

文章编号:1009-2722(2018)04-0025-08

辽东湾坳陷辽中南洼构造发育演化特征与成因机制

吕丁友¹,李 伟^{2,3*},郭睿朋^{2,3},吴 奎¹,张江涛¹

(1 中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300452;2 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,青岛 266580;3 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,青岛 266071)

摘 要:基于最新的三维地震连片资料,通过对辽中南洼断裂体系和地层发育特征的精细解释,明确了辽中南洼的构造发育演化特征,探讨了成因机制。结果表明:辽中南洼发育走滑和伸展 2 类断裂,主干走滑断裂整体 NNE 走向,深浅均有发育;伸展断裂主要发育在深部,被走滑断裂切割改造。受控于走滑和伸展作用在不同地区的作用强弱差异,辽中南洼整体东西分带、南北分段,自西向东辽中南洼可以划分为西部斜坡带、中部走滑带和东部斜坡带,东、西两个斜坡带为典型的伸展半地堑,走滑断裂条数的变化、中央走滑断裂的走向弯曲造成了中部走滑带的南北分段性。辽中南洼新生代构造演化可以划分为古近纪孔店组—沙四段沉积期、沙三段—沙一段沉积期、东营组沉积期、新近纪—第四纪 4 个阶段,经历了伸展断陷、构造转型、走滑—断拗转换、走滑—拗陷的构造演化过程,体现了伸展和走滑作用强弱的时间差异。辽中南洼现今复杂多样而又独特的构造特征并不单纯受控于单一构造背景,而是形成于伸展和走滑应力在时间和空间上的差异复合作用。

关键词:构造特征;断裂体系;新生代;辽中南洼;辽东湾

中图分类号:P618.13

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.04004

辽东湾坳陷位于渤海湾盆地东北部的渤海海域,属于渤海湾盆地东部走滑带的一部分,其内部断裂体系、构造区带主要为 NNE 向展布,构造性质以走滑为主,兼有伸展作用^[1,2],是渤海湾盆地重要的油气产区和有利探区之一^[3,4],油气成藏条件优越,油气藏主要集中在郯庐断裂带附近^[5,6]。辽中南洼位于辽东湾坳陷南部,与渤东凹陷相接,面积约 2 100 km²(图 1),已发现旅大

27-2、旅大 21-2、旅大 16-3 南等多个大中型油气田,勘探潜力巨大。

前人研究认为,郯庐断裂带贯穿辽中南洼,走滑断裂控制了辽中南洼的整体构造格局,与油气分布具有密切的关系,在其东侧发育有明显的压扭构造带或走滑反转带^[4,7-10]。但是由于该地区涉及多个三维地震工区,在工区边界和交界处地震资料品质较差,且存在多解性,加之辽中南洼具有厚度超过 6 000 m 的新生代地层,目前对深层断裂体系的构造解释和研究尚存在局限。针对辽中南洼是否完全受控于走滑断裂的影响;巨厚的古近系地层尤其是深部孔店组和沙四段、沙三段的沉降机制是什么;作为渤海湾盆地新生代重要成盆机制的伸展作用在辽中南洼构造的形成演化过程中所占地位如何,与走滑作用在时间和空间上如何叠加、复合来共同控制辽中南洼的形成演化等问题,目前尚缺乏

收稿日期:2017-12-25

基金项目:国家科技重大专项课题“渤海湾盆地深层油气地质与增储方向”(2016ZX05006-007);国家科技重大专项课题“中国近海富烃凹陷优选与有利勘探方向预测”(2016ZX05024-002)

