

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2017102

郯庐断裂新生代构造演化及其对烃源岩生排烃的影响： 以辽东湾坳陷辽中凹陷为例

蒋子文¹, 罗静兰¹, 王嗣敏^{2*}, 华晓莉³, 牛新杰⁴, 田亚⁵, 王晓蕾⁶, 崔凯¹

1. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;

2. 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;

3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452;

4. 中国石油 华北油田分公司, 任丘 062552;

5. 中国地质调查局 油气资源调查中心, 北京 100029;

6. 中国石油 大庆油田有限责任公司第五采油厂, 大庆 163513

摘要: 郯庐断裂带是渤海海域重要的活动断裂带, 控制着该地区油气成藏的生储盖运圈保条件。以辽东湾坳陷辽中凹陷为研究对象, 利用三维地震资料、平衡剖面分析对郯庐断裂几何学特征、演化特征进行研究; 在此基础上, 分析郯庐断裂走滑活动对烃源岩发育、分布、演化及生排烃的影响。辽东湾坳陷新生代构造演化分为五个构造演化阶段、三个构造演化旋回。郯庐断裂走滑活动可错开先期、同期发育的烃源岩, 改变烃源岩位置及生烃潜力的空间分布, 有利于形成局部水体更深的还原环境, 发育生烃潜力更大的烃源岩。走滑活动使断裂带附近地温梯度和大地热流升高, 有利于降低生烃门限。郯庐断裂不同时期不同部位具有不同的活动性质, 对油气运移起封闭或者运移通道作用。东营组沉积期晚期和明化镇组下段沉积期至今的断裂走滑活动与烃源岩大量生排烃期、油气成藏时期具有良好的匹配关系, 提出郯庐断裂走滑活动可形成“拖曳”生排烃现象, 使与走滑断层相关的圈闭中即使烃源岩条件较差亦可能具有勘探价值, 从而突破了传统的油气勘探思路。

关键词: “拖曳”生排烃; 油气运移; 烃源岩; 辽东湾坳陷; 郯庐断裂带; 走滑断层

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2018)04-0573-11

Tectonic Evolution of the Tan-Lu Fault in the Cenozoic and Its Effect on Hydrocarbon Generation and Expulsion of Source Rocks: A Case Study of the Liaozhong Sag (Liaodong Bay Depression)

JIANG Ziwen¹, LUO Jinglan¹, WANG Simin^{2*}, HUA Xiaoli³, NIU Xinjie⁴, TIAN Ya⁵, WANG Xiaolei⁶, CUI Kai¹

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. CNOOC China Limited Tianjing Branch, Tianjin 300452, China; 4. PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China;

5. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China;

6. No.5 Oil Production Plant, Petro China, Daqing Oilfield Company, Daqing 163513, China

Abstract: The Tan-Lu fault zone is an important active fault zone in the Bohai Sea area, which controls the conditions of regional oil and gas accumulation. Based on a case study in the Liaozhong sag of the Liaodong Bay Depression, the geometrical and evolutionary

收稿日期: 2017-09-04; 修回日期: 2018-01-29

基金项目: 国家科技重大专项项目(2016ZX05026-003-005); 中海石油天津分公司重大基础科研项目(S10TJMM016)联合资助

作者简介: 蒋子文, 男, 1987年生, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业, 主要从事含油气盆地分析方面的研究; E-mail: jiangziwen0601@163.com

*通讯作者: 王嗣敏, 男, 1963年生, 博士, 副教授, 主要从事油气区综合地层学与含油气盆地分析研究; E-mail: sm_wang@sina.com

characteristics of the Tan-Lu fault were studied by using 3D seismic data and the balanced section technique. Based on the results, the influence of the strike-slip activity of the Tan-Lu fault on the development, distribution, evolution, generation and expulsion of source rock was addressed. Results show that the tectonic evolution of the Liaodong Bay depression in the Cenozoic is divided into five stages and three cycles. The strike-slip activity of the Tan-Lu fault staggers the source rocks developed in the early and synchronous stages, changes the spatial distribution of source rock and hydrocarbon generation potential, and makes it beneficial to form reducing environments and develop source rocks with higher hydrocarbon generation potential. The strike-slip activity increases the geothermal gradient and the geothermal heat flow near the fault zone, which is conducive to reducing the hydrocarbon generation threshold. Different parts of the Tan-Lu fault vary in activities in periods, and they act as close or open channels for hydrocarbon migration. The Tan-Lu fault strike-slip activity from the late Dongying and early Minghuazhen stages to the present has a good matching with the main hydrocarbon generation and accumulation periods. It is suggested that the strike-slip activity of the Tan-Lu fault forms a "towed-pattern" of the hydrocarbon generation and expulsion. As a result, the traps with relatively poor source rock conditions may also have exploration value, which broadens the ideas of oil and gas exploration.

Key words: "towed-pattern" of the hydrocarbon generation and expulsion; hydrocarbon migration; source rock; Liaodong Bay depression; Tan-Lu fault zone; strike-slip fault

Corresponding author: WANG Simin, Associate Professor; E-mail: sm_wang@sina.com

郯庐断裂带是辽东湾拗陷乃至整个渤海海域重要的活动断裂带,已发现的油气主要沿郯庐断裂分布(龚再升等,2007;朱伟林等,2009)。目前对渤海海域构造演化阶段划分存在争议,有多种划分方案,有将构造演化进行“三分”(高瑞祺等,2004)、“四分”裂陷幕(冯有良等,2010)的方案,亦有“多旋回”划分方案(龚再升等,2007;朱伟林等,2009),其根本差异是对沙一、二段沉积期演化性质的认识不同。关于郯庐断裂对油气成藏的控制作用,前人进行过一定程度的研究,主要集中于分析郯庐断裂对“生储盖运圈保”条件的整体影响(葛建党,2001;褚庆忠等,2002;龚再升等,2007;杨克基等,2013;史浩等,2014;李才等,2014),而忽略了郯庐断裂走滑活动本身对油气成藏条件、尤其是对烃源岩形成与演化的控制作用。本文利用三维地震资料、平衡剖面分析对辽东湾拗陷辽中凹陷郯庐断裂几何学、运动学特征进行研究,在此基础上,探讨郯庐断裂走滑活动对烃源岩发育、分布、演化及生排烃的影响,进一步认识与走滑断裂有关地区的烃源岩条件,为走滑相关盆地油气勘探提供参考和地质依据。

