

doi:10.3799/dqkx.2017.110

郯庐断裂带渤南段构造特征及其控盆作用

张婧^{1,2}, 李伟^{1,2*}, 吴智平^{1,2}, 李春锐^{1,2}, 杨波³, 张晓庆^{1,2}

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071

3. 中海石油有限公司天津分公司渤海油田勘探开发研究院, 天津 300452

摘要:渤南地区郯庐断裂带具有很好的油气勘探前景,但由于其构造特征复杂,目前对渤南地区油气成藏条件、主控因素及富集规律的认识尚不清晰。通过对三维地震和地质资料的分析解释,结合前人研究成果,探讨了渤南地区郯庐断裂带构造特征的时空差异及其对盆地结构的控制作用。研究表明,渤南地区郯庐断裂带具有3组分支断裂,每组分支断裂由2~4条断裂构成,均表现出了明显的走滑特征,整体由东向西、由深至浅走滑程度逐渐减弱。新生代古新世—早始新世郯庐断裂带渤南段左旋走滑,东部分带活动明显、强度大,中带和西带不活动或活动较弱,渤南地区中生代发育的NWW向伸展断裂系统复活,形成北断南超的复式半地堑或南北双断式结构;中始新世以来,渤南地区郯庐断裂带转为右旋走滑,3组分支断裂均开始活动,表现为强烈的走滑兼伸展运动,强度由东向西逐渐减弱,中带分支断裂形成的中央构造脊将黄河口凹陷分割成东、西两个次洼,并开始逐渐发育一系列次级断层,与主断裂构成帚状断裂组合;新近纪—第四纪郯庐断裂带渤南段表现为右旋走滑兼挤压,主走滑断裂不连续,代之以大量规模较小的次级断裂系统。太平洋区板块俯冲方向、俯冲速率的变化以及深部动力背景的变迁共同造成了渤南地区郯庐断裂不同分支构造演化及其控盆作用的差异性,由于右旋走滑位移量小于先期的左旋走滑,现今渤南地区构造单元分布仍具左旋特征。

关键词:构造特征;构造演化;走滑运动;新生代;郯庐断裂带;渤南地区;油气。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2017)09-1549-16

收稿日期: 2016-11-12

Structural Characteristics of Tan-Lu Fault Zone in South Area of Bohai Sea and Its Control on Basin Structure

Zhang Jing^{1,2}, Li Wei^{1,2*}, Wu Zhiping^{1,2}, Li Chunrui^{1,2}, Yang Bo³, Zhang Xiaoqing^{1,2}

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

3. Research Institute of Bohai Oil Field, CNOOC Tianjin Branch Company, Tianjin 300452, China

Abstract: Tan-Lu fault zone in the south area of Bohai Sea has a good prospect for oil and gas exploration. However, due to its complicated structural features, the understanding of hydrocarbon accumulation conditions, main controlling factors and enrichment regularity is not clear at present. On the basis of the previous studies, 3D seismic data and geological information, the structural characteristics and spatiotemporal differences of Tan-Lu fault zone in the south area of Bohai Sea and the control of the development and evolution of Tan-Lu fault zone on the basin structure are studied in this paper. The results show that Tan-Lu fault zone in the south area of Bohai Sea has three branches, each of which is composed of 2—4 faults presenting strike-slip characteristics. The strike-slip strength gradually weakens westward. From Paleogene to Early Eocene, Tan-Lu fault zone in the south area of Bohai Sea presented sinistral strike-slip characteristics. The eastern branch experienced intense strike-slip movement, whereas the middle and western branches moved slightly, and the NWW-trending extensional faults which developed in Mesozoic renewed. Basin in the south area of Bohai Sea shows as a half-graben with northern-faulted and southern-overlapped structural setting or a graben with both northern and southern faulted settings.

基金项目:国家油气重大专项课题(No.2011ZX05023-006-05)。

作者简介:张婧(1988—),女,博士,主要从事油区构造解析及含油气盆地分析方面的研究。ORCID:0000-0001-9369-2795. E-mail:447680873@qq.com

* 通讯作者:李伟,ORCID:0000-0003-3567-7911. E-mail:liwei780923@163.com

引用格式:张婧,李伟,吴智平,等,2017.郯庐断裂带渤南段构造特征及其控盆作用.地球科学,42(9):1549—1564.