作者简介:吕丁友(1974—),男,高级工程师,主要从事勘探地震研究工作。E-mail:lvdy@cnooc.com.cn

* **通讯作者:**李 伟(1978—),男,博士,副教授,主要从事含油气盆地构造分析研究工作。E-mail:liwei780923@163.com

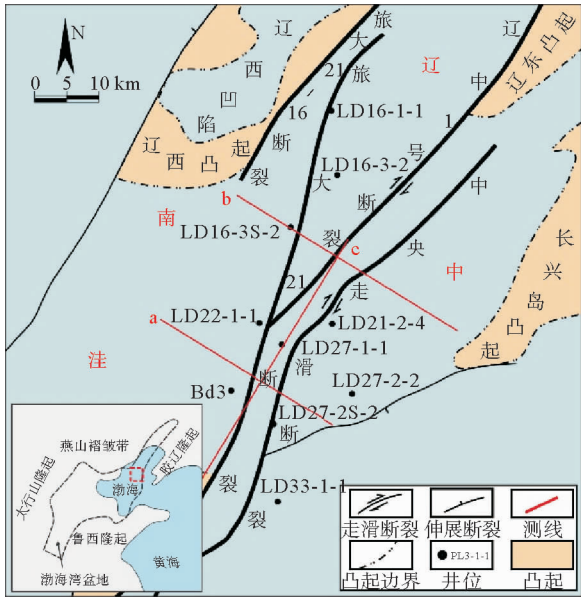


图1 辽中南洼地区构造单元划分及主要断层分布
 Fig. 1 The tectonic units and main fault systems of the southern Liaozhong Sag

1 辽中南洼构造特征

1.1 断裂体系

辽中南洼断裂十分发育,通过连片处理地震资料的精细解释,结合相干切片、振幅属性切片的分析,对辽中南洼断裂进行了系统判识和构造解析。整体具有多方向展布、多样式组合、多性质并存的特点。

1.1.1 走滑断裂系统

走滑断裂在辽中南洼十分发育,主干走滑断裂发育4条,自西向东分别为旅大16-21断裂、旅大21断裂、辽中1号断裂和中央走滑断裂。平面上这4条断裂整体NNE走向,延伸较长(40~70 km),存在着明显的走向弯曲,旅大16-21断裂、旅大21断裂和中央走滑断裂呈弱弯曲的“S”形,深层断裂连续性好,浅层则表现为一系列呈雁列式排列的次级断裂;在组合方式上旅大16-21断裂与旅大21断裂、辽中1号断裂与中央走滑断裂分别构成左阶排列(图2a)。剖面上这4条走滑断裂在深部近于直立,表现为单一断层;而在浅层表现为由多条次级断裂构成的花状构造(图3中红色断裂)。

深入细致的探讨和明确的认识。因此,本文利用辽东湾坳陷最新的三维连片地震资料,对辽中南洼断裂体系和地层发育进行了精细解释,进而分析了辽中南洼的构造发育演化特征,探讨了其成因机制,以期通过本文的研究进一步丰富渤海湾盆地构造成盆理论,为辽中南洼油气勘探提供借鉴。

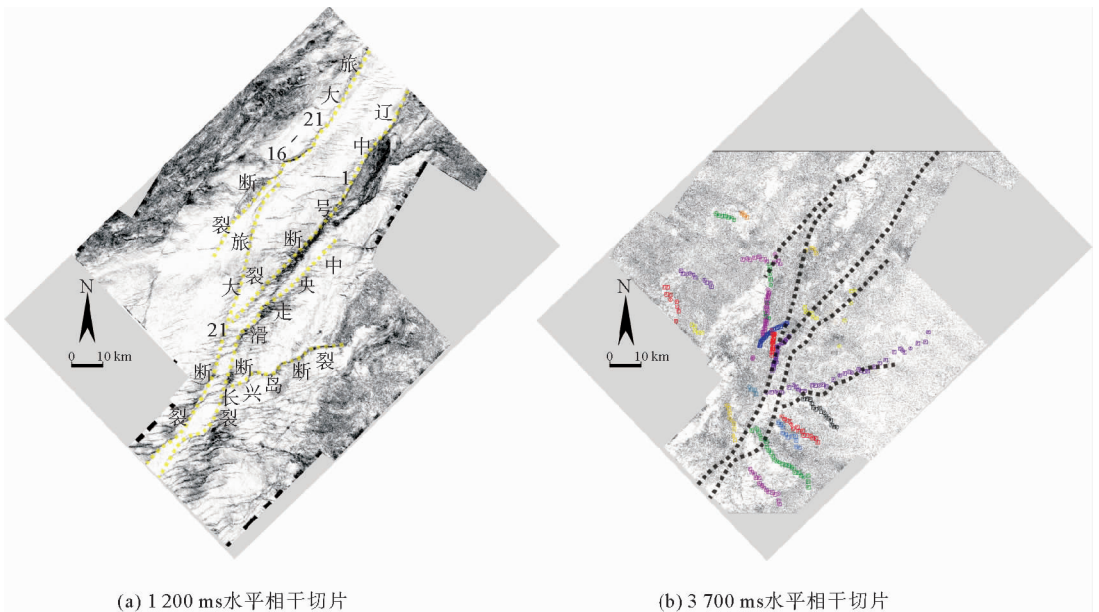


图2 辽中南洼不同时间水平相干切片和振幅切片

Fig. 2 Coherence slice and amplitude slice of the southern Liaozhong Sag for different time horizon