1 区域地质概况

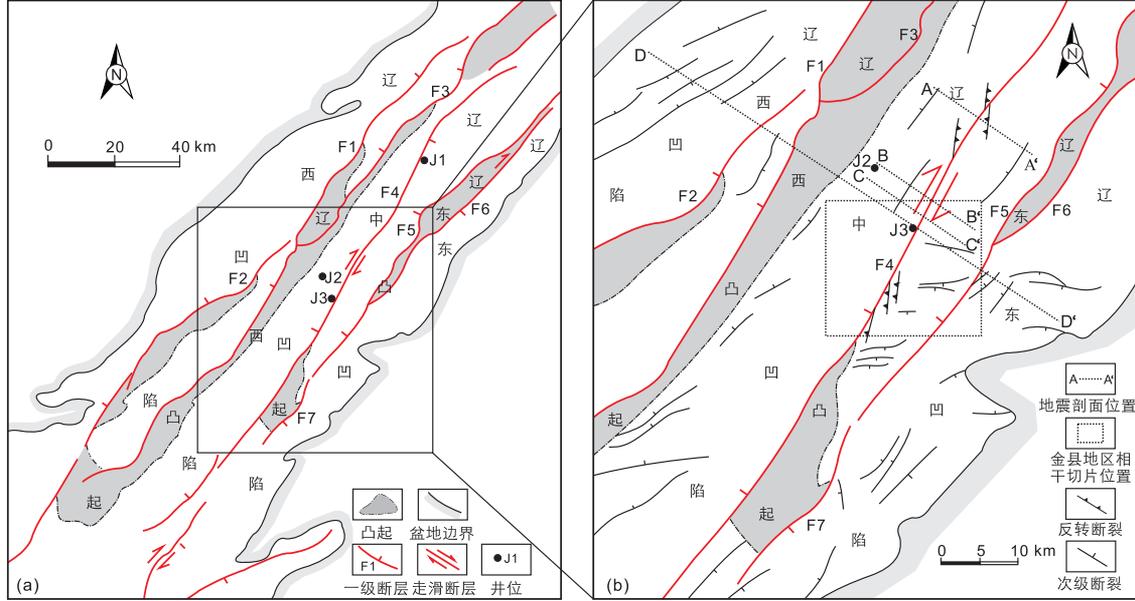
辽东湾拗陷位于渤海湾盆地东北部海域,是该盆地的一个二级构造单元,南界大致为老铁山与秦皇岛市连线,呈NNE向延伸(图1a),是下辽

河拗陷在渤海海域的自然延伸,属于发育在华北克拉通上的裂陷盆地,面积约 $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ (姜向强等,2007;Zhu et al.,2008;朱筱敏等,2008;马行陟等,2011;蒋子文等,2013)。辽东湾拗陷自东向西可划分为辽东凹陷、辽东凸起、辽中凹陷、辽西凸起和辽西凹陷5个次级构造单元,呈现“三凹夹两凸”的构造格局(Zhu et al.,2008;左银辉等,2009;Wang et al.,2014;Teng et al.,2016)(图1a)。辽中凹陷位于辽东凸起与辽西凸起之间的凹陷地区(图1)。

辽东湾拗陷新生界自下而上依次发育孔店组(E_{1-3k})、沙河街组(E_{2s})、东营组(E_{3d})、馆陶组(N_{1g})、明化镇组(N_{1-2m})和第四系平原组(Qp),部分组可进一步划分为相应的段、亚段(Zhu et al.,2008;Wang et al.,2014,2016;Xu et al.,2014;图2)。

2 郯庐断裂特征

辽东湾地区广义的郯庐断裂带可划分为东西两部分,西部地区的断裂由辽西1号(F1)、辽西2号(F2)和辽西3号(F3)等断裂组成(图1a),走滑特征不显著,主要以发育上陡下缓的铲式正断层为主,线性主干走滑断裂较少发育,个别地区具有不明显的走滑特征,控制着辽西低凸起的形成与演化。东部走滑带是狭义郯庐断裂带的主要组成部分(图1b),包括辽中1号(F4)、辽中2号(F5)、辽东1号(F7)和辽东2



F1: 辽西1号断层; F2: 辽西2号断层; F3: 辽西3号断层; F4: 辽中1号断层; F5: 辽中2号断层; F6: 辽东2号断层; F7: 辽东1号断层

图1 辽东湾拗陷构造单元划分 (图a据 Wang et al., 2014 修改; 图b据 Teng et al., 2016 修改)

Fig. 1 Division of structural units of the Liaodong Bay depression (Fig.a modified after Wang et al., 2014; Fig.b modified after Teng et al., 2016)

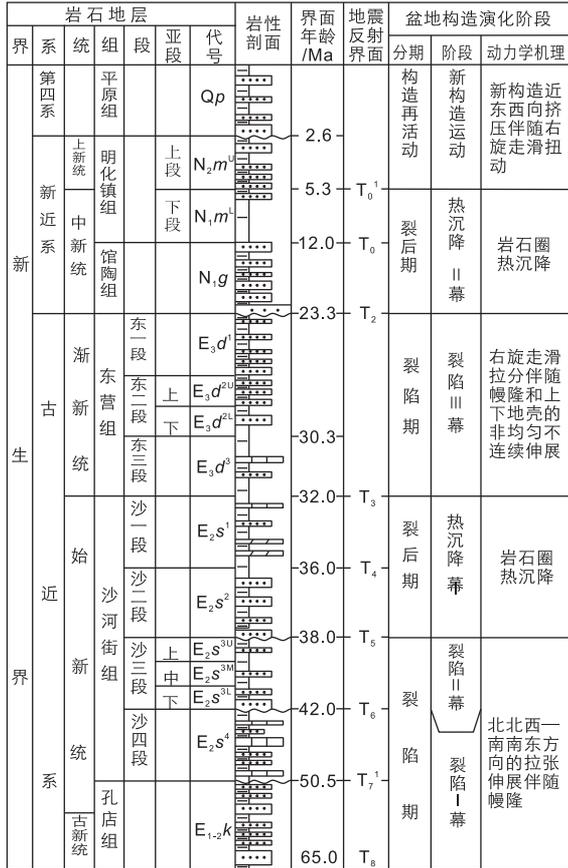


图2 辽东湾拗陷综合柱状图(构造演化阶段据龚再升等,2007)

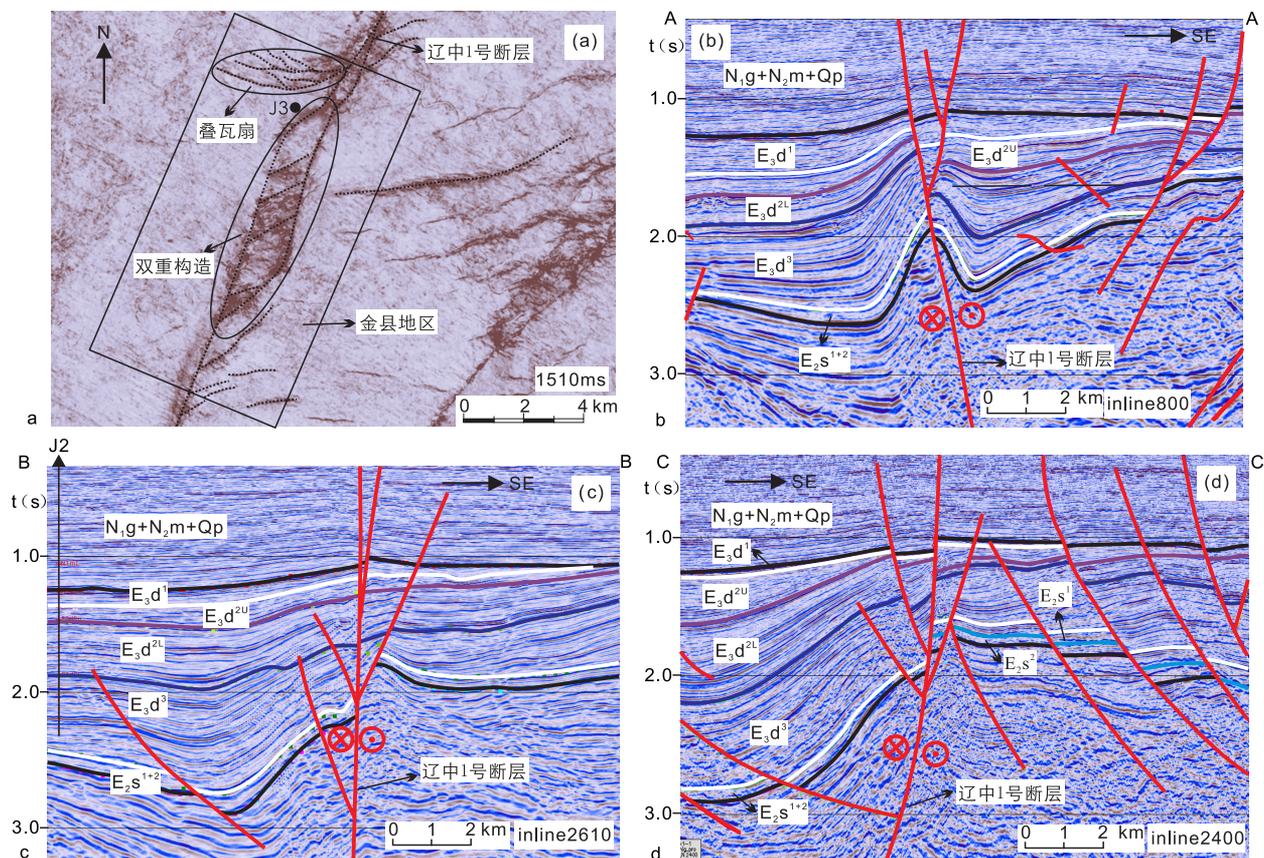
Fig. 2 Generalized comprehensive column of the Liaodong Bay depression (the tectonic evolution stage after Gong et al., 2007)