From the Middle Eocene, Tan-Lu fault zone turned into dextral strike-slip movement. The three branches started to activate and showed both strike-slip and extensional properties. The intensity of fault activity gradually weakened from east to west. The middle branch divided the Huanghekou sag into two subsags. A series of secondary faults formed the broom-like structure combined with the main fault. From Neogene to Quaternary, Tan-Lu fault zone presented dextral strike-slip as well as extrusion movement in the study area and a large number of small-scale secondary faults have developed. The change of subduction direction and rate of Pacific plate and the variation of deep geodynamics mechanism induce the differences of the evolution process of three branches and their controlling effect on the basin structure. Since the strength of dextral strike-slip movement is less than that of sinistral strike-slip, the distribution of the structural units in the south area of Bohai Sea are still showing the sinistral strike-slip characteristic now.

Key words: structural characteristics; structural evolution; strike-slip movement; Cenozoic; Tan-Lu fault zone; south area of Bohai Sea; hydrocarbons.

0 引言

郯庐断裂带是发育于中国东部的巨型走滑断裂系统,由 NNE 向陡倾或直立的基底断层(带)组成,切割和改造了所经之处的中、新生代伸展断层,现今具有右旋走滑特征(漆家福等,2008)。整体而言,郯庐断裂大致可分为 3 段:南部的苏皖段、中部的山东段以及北部的沈阳—渤海段(张鹏等,2010),其中渤海段的发育演化控制和影响着渤海海域的构造特征与油气成藏。前人对郯庐断裂渤海段构造变形特征、运动学、成因机理和油气富集规律进行了研究,普遍认识到郯庐断裂带在渤海海域的发育同样具有明显的分段性,可以划分为辽东湾段、渤中/渤海段和渤南段,沿其走向渤海海域郯庐断裂带具有自北向南断裂带分布范围逐渐变宽、断裂带条数逐渐增多的特点(王国纯,1998;蔡东升等,2001;邓运华,2004;徐佑德等,2006;姜建平等,2008;漆家福等,2008;周斌等,2008;彭文绪等,2009a;万桂梅等,2010;陈书平等,2010;汤良杰等,2011;徐长贵,2016)。

本文所指的渤南地区位于渤海湾盆地南部,包含黄河口凹陷、莱州湾凹陷、渤南低凸起和莱北低凸起 4 个构造单元,NNE 或近 SN 向发育的郯庐断裂带和近 EW、NWW 向断裂构成了其主干断裂体系,控制了渤南地区盆地结构的形成演化。朱秀香等(2009)、孙和风等(2011)、吕丁友等(2011)、吴国强等(2013)对郯庐断裂渤南段的断裂特征、走滑转换带及其对油气的控制作用进行了研究,区域重、磁力异常图解释结果显示,郯庐断裂带在莱州湾地区存在深浅差异,浅层较宽,可能由大致平行的 2~3 条断裂组成(漆家福等,2010),可以分为东、西两支,其西支贯穿渤南地区中部,将近 EW 向的渤南低凸起和黄河口凹陷切割错断,并构成莱北低凸起和莱州湾凹陷的西部边界;而东支则构成现今渤南地区各

构造单元的东部边界(朱秀香,2009;万桂梅,2010;傅强等,2013;吴国强等,2013)。受控于郯庐断裂带的发育演化,渤南地区构造特征复杂,NNE 向郯庐断裂带与近 EW 和 NWW 向断裂构成明显的网格状断裂体系。

在近年来的油气勘探历程中,前人先后在渤南地区郯庐断裂带附近发现了一系列的油气藏,如东支的垦利 12-2、垦利 6-4 和 6-5 构造,中支的渤中 28-34 构造、垦利 3-2、垦利 9-1 等(牛成民,2012;张新涛等,2014),反映了渤南地区郯庐断裂带良好的勘探前景。但是,在垦利 17-1、垦利 6-2、垦利 3-1 等构造相继钻探失利,表明目前对渤南地区油气成藏条件、主控因素及富集规律的认识尚不清晰,其根本原因就在于对构造发育演化特征及其控藏作用尚缺乏深入系统的研究,尤其是对渤南地区郯庐断裂带的控盆和控藏作用。针对这一问题,本文选取了目前渤南地区勘探程度相对较高、资料较为丰富的郯庐断裂带作为研究对象和切入点,对该断裂带在渤南地区构造特征进行了系统解剖和差异对比,进一步讨论了郯庐断裂带发育演化对渤南地区盆地演化的控制作用,以期为查明整个渤南地区的成盆、成藏过程提供借鉴。