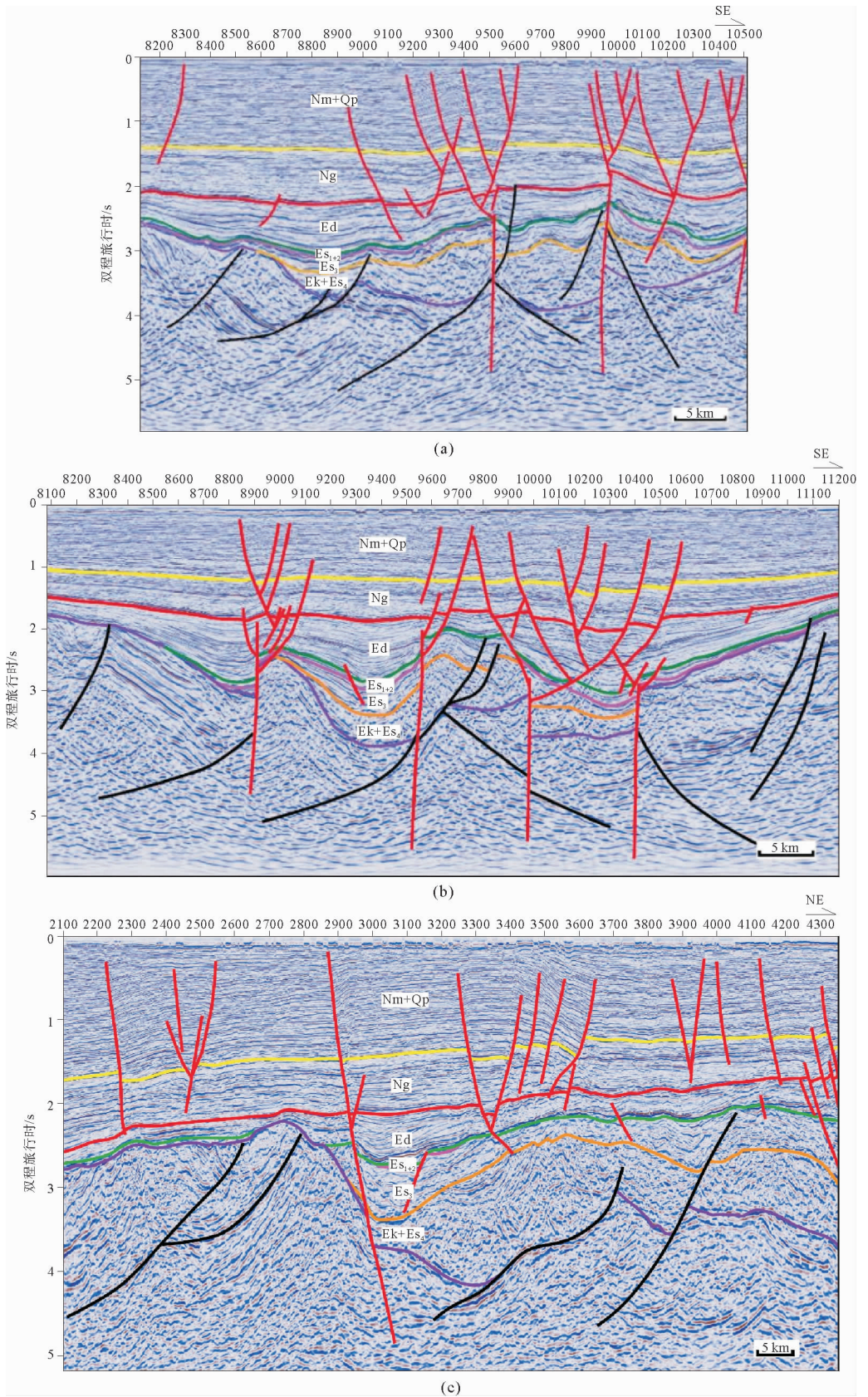


图 3 辽中南洼断裂体系剖面特征(平面位置见图 1)

Fig. 3 Profiles of the southern Liaozhong Sag(see Fig. 1 for location)