号(F6)断裂,这些断裂产状较陡,以走滑断裂系统与伸展断裂系统共同发育为特点,走滑特征明显(漆家福等,2008;杨桥等,2009),不同时期具有不同的伸展、走滑活动强度。

2.1 郯庐断裂几何学特征

平面上,辽东湾东部郯庐断裂带是由多条分段断裂共同组成的走滑断裂带,整体呈NE—NNE向展布(图1a)。辽中1号断裂是整个辽东湾拗陷延伸最长的一条右行走滑断裂,纵贯辽中凹陷,长约220 km,由多段组成,整体走向为NE向(图1a),最大断距可达4.5 km。辽中1号主走滑断裂旁侧,还发育一些次级张性分支断裂、反转断层(图1b, 3a)。辽中1号断裂纵穿辽中凹陷金县地区(图1b, 3a),走滑活动强烈,走滑活动持续时间长。金县地区发育的辽中1号断裂带在平面上表现出叠瓦扇和走滑双重构造等典型走滑特征(余一欣等,2014;徐长贵等,2015;图3a)。

辽东湾东部郯庐断裂剖面上具有花状构造、丝带效应等典型走滑特征。该地区走滑断裂主要表现为负花状构造,反映拉张的应力背景。辽中1号断裂近直立的主断层面可一直断至新近系中,主断层两侧发育一系列相向倾斜的分支正断层系,构成负花状构造(图3b, c, d)。断层面多变是鉴别走滑断裂的重要标志之一(严俊君等,



a: 辽东湾拗陷金县地区方差切片(1510 ms, 位置见图1); b: AA' 地震剖面(inline800测线, 剖面位置见图1); c: BB' 地震剖面(inline2610测线, 剖面位置见图1); d: CC' 地震剖面(inline2400测线, 剖面位置见图1)

图3 辽东湾拗陷邻庐断裂特征

Fig. 3 Basic seismic characteristics of the Tan-Lu fault zone in the Liaodong Bay depression

1996)。不同地区辽中1号断裂的倾向在NW, SE之间变化, 其中辽中1号主干断裂在BB'剖面中近直立, 主干断裂倾向由AA'剖面中SE倾演变为CC'剖面中NW倾(图3b, c, d), 呈现明显的丝带效应。

2.2 邻庐断裂演化特征

广义邻庐断裂带范围覆盖渤海海域, 邻庐断裂带新生代活动贯穿整个渤海海域新生代构造演化。渤海海域构造演化阶段划分中, “三分”、“四分”裂陷幕的观点是将沙一、二段沉积期划分为裂陷阶段, 孔店组—明化镇组下亚段沉积期整体构成一个裂陷—热沉降构造演化旋回, 而“多旋回”观点是将沙一、二段沉积期划分为裂后热沉降阶段, 孔店组—明化镇组下亚段沉积期划分为两个构造演化旋回。本文倾向于“多旋回”演化的划分方案, 该方案将渤海湾盆地构造演化划分为五个构造演化阶

段、三个构造演化旋回(龚再升等, 2007; 朱伟林等, 2009; 图2)。五个阶段分别为: (1) 孔店组—沙三段沉积期: 伸展拉张裂陷阶段(裂陷I幕和II幕, 65.0~38.0 Ma); (2) 沙一、二段沉积期: 盆地第一裂后热沉降拗陷阶段(38.0~32.0 Ma); (3) 东营组沉积期: 再次裂陷阶段(裂陷III幕, 32.0~23.3 Ma); (4) 馆陶组至明下段沉积期: 第二裂后热沉降阶段(23.3~5.1 Ma); (5) 明上段沉积至今: 构造再活动阶段(5.1 Ma至今), 以弱右旋走滑正断层活动为主。其中(1)(2)阶段构成一个演化旋回, (3)(4)阶段构成一个演化旋回, (5)阶段属于新构造演化旋回, 该旋回不完整, 目前还在进行中(龚再升等, 2007; 朱伟林等, 2009)。

将沙一、二段沉积划为第一裂后热沉降期的产物, 主要依据以下证据: (1) 沙一、二段在构造沉降史曲线上沉降速率低, 且与下伏地层间存在区域

不整合；(2) 沙一、二段沉积厚度和岩性变化均很小，特别是沙一段泥岩夹白云岩、生物灰岩为特征的“特殊岩性”段，全盆地可以追踪对比；(3) 沙一、二段沉积期的盆地分布范围较沙三段沉积期广得多，湖盆以“水浅面广”为特征；(4) 沙一、二段沉积期断裂活动微弱；(5) 沙一、二沉积期前的裂陷 I 幕、II 幕与其沉积后的裂陷 III 幕在盆地形成动力学体制上有显著差异，裂陷 III 幕走滑拉分的动力学机制十分强烈，而裂陷 I 幕、II 幕地层的非均匀不连续伸展作用突出（朱伟林等，2009）。

辽东湾拗陷新生代构造演化同样划分为多个

构造演化旋回，其中古近纪以伸展断裂系统与右行走滑断裂系统共同发育为主要特征（漆家福等，1994）。

(1) 伸展拉张裂陷阶段（孔店组—沙三段沉积期）

古近纪早期（裂陷 I 幕），地幔热隆起，地壳受其牵引拉张而发生裂陷作用（柳永军等，2016），盆地进入初始伸展断陷期，局部发育孔店组和沙四段地层，并形成一系列北东向主干正断层。始新世沙三段沉积期（裂陷 II 幕），断陷作用强烈，伸展断裂控制着各凹陷的沉降及沉积发育（图 4a），沉积了巨厚的沙三段地层，是该地区的

