刘延峰, 黎有炎, 等. 惠民凹陷西部断层活动性研究[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(4): 195-199.  
LIU Jianguo, LIU Yanfeng, LI Youyan, et al. Research on fault activity in the west of Huimin Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(4): 195-199.
- [40] 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 structure study and its significance to petroleum exploration on Laizhouwan Sag, Bohai area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(2): 19-25.
- [41] 张新超, 孙赞东, 赵俊省, 等. 塔中北斜坡走滑断裂断距及其与油气的关系[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(5): 528-530.  
ZHANG Xinchao, SUN Zandong, ZHAO Junsheng, et al. The effect of strike slip faulting throw on hydrocarbons in northern slope of Tazhong Area, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(5): 528-530.
- [42] 任治坤, 张竹琪, 陈涛, 等. 侧向侵蚀相关的走滑断裂滑动速率计算新方法[J]. 地震地质, 2014, 36(4): 1020-1028.  
REN Zhikun, ZHANG Zhuqi, CHEN Tao, et al. A new method for determining slip rates of strike-slip fault associated with lateral erosion of accumulated offset[J]. Seismology and Geology, 2014, 36(4): 1020-1028.
- [43] 徐长贵, 彭靖淞, 柳永军, 等. 辽中凹陷北部新构造运动及其石油地质意义[J]. 中国海上油气, 2016, 28(3): 20-30.  
XU Changgui, PENG Jingsong, LIU Yongjun, et al. Neotectonic movement and its petroleum geology significance in northern Liaozhong Sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(3): 20-30.
- [44] 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.
- [45] 刘晓文, 施尚明, 何春波, 等. 辽河拗陷黄金带油田构造变形特征及控藏作用[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(3): 562-567.  
LIU Xiaowen, SHI Shangming, HE Chunbo, et al. Structural deformation features and its control on hydrocarbon accumulation in Huangjindai oilfield, Liaohe Depression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(3): 562-567.
- [46] 邓津辉, 周心怀, 魏刚, 等. 郑庐走滑断裂带活动特征与油气成藏的关系: 以金县地区为例[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 102-106.  
DENG Jinhui, ZHOU Xinhui, WEI Gang, et al. Strike-slip faulting activities in the Tanlu fault zone and their relationship with hydrocarbon accumulation: An example from Jinxian Area[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 102-106.
- [47] 王冠民, 熊周海, 张健, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷油藏断裂特征及对成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 62-70.  
WANG Guanmin, XIONG Zhouhai, ZHANG Jian, et al. Characterization of fault system and its control on reservoirs in the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 62-70.
- [48] 彭靖淞. 基于断层封闭性研究的晚期成藏油气运移模式探讨: 以渤海油田辽东湾为例[J]. 石油地质与工程, 2016, 30(4): 66-70.  
PENG Jingsong. The research of the late hydrocarbon migration and accumulation models in Liaodong Bay based on the study of fault sealing[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2016, 30(4): 66-70.

第一作者简介: 彭靖淞(1984-), 男, 重庆人, 硕士, 中海石油(中国)有限公司天津分公司高级工程师, 主要从事构造与石油地质综合研究。地址: 天津市滨海新区海川路2121号, 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 邮政编码: 300459。E-mail: pengjs@cnooc.com.cn

收稿日期: 2017-03-31 修回日期: 2018-02-08

(编辑 黄昌武 张朝军)