1.1.2 伸展断裂系统

除了上述4条走滑断裂之外,笔者基于最新的钻井揭示及地层解释成果,在辽中南洼深部还解释出了3~4条产状较缓的伸展断裂,剖面上表现为铲式或轻微铲式,被走滑断裂切割,对辽中南洼孔店组一沙四段地层沉积具有明显的控制作用,而对沙三段及以上古近系地层控制作用不明显(图3中黑色断裂)。

为了揭示这些伸展断裂系统的空间展布,笔者对这些伸展断裂进行了系统解释,将剖面解释结果投影到水平相干切片上发现,这些伸展断裂主要发育在深部,浅层并不发育,走向主要为近SN向展布,被NNE向走滑断裂切割(图2b)。值得注意的是,在辽中南洼的东西两侧还解释出了一系列NW向展布的断裂,这些断裂同样主要发育在深层,控制了古近系孔店组一沙四段的地层沉积,而对之上地层控制作用不明显(图2b)。

1.2 构造样式与构造格局

受辽中南洼乃至整个辽东湾、渤海凹陷复杂断裂体系的影响,辽中南洼地区构造样式类型多样,整体具有东西分带、南北分段的特征。

自西向东辽中南洼可以划分为西部斜坡带、中部走滑带和东部斜坡带,其中东、西2个斜坡带古近系孔店组一沙四段地层发育较薄,为典型的伸展半地堑;中部走滑带发育于旅大16-21断裂和中央走滑断裂之间。通过对典型地震剖面的分析发现:在NW向垂直于中部走滑带的剖面上,古近系下部沙三段、孔店组一沙四段地层厚于断层上盘渤海东凹陷,整体下凹上凸,顶部遭受剥蚀;而在NE向剖面上,古近系下部沙三段、孔店组一沙四段地层厚度变化较大,沉积主要受近SN向伸展断层控制,上部地层受断层控制作用不明显。就上覆新近系而言,地层厚度变化较小,但在主干走滑断裂系统发育位置出现了明显的弯曲上拱,表明其后期可能经历过构造挤压(图3)。

自南向北辽中南洼体现出了明显的构造分段性,分段位置与走滑断裂条数变化位置相吻合,且位于中央走滑断裂走向弯曲外凸位置。南段孔店组一沙四段地层厚度大于北段,沿中部走滑走向等值线被明显错开。北段走滑断裂数量多于南段,对孔店组一沙四段地层改造作用、东营组地层厚度变化趋势明显强于南段更强(图4)。

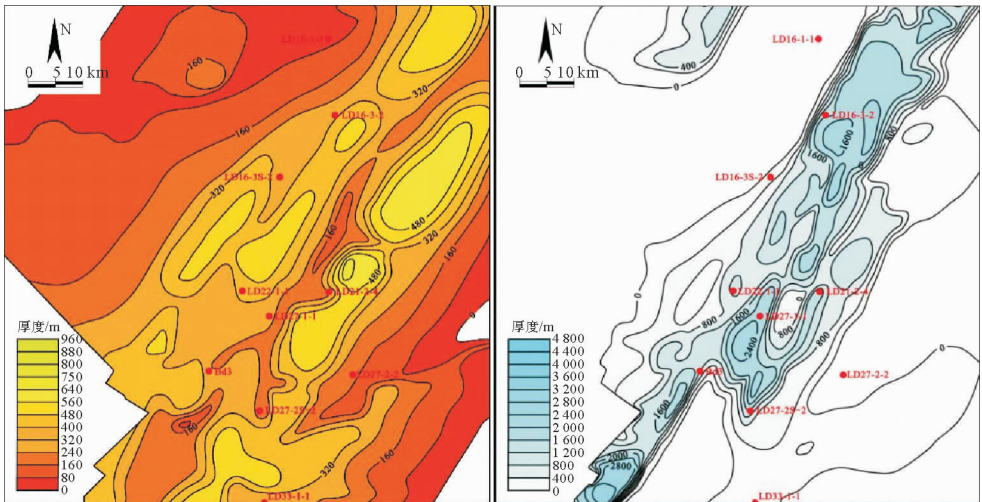


图4 辽中南洼东一段一东二上段和沙四段一孔店组地层等厚图

Fig.4 Isopach maps of Ed₁-Ed₂ and Ek-Es₄ in the southern Liaozhong Sag

2 辽中南洼构造演化过程

综合以上构造发育特征的分析可以发现,伸

展和走滑作用共同控制了辽中南洼的形成演化,造成了辽中南洼复杂而又独特的构造特征,不同层位、不同构造位置的构造特征存在明显差异,体现了辽中南洼构造演化过程中伸展和走滑作用的