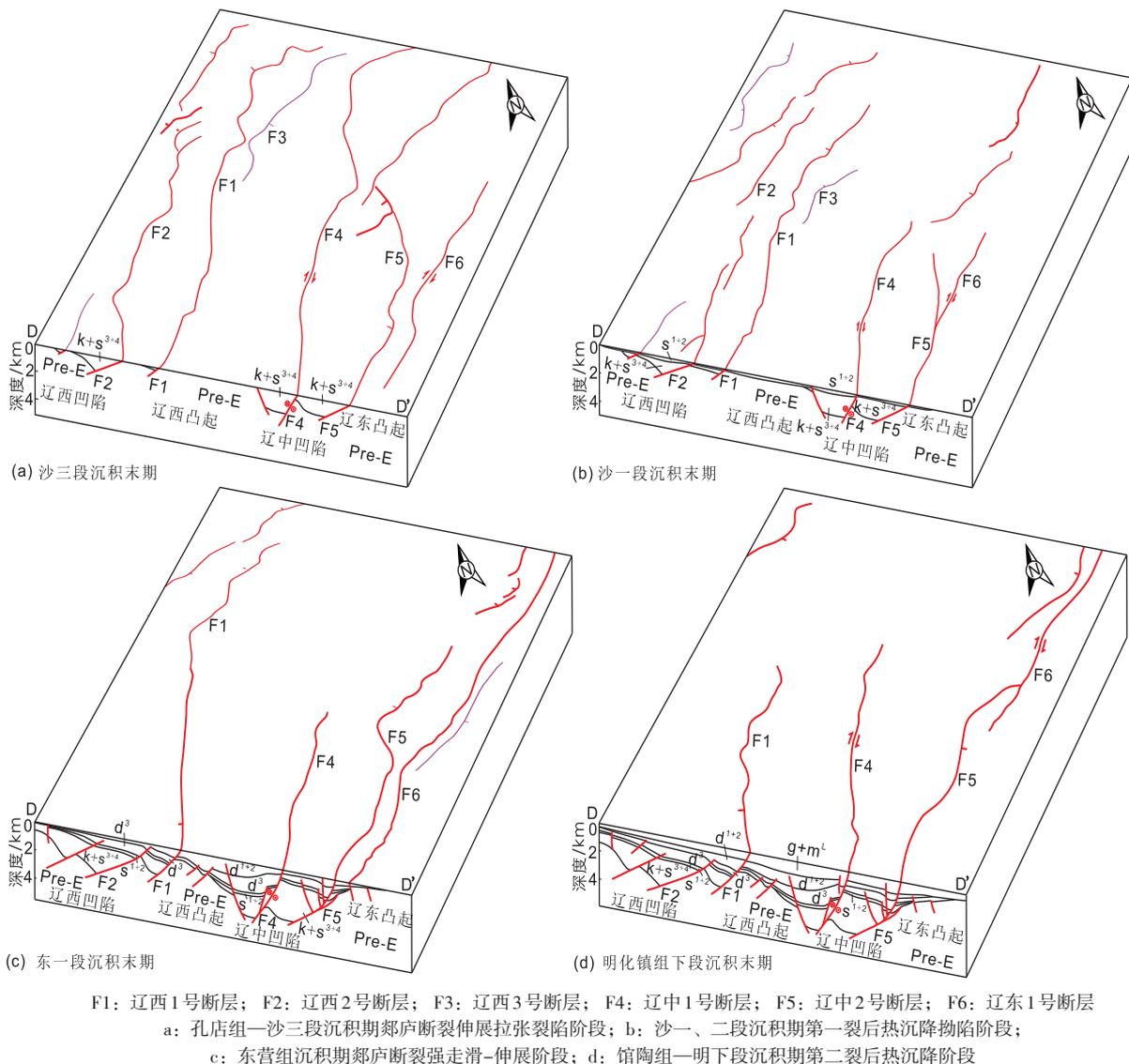


图4 辽东湾拗陷东部辽东断裂新生代构造演化(剖面位置见图1DD')

Fig. 4 Models of tectonic evolution of the Tan-Lu fault zone in the Cenozoic, eastern Liaodong Bay depression (profile position as shown in Fig.1DD')

主力烃源岩层。此时辽西凹陷、辽中凹陷以及二者夹持的辽西凸起已呈现锥形(柳永军等, 2016)。

(2) 第一裂后热沉降拗陷阶段(沙一、二段沉积期)

始新世晚期地幔热底辟作用明显减弱, 发生区域性热沉降, 整体处于构造稳定阶段, 伸展断陷活动微弱(图4b), 此时郯庐断裂开始右旋走滑活动(贾楠, 2015), 广泛沉积厚度较稳定的沙一、二段沉积。后受喜马拉雅运动I幕的影响, 发生区域性抬升。

(3) 走滑—伸展阶段(东营组沉积期)

渐新世发生再次裂陷, 由于受印度板块与欧亚板块呈NE向碰撞, 以及太平洋板块俯冲方向由NNW转为近NW向, 使得郯庐断裂发生强烈右旋走滑作用(夏庆龙, 2012)。辽东湾拗陷再次发生强烈断陷, 形成巨厚的东营组地层。辽东湾拗陷东部受郯庐断裂右旋走滑的影响逐渐形成辽东凸起和辽东凹陷, “三凹夹两凸”的构造格局在该时期基本成型(柳永军等, 2016; 图4c)。在伸展断裂控制各凹陷沉积发育及沉降的基础上, 强烈右行走滑断裂对部分地区沉积发育及沉降亦具有一定控制作用, 例如, 由于右旋走滑使辽中凹陷南部发育规模较大的走滑反转构造。

(4) 第二裂后热沉降阶段(馆陶组至明化镇组下段沉积期)

辽东湾拗陷整体进入第二次热沉降阶段, 发育的地层披覆于早期地层之上, 构造活动稳定(图4d), 郯庐断裂右行走滑活动微弱, 构造圈闭发育少, 局部地区可能存在滑坡背斜。

(5) 构造再活动阶段(明化镇组上段沉积期以来)

辽中1号走滑断层及其发育的“花状构造”向上切割至明化镇组, 表明新构造运动具有走滑性质(徐长贵等, 2016)。明化镇组上段沉积期至今, 辽东湾拗陷受郯庐断裂右旋活动影响, 以弱右旋走滑兼伸展正断层活动为主(孙和风等, 2012; 徐长贵等, 2016), 形成大量圈闭, 同时改造深部圈闭及油气藏, 对辽东湾拗陷油气成藏影响重大。

3 郯庐断裂活动对烃源岩生排烃的控制

郯庐断裂走滑断层及其调节断层对研究区新生界油气的“生、储、盖、圈、运、保”条件有

重要的控制作用。尤其是对烃源岩发育、分布、演化和生烃排烃具有重要影响。

3.1 郯庐断裂对烃源岩发育的影响

不同沉积环境发育的烃源岩具有不同的生烃潜力和特征(胡见义等, 1991)。许多学者曾对渤海中拗陷、渤海海域发育的烃源岩生烃潜力及特征进行研究, 发现不同沉积环境发育的烃源岩组分、生烃潜力及生烃性存在较大差异(邹华耀等, 2002; 朱伟林, 2002; 郭永华等, 2005^①; 表1)。