1 渤南地区郯庐断裂带发育特征

目前人们普遍认识到郯庐断裂带由多条断裂构成,如沂沭断裂带由 5 条主干断裂构成(严乐佳,2013)、渤海海域由 3 条断裂构成(漆家福等,2004)等。具体到渤南地区,漆家福等(2008,2010)认为,渤南地区存在 3 组基底主干走滑正断层(图 1)。大地电测深剖面也显示(宋国奇,2006;胡惟等,2014),在垦东凸起和青东凹陷的西侧存在着高导带与低导带的突变,该突变界线可达上地幔(图 2),进一步结合渤

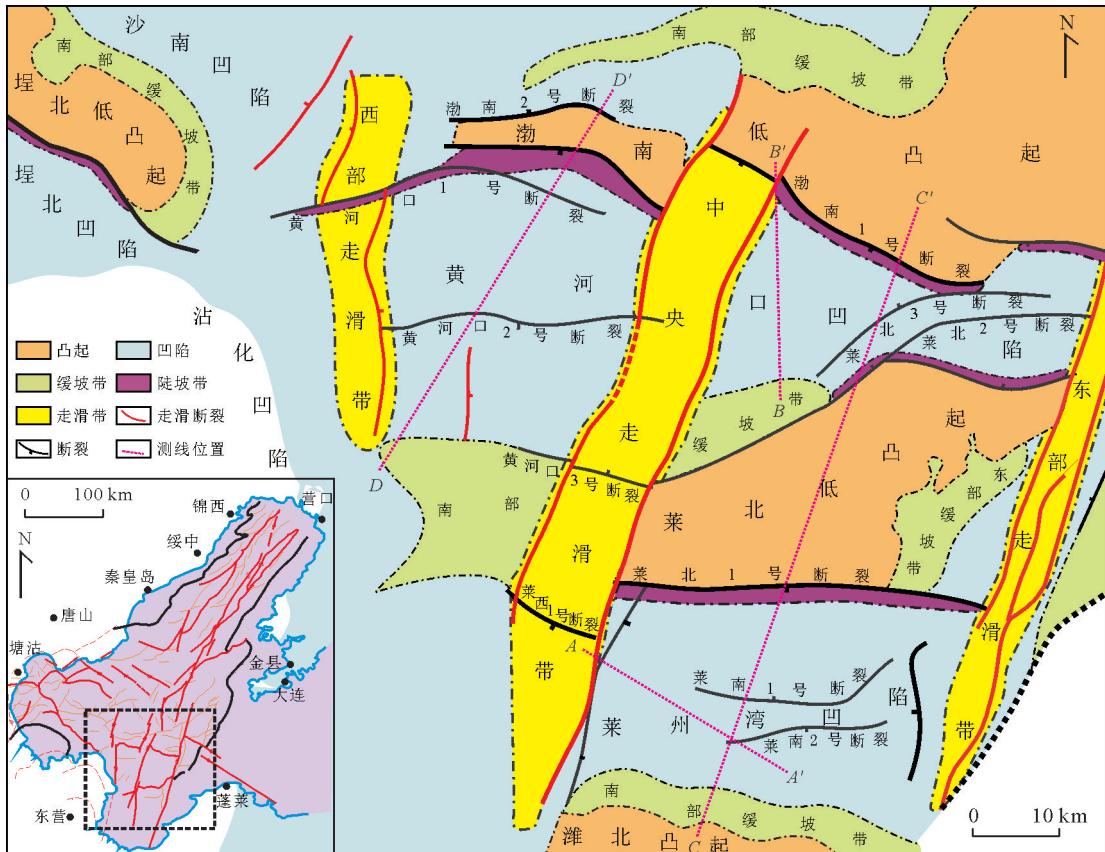


图1 渤南地区区域构造位置及主要断裂和构造单元区划

Fig.1 Regional structural location of the south area of Bohai Sea shows the mainly fault system and tectonic unit division
据漆家福等(2008)修改