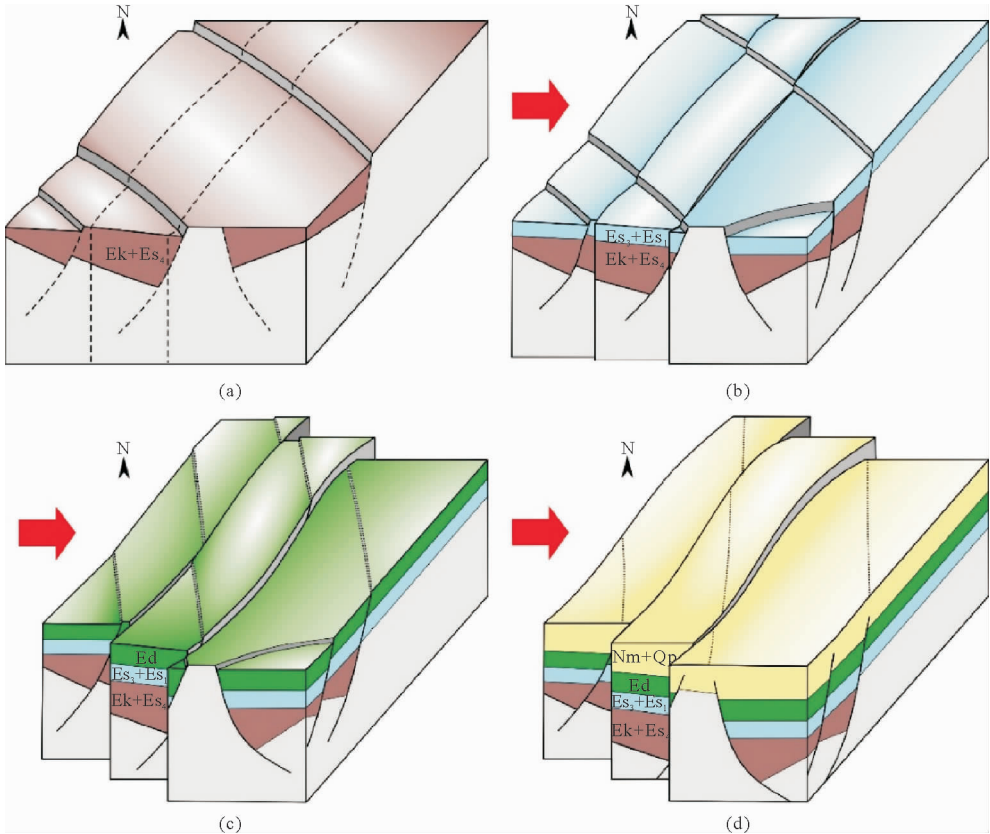
时空差异。本文基于辽中南洼及其邻近地区的构造解析,并结合前人研究成果,对辽中南洼的构造演化过程进行了探讨。

2.1 古近纪孔店组一沙四段沉积期

辽中南洼孔店组一沙四段地层厚度较大(图 3),地震测线显示该套地层受走滑断裂控制作用较弱,而是主要受到了深部近 SN 向伸展断裂体系的控制,在 NNE 向剖面上体现得尤为显著。因此推测该时期在辽中南洼走滑作用较弱,主要是以伸展作用为主。就该时期的控洼断层走向而言,剖面解释结果的水平投影显示,在辽中南洼的中部,走滑带断裂走向主要为近 SN 向,而在东、西两侧则主要为 NW 向展布。需要指出的是,这些都是现今的断裂展布方向,亦即经历了后期的构造改造之后孔店组一沙四段控洼断层的走向,那么,其原始展布方向如何?