活动性强的控洼或控凹陷伸展断层及活动性强的走滑伴生断层产生大的垂直断距和掀斜活动, 导致断层下降盘沉积物的快速堆积和沉积, 形成弱氧化—还原环境, 有利于烃源岩发育(夏庆龙等, 2012)。相应的, 非主干伸展断层及活动性弱的走滑伴生断层则不利于烃源岩的发育。辽东湾拗陷已确认发育四套烃源岩, 即沙四段、沙三段、沙一、二段和东三段烃源岩, 以沙三段烃源岩为主。辽西凹陷存在沙四段有效烃源岩, 目前处于高成熟—过成熟阶段(Tian et al., 2017), 辽中凹陷和辽东凹陷是否存在沙四段有效烃源岩尚有待考证, 而且沙四段沉积分布局限, 该段烃源岩对油气成藏的贡献大小尚有待研究。沙三段和东三段沉积期伸展断裂活动强烈, 形成的烃源岩生烃潜力较大。沙三段烃源岩已进入高成熟—过成熟演化阶段, 普遍进入生油高峰期; 沙一、二段烃源岩处于低成熟—成熟演化阶段, 但烃源岩厚度薄, 生烃能力有限; 东三段烃源岩整体上进入低成熟演化阶段, 仅在部分地区进入生烃高峰期(左银辉等, 2009; 王祥等, 2011; 张如才等, 2014; 杨宝林等, 2014)。

前人研究表明, 郯庐断裂走滑活动对同期、后期沉积相发育具有一定控制作用(蒋子文等, 2013), 进而影响烃源岩生烃潜力及生烃性。后期走滑活动可错开先期形成的沉积体, 使早期发育的烃源岩位置发生迁移(蒋子文等, 2013), 进而使不同沉积环境下形成的烃源岩迁移, 使生烃潜力不同的烃源岩在空间分布上发生变化。走滑活动使同期形成的烃源岩体随时间发生横向迁移(蒋子文等, 2013), 使得不同生烃潜力的烃源岩位置发生横向迁移, 同时使得烃源岩在平面上的

^① 郭永华, 张巧巧, 于水, 等. 2005. 辽西中洼烃源岩生烃潜力新认识. 中海石油天津分公司(内部报告).

表1 渤海海域古近系烃源岩沉积有机相类型划分^①

Table 1 Classification of sedimentary organic facies of Paleogene source rocks in Bohai sea area

划相指标	有机相类型					
	A	B	C	D	E	
沉积环境	沉积相	深湖	半深湖	浅湖 前三角洲 含煤沼泽	前扇三角洲 三角洲平原 三角洲前缘	滨湖 扇三角洲 冲积扇
	氧化还原性	还原—强还原	弱还原—还原	弱氧化—弱还原	弱氧化—氧化	氧化
	水动力	弱	中等—较弱	中等	中等—强	中等—强
有机岩石学特征	源岩类型	黑—灰黑色油页岩 深灰色泥岩	灰黑—深灰色泥岩	灰—深灰色泥岩	灰—灰绿色泥岩	红褐色或杂色泥岩
	组分特征	腐泥组为主	腐泥组、壳质组	壳质组为主	壳质组、镜质组 惰质组	镜质组、惰质组
	有机来源	低等水生生物	混合	混合	陆源物质为主	陆源物质
	TOC %	>3	1.5~3	0.8~1.5	0.5~0.8	<0.5
有机地球学特征	S ₁ +S ₂ mg/g	>20	12~20	6~12	2~6	<2
	H/C	>1.4	1.15~1.4	0.9~1.15	0.5~0.9	<0.5
	HI mg/g	>600	400~600	150~400	50~150	<50
生烃性	油为主	油多，部分气	油少气多	气	极少量气	

分布范围扩大。走滑活动使老沉积区堆积的碎屑物质发生横向迁移，导致新沉积区的可容空间相对增大，有利于细粒沉积物发育（蒋子文等，2013），发育水体更深的还原环境，有利于形成生烃潜力更大的烃源岩。

3.2 郯庐断裂对生烃的影响

郯庐断裂带为基底深大断裂带，长期继承性活动，可沟通地壳深部热源（白玉等，2016），使走滑断裂带附近的地温梯度和大地热流相对升高（余朝华，2008a；孙和风等，2010），为烃源岩向油气转化提供动力，促进烃源岩快速演化（万桂梅等，2009）。辽东湾拗陷东营组沉积期郯庐断裂走滑活动强烈，走滑断裂附近为高热流值区，古大地热流为77.4~82.3 mW·m⁻²，远大于远离走滑断裂的临清拗陷的古大地热流（62.9~65.7 mW·m⁻²；李文正，2013），促进了该地区烃源岩的热演化过程。高地温梯度和大地热流有利于烃源岩演化，远离主干走滑断裂烃源岩生烃门限有加深的趋势（余朝华，2008a）。

受郯庐断裂走滑活动的影响，辽东湾拗陷辽中凹陷郯庐断裂附近沙三段烃源岩在东营组沉积早期进入生烃门限（Qiang et al., 2013；图5，表2），沙一、二段烃源岩在东营组沉积晚期进入生

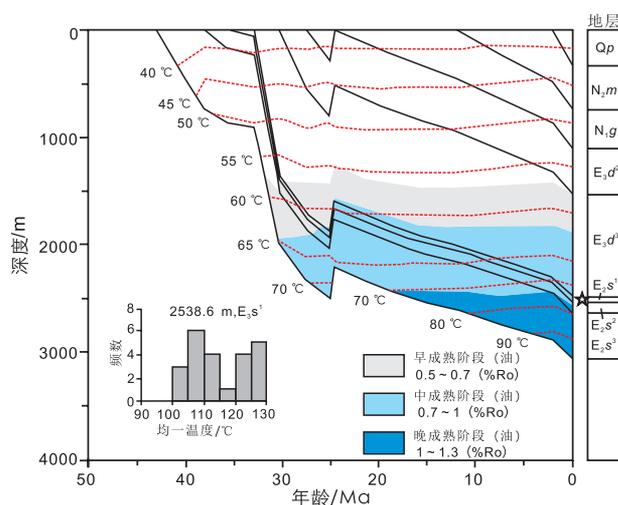


图5 J3井埋藏史与热史

Fig. 5 Burial and thermal history of well J3 (after Qiang et al., 2013)

烃门限，部分地区东三段烃源岩在古近系晚期—馆陶组沉积期进入生烃门限（表2）。

3.3 郯庐断裂对油气运移的影响

3.3.1 走滑断层与油气运移

油气等流体沿活动断裂的运移量是沉积盆地稳态流体的3000~5000倍（Cathles and Smith, 1983；陈斌等，2006）。油气运移的主要时期一般为主生油期后第一次大规模构造活动期。郯庐断裂不同时期不同部位具有不同的活动性质。辽东

^① 郭永华, 张巧巧, 于水, 等. 2005. 辽西中洼烃源岩生烃潜力新认识. 中海石油天津分公司(内部报告).