南地区新生界不同层系底界面的立体显示(图3),除了较为明显的东部和中部断裂外,西北部的渤中25-1地区同样存在着一组显著的近SN向断裂系统,综合上述因素,笔者认为在渤南地区郊庐断裂带应由3组断裂构成,每组断裂又由2~4条断裂构成,与渤南地区近EW和NNW向断裂组成网格状断裂系统。为了表述明确,在本文的讨论中,将3组分支断裂分别命名为东带、中带和西带。

1.1 郊庐断裂东带

渤南地区郊庐断裂东带构成了现今黄河口凹陷和莱州湾凹陷的东部边界,并可一直向南北两端延伸,主要由3条分支断裂构成。彭文绪等(2009b, 2010)通过1200 ms三维地震水平方差切片的观察认为,该组断裂存在右旋走滑的拖拽现象,是莱州湾地区新近纪右旋走滑的直接证据。平面上3条分支断裂清晰,整体构成左阶排列,在主断裂两侧形成发育一系列NEE向次级断裂(图4a);剖面上断面近直立或呈高角度板式,与次级断层组成明显的花状构造。此外,由于东带分支断裂的整体左阶排列,在

主断裂附近派生出了明显的挤压应力,造成了局部古近系东营组和新近系的弯曲上拱(图4b,4c)。

1.2 郊庐断裂中带

郊庐断裂中带在渤南地区延伸较长,北部将黄河口凹陷分割成东、西两个次洼,南部构成莱州湾凹陷的西界,并可一直向南延伸。平面上1000 ms三维地震水平方差切片显示两条断裂南部表现为单一断裂,中北部由一系列近EW和NEE向次级断裂雁列式构成,但东侧分支较西侧分支更为发育,西侧分支在中部断裂特征不明显(图5a)。中带由2条分支断裂构成,剖面上深层断裂特征明显,单一直立断裂或高角度板式;而浅层2条分支断裂存在差异,东侧分支自南至北均较为发育,西侧分支则仅在南北两端较为发育,中部不明显(图5b,5c)。与东带相似,渤南地区郊庐断裂中带两条分支断裂在平面上左阶排列,北部尤为明显,形成了较为明显的走滑转换带或中央构造脊,控制了储集砂体的发育展布(朱秀香等,2009),但是与东带相比,派生挤压应力并不显著,挤压主要发育在东侧分支断裂的局部弯曲外凸部位,剖面上表现为下正上逆的反转断层,以