前人研究认为,中生代早白垩世郯庐断裂带

以左旋走滑为主,加之地幔上涌、岩石圈减薄,导致了郯庐断裂以东的渤海、济阳、鲁西地区以 NWW 向伸展断堑系发育为主,古近纪早期孔店一沙四期对中生代盆地具有一定的继承性^[1,11],因此,推测渤海海域在古近纪早期发育有一定数量的 NWW 向断层,并控制地层沉积,如渤南地区黄河口凹陷和莱州湾凹陷的北部边界断裂^[12]。李伟等^[7]研究认为,辽中南洼古近纪孔店组一沙三段沉积期整体以伸展作用为主,基底伸展断层的继承性活动控制了地层沉积。本文综合前人的研究成果,认为在孔店组一沙四段沉积期辽中南洼地区应该发育数条 NW 走向的控洼断层,后期的右旋走滑作用导致夹持于旅大 16-21 断裂和中央走滑断裂之间的 NW 向断层走向发生变化,转为近 SN 向(图 5)。这与济阳坳陷东北部的滩海地区和埕北凹陷极为相似,早期控洼断层主要为 NW 走向,由于其紧邻郯庐断裂带,后期的走滑作用导致其走向发生变化,转为近 SN 向^[13-15]。



(a)孔店组一沙四段沉积期;(b)沙三段一沙一段沉积期;(c)东营组沉积期;(d)新近纪一第四纪

图 5 辽中南洼新生代构造演化模式

Fig. 5 Tectonic evolutionary model of the southern Liaozhong Sag in Cenozoic

2.2 古近纪沙三段—沙一段沉积期

中始新世以来,太平洋板块俯冲方向转为NW向^[16-18],郟庐断裂带转为右旋走滑,进而导致了辽中南洼发生了重要的构造转型。地震反射特征揭示,孔店组—沙四段沉积期活动的伸展断层对沙三段地层沉积仍具有一定的控制作用,但强度已明显减弱,而沙二段—沙一段沉积期地层沉积厚度较薄,受断层控制作用不明显,因此,本文认为沙三段—沙一段沉积期辽中南洼处于构造转型的过渡期,沉降幅度较小,沉积厚度较薄,走滑断裂系统活动逐渐增强,伸展断层活动区域减弱(图4)。

2.3 古近纪东营组沉积期

与沙三段—沙一段相比,辽中南洼东营组地层厚度较大,在全区稳定沉积,整体具有明显的早期充填—晚期披覆式沉积特征,受断层控制作用不明显。前人研究认为,渐新世东营组沉积期郟庐断裂带表现为强烈的右旋走滑^[19-21],垂向活动不明显,因此,研究区的主干走滑断裂对地层沉降控制作用并不显著,辽中南洼地层沉降进入由伸展断陷向裂后热沉降的过渡期,前期古地理格局控制了地层沉积厚度。

需要指出的是,尽管走滑活动对东营组地层沉积的控制作用不明显,但明显改造了前期的构造格局。李伟等^[7]认为,走滑断层错动了辽中南洼压扭构造带孔店组—沙四段、沙三段地层沉降中心,因而造成了辽中1号和中央走滑断裂两侧斜坡带孔店组、沙四段地层厚度小于中部走滑带,以及沿中部走滑带走向的厚度差异。除了对地层的改造作用之外,走滑作用同样改造了早期的伸展断裂系统,导致其走向发生变化,由NW向转为近SN向。

除了对早期盆地构造格局的改造之外,平面上旅大16-21断裂、旅大21断裂和中央走滑断裂呈弱弯曲的“S”形,旅大16-21断裂与旅大21断裂、辽中1号断裂与中央走滑断裂分别构成左阶排列,这些走滑断裂的不规则展布和组合方式在右旋走滑条件下派生出了局部应力,从而对辽中南洼构造格局产生了重要影响,是辽中南洼东西分带、南北分段的主要控制因素。夹持于走滑断

裂之间的中部走滑带的古近系孔店组—沙河街组地层整体下凹上凸、顶部遭受削截,形成构造高部位并进一步造成了中部走滑带在东营组沉积期处于构造高部位而地层沉积厚度较薄;在南北方向上,走滑断裂条数的变化、中央走滑断裂的走向弯曲造成了中部走滑带的分段性。

2.4 新近纪

新近纪馆陶组—明化镇组下段沉积期,渤海海域进入裂后热沉降作用阶段,整体拗陷,沉降中心迁移到渤中凹陷。明化镇组上段沉积期到第四纪,郟庐断裂带再次发生右旋走滑^[22,23],由于走滑断裂的走向弯曲和相互侧接,导致了局部构造变形的差异性,图3b、c显示,辽中南洼中部走滑带之上新近系馆陶—明化镇组地层弯曲上拱,与次级断裂构成明显的负花状背形,吻合于旅大21断裂、辽中1号与中央走滑断裂的侧接部位和中央走滑断裂的外凸弯曲部位,进一步表明了主干断裂走滑局部派生挤压应力的存在,负花状背形顶部地层的削截则体现了新近纪末期的挤压反转事件——渤海运动^[24-26]对早期构造的改造作用。