表2 辽东湾拗陷辽中凹陷烃源岩生、排烃量^①

Table 2 Volume of hydrocarbon generation and expulsion of source rocks in the Liaozhong sag of the Liaodong Bay depression

烃源岩	生烃量/($\times 10^6$ t)				排烃量/($\times 10^6$ t)			
	东营组	馆陶组	明化镇组	第四纪	东营组	馆陶组	明化镇组	第四纪
东三段	50	120	410	270	2	30	250	100
沙一二段	50	110	1160	510	3	20	630	300
沙三段	510	1130	1750	850	10	40	550	1040

湾地区勘探实践表明,张扭性走滑断层有利于沟通上下地层,成为油气运移通道;具有压扭性的走滑断裂断面紧闭程度高,对油气可起到良好的侧向封堵(柳永军等,2012;史浩等,2014;徐长贵,2016a;宿雯等,2016),不利于油气运移;但走滑活动派生的大量次级调节断层为张性断层,可沟通烃源岩和储集层,构成良好的油气运移通道,次级调节断裂的发育密度控制油气的富集程度(柳永军等,2012;徐长贵,2016a)。辽东湾郯庐断裂紧邻辽中凹陷和辽东凹陷,烃源岩条件优越,走滑主干断裂及次级调节断裂切割深度大、断面陡直,可良好沟通深处烃源岩与浅层圈闭,总体构成以拉张主断裂、走滑断层—雁列张性断层以及疏导砂体为一体的输导体系。

郯庐断裂走滑拉分区域更易形成张性派生断层,若在超压区形成张性派生断层,则会导致压力封存箱构造破裂,发生泄压,成为油气运移的动力(彭靖淞等,2016)。

前人研究表明,辽东湾地区主要成藏期为12 Ma以来(即明化镇组沉积期以来)(姜雪等,2009,2011;Teng et al.,2016),但辽中凹陷中部热史模拟(图5)表明该地区烃源岩热演化程度较高,在24.6 Ma,沙三段烃源岩已进入主生烃期,不排除早期(东营组沉积期晚期)成藏的可能(姜雪等,2009,2011)。东营组沉积期晚期和明化镇组下段沉积期至今的断裂活动与烃源岩大量生排烃期、油气成藏时期具有良好的匹配关系(图6;表2)。郯庐断裂带主干断裂的断面相对陡直,向上分散并发育负花状构造。主干断裂切割地层深,可作为油气运移通道,沟通深部烃源岩与浅部圈闭。油气亦可由深部沿主干断裂面运移至浅层,之后沿分支断裂向上运移,整体构成油气运移疏导图。

3.3.2 “拖曳”生排烃

辽东湾拗陷东部郯庐断裂带具有走滑—伸展复合性质,在伸展断裂系统的基础上发育走滑断裂系统。该类走滑—伸展复合区的油气运移可形成“拖曳”生排烃模式。辽中凹陷金县地区为郯庐断裂典型特征区,以该地区油气成藏特征为基础,建立“拖曳”生排烃模式(图7)。以走滑前后是否形成油气藏为依据可分为四种情况。

第一种情况:走滑前后均形成油气藏。假设模型a中的走滑断层由I时刻(图7a)右行走滑一段时间后至II时刻(图7b),形成模型b中的状态。模型a中I时刻,断层上盘沙三段C点处的烃源岩生烃并运移至下盘沙一、二段中的①圈闭成藏(油藏①)。右行走滑至II时刻,参照点由模型a中的A点迁移至模型b中的A'点,走滑期间沙三段烃源岩一直处于生排烃期,上盘沙三段C处烃源岩已右行迁移一定距离,此时该处生成的烃源岩可能运至上盘东三段②圈闭成藏(油藏②)。该地区以走滑与伸展断裂系统共同发育为特点,右行走滑的同时伴随伸展断裂活动。若走滑时间持续较长,I时刻至II时刻生成的烃类在空间分布上具有从早到晚沿走滑—伸展运动方向迁移的特点,同一区域烃源岩(C处)前后位移形似拖曳(图7b),故称“拖曳”生排烃。由此可知,油藏①和②中的油气可能来自同一套烃源岩的相同位置。在油气勘探实际应用中,尤其是在进行圈闭评价时,若圈闭①附近无可靠烃源岩时,可沿走滑断层另一盘沿走滑—伸展运动方向进行追索,可能在历史时期生成的烃类运移至①圈闭成藏。

其他三种情况分别为:走滑前形成油气藏,走滑后不形成油气藏;走滑前不形成油气藏,走滑后形成油气藏;走滑前后均不形成油气藏。有

① 王涛,夏庆龙,庞雄奇,等.2010.渤海湾地区油气形成富集与分布预测.中海石油天津分公司(内部报告).

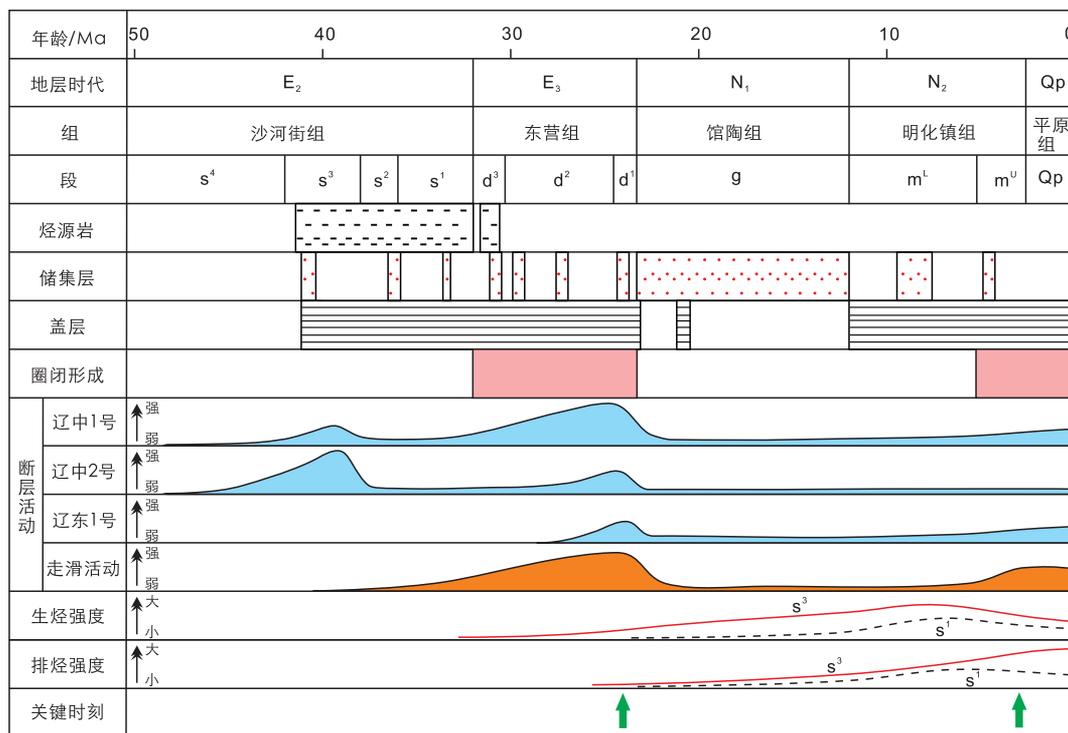


图6 辽东湾拗陷含油气系统特征

Fig. 6 Petroleum system chart of the Liaodong Bay depression (modified after Teng et al., 2016)