3 结论

(1)辽中南洼发育走滑和伸展2类断裂,主干走滑断裂整体呈NNE走向,深浅均有发育,平面上走滑断裂呈弱弯曲的“S”形,且构成左阶排列。伸展断裂主要发育在深部,在辽中南洼中部整体近SN向展布,被走滑断裂切割;在辽中南洼两侧则为NW向展布,对辽中南洼孔店组—沙四段地层沉积具有明显的控制作用,而对沙三段及以上古近系地层控制作用不明显。

(2)辽中南洼整体东西分带、南北分段,自西向东可以划分为西部斜坡带、中部走滑带和东部斜坡带,其中东、西2个斜坡带古近系孔店组—沙四段地层发育较薄,为典型的伸展半地堑;中部走滑带发育于旅大16-21断裂和中央走滑断裂之间,古近系下部沙三段、孔店组—沙四段地层厚于两侧斜坡带,整体下凹上凸;东营组地层充填—披覆,顶部遭受削截;上覆新近系厚度变化较小,但在后期构造挤压作用下出现了明显的弯曲上拱。在南北方向上,走滑断裂条

数的变化、中央走滑断裂的走向弯曲造成了中部走滑带的分段性。

(3)辽中南洼新生代构造演化可以划分为4个阶段,古近纪孔店组—沙四段沉积期走滑作用较弱,主要以伸展作用为主,发育数条NW走向的控洼断层;沙三段—沙一段沉积期辽中南洼进入构造转型的过渡期,整体沉降幅度较小、沉积厚度较薄;东营组沉积期辽中南洼进入由伸展断陷向裂后热沉降的过渡期,以右旋走滑活动为主,明显改造了前期的构造格局,导致中部走滑带早期活动的北西向断层转为近南北向,以及辽中南洼NW分带、SN分段构造格局的形成;新近纪辽中南洼整体拗陷,郯庐断裂带的右旋走滑导致中部走滑带之上新近系馆陶—明化镇组地层发育明显的负花状背形。

(4)辽中南洼现今复杂多样而又独特的构造特征并不单纯受控于一种构造背景,而是形成于伸展和走滑在时间和空间上的差异复合作用,并由此造成了构造格局、构造样式、断裂体系的时空差异。就整个渤海海域乃至渤海湾盆地而言,这种构造特征的时空差异同样存在,查明不同性质构造作用的差异复合过程及其机理是明确盆地形成演化与构造转型的关键。

参考文献:

[1] 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.

[2] 侯贵廷,钱祥麟,宋新民. 渤海湾盆地形成机制研究[J]. 北京大学学报:自然科学版, 1998, 34(4): 91-97.

[3] 徐长贵,周心怀,邓津辉,等. 辽西凹陷锦州25-1大型轻质油田发现的地质意义[J]. 中国海上油气, 2010, 22(1): 7-11, 16.

[4] 何京,柳屿博,吴奎,等. 渤海海域辽中凹陷南洼断裂体系及走滑控围模式[J]. 断块油气田, 2017, 24(2): 147-153.

[5] 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.

[6] 王祥,王应斌,吕修祥,等. 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, 2011, 32(3): 342-351.

[7] 李伟,陈兴鹏,吴智平,等. 渤海海域辽中南洼压扭构造带成因演化及其控藏作用[J]. 高校地质学报, 2016, 22(3): 502-511.

[8] 吴奎,徐长贵,张如才,等. 辽中凹陷南洼走滑伴生构造带发育特征及控藏作用[J]. 中国海上油气, 2016, 28(3):

50-56.

[9] 柳永军,徐长贵,杜晓峰,等. 渤海海域走滑反转构造带油气运聚与调整——以旅大22-27地区为例[J]. 断块油气田, 2013, 20(6): 694-697.

[10] 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.

[11] Hou G T, Hari K R. Mesozoic-cenozoic Extension of the Bohai Sea: Contribution to the Destruction of North China Craton[J]. Frontiers of Earth Science, 2014, 8(2):202-215.

[12] 侯贵廷,钱祥麟,蔡东升. 渤海中、新生代盆地构造活动与沉积作用的时空关系[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 201-206.

[13] 李伟,吴智平,张明华,等. 埕岛地区中生代和新生代断层发育特征及其对沉积的控制作用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2006, 30(1): 1-6, 11.

[14] 郑德顺,吴智平,李伟,等. 济阳坳陷中、新生代盆地转型期断裂特征及其对盆地的控制作用[J]. 地质学报, 2005, 79(3): 386-394.

[15] 武云云,马立驰,杨贵丽,等. 渤海湾盆地垦东地区新近系断裂特征及其控藏作用[J]. 石油实验地质, 2017, 39(1): 65-70.

[16] Kopp H, Kopp C, Phipps morgan J, et al. Fossil Hot Spot-ridge Interaction in the Musicians Seamount Province: Geophysical Investigations of Hot Spot Volcanism at Volcanic Elongated Ridges[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2003, 108(3):291-291.

[17] Kopp H, Flueh E R, Klaeschen D, et al. Crustal Structure of the Central Sunda Margin at the Onset of Oblique Subduction[J]. Geophysical Journal International, 2001, 147(2):449-474.

[18] Steinberger B, Sutherland R, OConnell R J. Prediction of Emperor-hawaii Seamount Locations From a Revised Model of Global Plate Motion and Mantle Flow[J]. Nature, 2004, 430(6996):167.

[19] 徐长贵. 渤海古近系坡折带成因类型及其对沉积体系的控制作用[J]. 中国海上油气, 2006, 18(6): 365-371.

[20] 左银辉,邱楠生,李建平,等. 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, 2009, 23(4): 746-754.

[21] 侯贵廷. 渤海湾盆地地球动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 92-99.

[22] 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.

[23] 官大勇,王永利,王玉秀,等. 渤海海域庙西北洼反转构造特征及其对油气成藏控制作用[J]. 海洋石油, 2012, 32(1): 18-22.

[24] 龚再升,王国纯,贺清. 上第三系是渤中坳陷及其周围油气勘探的主要领域[J]. 中国海上油气地质, 2000, 14(3): 2-13.

[25] 龚再升,王国纯. 渤海新构造运动控制晚期油气成藏[J]. 石油学报, 2001, 22(2): 1-7, 119.

[26] 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.

TECTONIC EVOLUTION AND FORMING MECHANISM OF THE SOUTHERN LIAOZHONG SAG, LIAODONG BAY DEPRESSION

LV Dingyou¹, LI Wei^{2, 3*}, GUO Ruipeng^{2, 3}, WU Kui¹, ZHANG Jiangtao¹

(1 CNOOC Ltd, Tianjin 300452, China; 2 School of Geosciences, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;

3 Function Laboratory of Marine Geo-Resource Evaluation and Exploration Technology, Qingdao 266580, China)

Abstract: Based on the conventional interpretation of latest 3D seismic data, the tectonic evolution of the southern Liaozhong Sag is analyzed, and the formation mechanism discussed. The results indicate that two main types of faults, i. e. the strike-slip faults and the extensional faults, are developed in the study area. The strike-slip faults extend primarily along the strike of strata in NNE and cut through both the deep and shallow sequences, while the extensional faults are developed in the deep sequences and complicated by the formers. Under the combined influence of strike-slip shearing and extensional stress, the southern Liaozhong Sag are divided into the western half-graben slope zone, the central strike-slip zone and the eastern half-graben slope zone from west to east, and the central strike-slip zone is further sub-divided into south and north parts according to the change in the quantity and curvature of the central strike-slip faults. The Cenozoic tectonic evolution of the southern Liaozhong Sag have passed through four tectonic evolutionary stages, including the extensional stage (E_k-E_{s₄}), tectonic transitional stage (E_{s₃}-E_{s₁}), strike-slip shearing + extensional stage (Ed), and strike-slip shearing + depression stage (N+Q), based on the tectonic evolution caused by temporal and spatial variation of the strike-slip shearing and extension stress. The present structural pattern of southern Liaozhong Sag is complicated under the control of the temporal and spatial variation of both the strike-slip shearing and extension instead of one stress.

Key words: structural characteristics; fault system; Cenozoic; southern Liaozhong Sag; Liaodong Bay