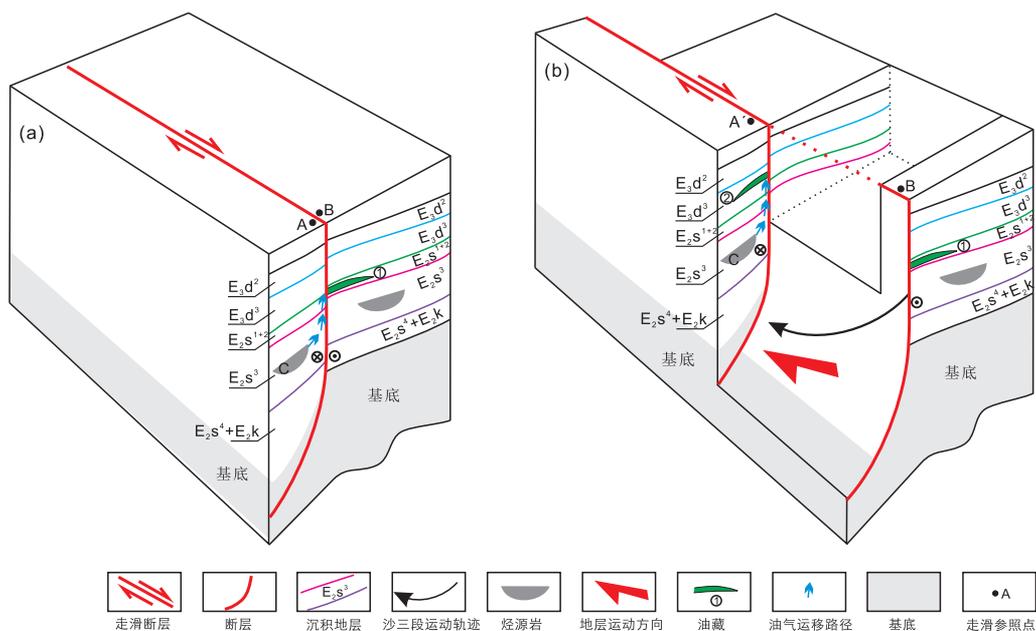


图7 辽中凹陷金县地区沙三段烃源岩“拖曳”生排烃模型

Fig. 7 The “towed-pattern” of hydrocarbon generation and expulsion for the source rock of the third member of the Shahejie Formation, Jinxian area of the Liaozhong sag

多种原因可能导致走滑活动前后没有形成油气藏，如断层开启对储集层无法起到封闭作用；烃源岩供源不足；运移路径附近储集层、盖层不发育等。第二、三种情况下形成并保存至今的油气

藏因缺少走滑后和走滑前形成的油气藏进行对比研究，因此难以证实“拖曳”生排烃的存在。走滑断层处于开启状态并断至地表，导致油气逸散至地面，可能出现第四种情况。该情形下保存至

今的“拖曳”生排烃证据稀少,难以识别,难以证实“拖曳”生排烃的存在。

“拖曳”生排烃模式在研究区并未找到合适的勘探实例证实,可能的原因有:一是研究区90%以上的原生油气藏受晚期断裂活动和褶皱作用(新构造运动)的影响而遭受破坏,再次运移形成次生油气藏,原生油气藏保存数量少;二是研究区沙三段烃源岩分布范围广泛,且烃源岩形成环境单一,同一沉积环境分布面积广,目前油源对比方法多是用于区分油气来源于垂向上不同层位,难以在横向上将相邻地区沙三段烃源岩(同一物源、同一沉积环境形成)生成的油气进行有效的油源对比,区分出不同生烃区域;三是沙三段烃源岩在东营组沉积期生烃强度较低,生排烃量有限,该时期形成的油藏数量较少;四是研究区及相邻地区郯庐断裂新生代右行走滑距离有一定程度研究,如Hsiao等(2004)根据辽东湾拗陷郯庐断裂两侧沉积中心的位错得出了郯庐断裂新生代右行走滑30~40 km的位移量;余朝华等(2008b)研究莱州湾凹陷郯庐断裂认为郯庐断裂中段新生代右行走滑位移量为40 km左右;黄超等(2013)在研究淮北凹陷郯庐断裂后认为郯庐断裂中段新生代右行走滑位移量为15 km;蒋子文等(2013)研究认为辽东湾拗陷金县地区郯庐断裂东三段沉积期右行走滑约12 km;徐长贵等(2016b)认为辽东湾北部郯庐断裂新构造运动以来右行走滑4 km。但整体有关走滑距离的研究较少,且争议较大,没有形成可信共识,无法确定走滑恢复研究时的恢复距离。加之研究区钻井数量少、分布局限,难以找到用于走滑恢复、研究“拖曳”生排烃模式的合适钻井。研究区东营组沉积期晚期和明化镇组下段沉积期以来沙三段烃源岩均处于生排烃高峰期,同时伸展断裂和走滑断裂活动强烈,生储盖、圈闭条件优越,是油气成藏关键时期(图6),形成边生排烃、运移成藏边右行走滑的特征,因此,“拖曳”生排烃模型在理论上是成立的。在未来研究技术、方法创新和勘探程度提高的基础上,希望能找到适合的勘探实例进行佐证。“拖曳”生排烃模型突破了涉及走滑断层油气勘探时圈闭附近烃源岩发育条件的限制,使烃源岩条件较差的圈闭亦可能具有勘探价值,拓宽了油气勘探思路。

4 结论

(1) 辽东湾拗陷新生代构造演化分为五个构造演化阶段、三个构造演化旋回,孔店组—沙三段沉积期的伸展拉张裂陷阶段,沙一、二段沉积期的第一裂后热沉降拗陷阶段,东营组沉积期的再次裂陷阶段,馆陶组至明下段沉积期的第二裂后热沉降阶段以及明上段沉积以来的构造再活动阶段。

(2) 郯庐断裂走滑活动可错开先期、同期发育的烃源岩,改变烃源岩位置及生烃潜力的空间分布;局部有利于形成水体更深的还原环境,发育生烃潜力更大的烃源岩;走滑活动使断裂带附近地温梯度和大地热流升高,有利于降低生烃门限。

(3) 郯庐断裂带构成拉张主断裂、走滑断层、雁列张性断层以及疏导砂体为一体的输导体系;郯庐断裂不同时期不同部位具有不同的活动性质,对油气运移起封闭或者运移通道作用。

(4) 东营组沉积期晚期和明化镇组下段沉积期至今的断裂走滑活动与烃源岩大量生排烃期、油气成藏时期具有良好的匹配关系,郯庐断裂走滑活动可形成“拖曳”生排烃现象,使与走滑断层相关的圈闭中即使烃源岩条件较差亦可能具有勘探价值。

参考文献 (References):

- 白玉, 刘少峰, 李超, 等. 2016. 渤海湾盆地中北部沉降史分析及裂后期异常沉降分离[J]. 高校地质学报, 22(3): 530-542.
- 陈斌, 邓运华, 郝芳, 等. 2006. 黄河口凹陷BZ34断裂带油气晚期快速成藏模式[J]. 石油学报, 27(1): 37-41.
- 褚庆忠, 张树林, 黄雄伟. 2002. 渤中拗陷断裂构造特征与油气运聚关系研究[J]. 新疆石油学院学报, 14(2): 10-14.
- 冯有良, 周海民, 任建业, 等. 2010. 渤海湾盆地东部古近系层序地层及其对构造活动的响应[J]. 中国科学(D辑), 40(10): 1356-1376.
- 高瑞祺, 赵文智, 孔凡仙. 2004. 青年勘探家论渤海湾盆地石油地质[M]. 北京: 石油工业出版社: 11-47.
- 葛建党. 2001. 郯庐断裂在渤中凹陷的构造特征与油气成藏的关系[J]. 海洋石油, 21(1): 14-20.
- 龚再升, 蔡东升, 张功成. 2007. 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, 28(4): 1-10.
- 胡见义, 黄第藩, 徐树宝, 等. 1991. 中国陆相石油地质理论基础[M]. 北京: 石油工业出版社: 46-57.
- 黄超, 余朝华, 张桂林, 等. 2013. 郯庐断裂中段新生代右行走滑位移[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(3): 820-832.
- 贾楠. 2015. 辽东湾拗陷新生代构造特征及其演化与油气赋存效应[D].

- 西北大学: 46-53.
- 姜向强, 钟大康, 张琼. 2007. 辽东湾地区古近系砂岩成岩作用与孔隙演化[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 22(6): 14-19.
- 姜雪, 邹华耀, 田金强, 等. 2009. 辽东湾地区油气晚期成藏的证据[C]//北京: 第五届油气成藏机理与油气资源评价国际学术研讨会: 199-210.
- 姜雪, 徐长贵, 邹华耀, 等. 2011. 辽西低凸起与辽中凹陷油气成藏期次的异同[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 36(3): 555-564.
- 蒋子文, 王嗣敏, 徐长贵, 等. 2013. 渤海海域辽东带中南部郯庐断裂走滑活动的沉积响应[J]. 现代地质, 27(5): 1005-1012.
- 李才, 周东红, 吕丁友, 等. 2014. 郯庐断裂带辽东段断裂特征及其对油气运移的控制作用[J]. 地质科技情报, 33(2): 61-65.
- 李文正. 2013. 渤海湾盆地中—新生代“热”岩石圈厚度研究[D]. 中国石油大学(北京): 17-36.
- 柳永军, 徐长贵, 吴奎, 等. 2016. 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, 35(3): 16-21.
- 柳永军, 朱文森, 杜晓峰, 等. 2012. 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]. 石油天然气学报, 34(7): 6-10.
- 马行陟, 庞雄奇, 孟庆洋, 等. 2011. 辽东湾地区深层烃源岩排烃特征及资源潜力[J]. 石油与天然气地质, 32(2): 251-258.
- 彭靖淞, 徐长贵, 韦阿娟, 等. 2016. 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, 43(3): 386-395.
- 漆家福, 邓荣敬, 周心怀, 等. 2008. 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), 38(S1): 19-29.
- 漆家福, 杨桥, 陈发景, 等. 1994. 辽东湾—下辽河盆地新生代构造的运动学特征及其演化过程[J]. 现代地质, 8(1): 34-42.
- 史浩, 周东红, 吕丁友. 2014. 莱州湾凹陷东部新生代走滑构造特征及油气勘探意义[J]. 海洋石油, 34(3): 34-39.
- 孙和风, 曾选萍, 贺电波, 等. 2010. 莱州湾凹陷温压系统与油气成藏[J]. 油气地质与采收率, 17(1): 19-21.
- 孙和风, 张蕾, 黄传超, 等. 2012. 渤海南部断裂系统特征及其对油气成藏的控制[J]. 中国石油勘探, 5(4): 29-35.
- 万桂梅, 周东红, 汤良杰. 2009. 渤海海域郯庐断裂带对油气成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 30(4): 450-454.
- 王祥, 王应斌, 吕修祥, 等. 2011. 渤海海域辽东湾坳陷油气成藏条件与分布规律[J]. 石油与天然气地质, 32(3): 342-351.
- 夏庆龙, 田立新, 周心怀. 2012. 渤海海域构造形成演化与变形机制[M]. 北京: 石油工业出版社: 101-122.
- 宿雯, 牛成民, 陈磊, 等. 2016. 走滑—伸展复合区断层侧封定量研究: 以垦利A区东营组为例[J]. 地质科技情报, 35(3): 65-70.
- 徐长贵, 任健, 吴智平, 等. 2015. 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, 21(2): 215-222.
- 徐长贵. 2016a. 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, 41(9): 1548-1560.
- 徐长贵, 彭靖淞, 柳永军, 等. 2016b. 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, 28(3): 20-30.
- 严俊君, 王燮培. 1996. 关于扭动构造的鉴别问题[J]. 石油与天然气地质, 17(1): 8-14.
- 杨宝林, 叶加仁, 王子嵩, 等. 2014. 辽东湾断陷油气成藏模式及主控因素[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 39(10): 1507-1520.
- 杨克基, 马宝军, 周南, 等. 2013. 辽东湾地区走滑断裂系统及其油气地质意义[J]. 石油天然气学报, 35(12): 25-29.
- 杨桥, 魏刚, 马宝军, 等. 2009. 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, 30(4): 483-489.
- 余朝华. 2008a. 渤海湾盆地济阳坳陷东部走滑构造特征及其对油气成藏的影响研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所).
- 余朝华, 韩清华, 董冬冬, 等. 2008b. 莱州湾地区郯庐断裂中段新生代右行走滑位移量的估算[J]. 天然气地球科学, 19(1): 62-69.
- 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 等. 2014. 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, 35(5): 632-638.
- 张如才, 徐长贵, 吴奎, 等. 2014. 辽中凹陷中洼高陡走滑带油气富集新模式[J]. 中国海上油气, 26(1): 24-29.
- 朱伟林, 米立军, 龚再升. 2009. 渤海海域油气成藏与勘探[M]. 北京: 科学出版社: 78-87.
- 朱筱敏, 董艳蕾, 杨俊生, 等. 2008. 辽东湾地区古近系层序地层格架与沉积体系分布[J]. 中国科学(D辑), 38(S1): 1-10.
- 左银辉, 邱楠生, 李建平, 等. 2009. 渤海盆地辽东湾地区古近系烃源岩成熟演化模拟[J]. 现代地质, 23(4): 746-754.
- Cathles L M and Smith A T. 1983. Thermal constraints on the formation of mississippi valley-type lead-zinc deposits and their implications for episodic basin dewatering and deposit genesis [J]. Economic Geology, 78 (5): 983-1002.
- Hsiao L Y, Graham S A and Tilander N. 2004. 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, 88(1): 71-97.
- Qiang K S, Lü X X, Zhou X H, et al. 2013. Late-stage hydrocarbon accumulation and enrichment pattern in Liaozhong Sag, northern Offshore Bohai Bay Basin [J]. Energy, Exploration & Exploitation, 31 (1): 57-76.
- Teng C Y, Hao F, Zou H Y, et al. 2016. Tan-Lu fault system and its significance in oil accumulation in the central Liaodong Bay subbasin, Bohai Bay Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 100(2): 289-314.
- Tian J Q, Hao F, Zhou X H, et al. 2017. Hydrocarbon generating potential and accumulation contribution of the fourth member of the Shahejie Formation in the Liaodong Bay sub-basin, Bohai Bay basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 82: 388-398.
- Wang Q, Zou H Y, Hao F, et al. 2014. Modeling hydrocarbon generation from the Paleogene source rocks in Liaodong Bay, Bohai Sea: A study on gas potential of oil-prone source rocks [J]. Organic Geochemistry, 76: 204-219.
- Wang X, He S, Wei A, et al. 2016. Typical disequilibrium compaction caused overpressure of Paleocene Dongying Formation in northwest Liaodongwan Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 147: 726-734.
- Xu S, Hao F, Xu C G, et al. 2014. Tracing migration pathways by integrated geological, geophysical, and geochemical data: A case study from the JX1-1 oil field, Bohai Bay Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 98(10): 2109-2129.
- Zhu X M, Dong Y L, Yang J S, et al. 2008. Sequence stratigraphic framework and distribution of depositional systems for the Paleogene in Liaodong Bay area [J]. Science in China (Series D): 51(S2): 1-10.