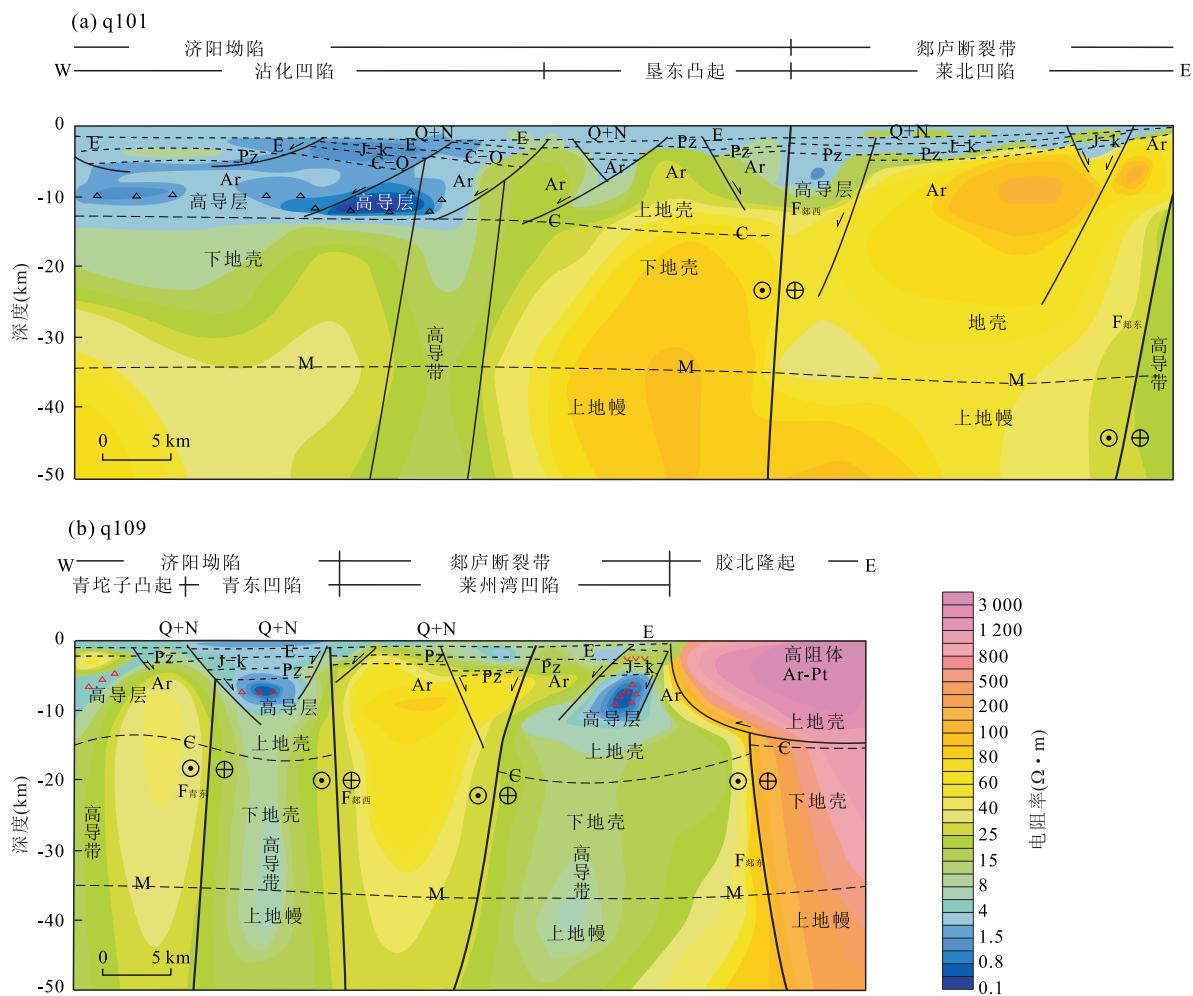


图 2 郊庐断裂带渤海段大地电磁测深二维连续介质反演剖面

Fig.2 Magnetotelluric sections across Tan-Lu fault zone in the south area of Bohai Sea

据宋国奇(2006)

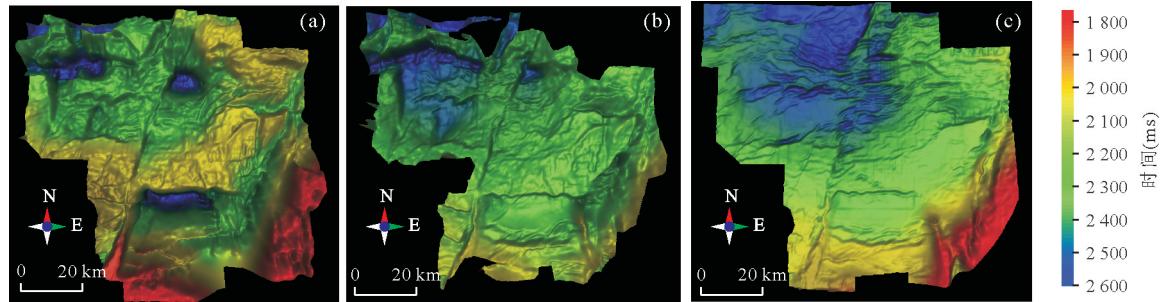


图 3 渤南地区不同层系底界面立体显示

Fig.3 Stereoscopic displays of the bottom of each layer in the south area of Bohai Sea

a.新生代底界面;b.沙二段底界面;c.明化镇组底界面

及地层的下凹上凸(图 5d).

1.3 郊庐断裂带

张明振等(2006)、胡贤根等(2007)对济阳坳陷桩海地区的研究认为,NNE 或近 SN 走向的长堤、孤东和垦东断层具明显走滑特征,这些走滑断裂在

区域上与渤海地区黄河口凹陷西部走向相连,为郊庐断裂带的向南延伸.在渤海地区,郊庐断裂带由 4 条分支断裂构成,整体 NNE 或近 SN 向.平面上浅层由一系列次级近 EW 或 NEE 向断裂组成(图 6a,6b,图 7a,7b),剖面上其切割深度较大,浅层

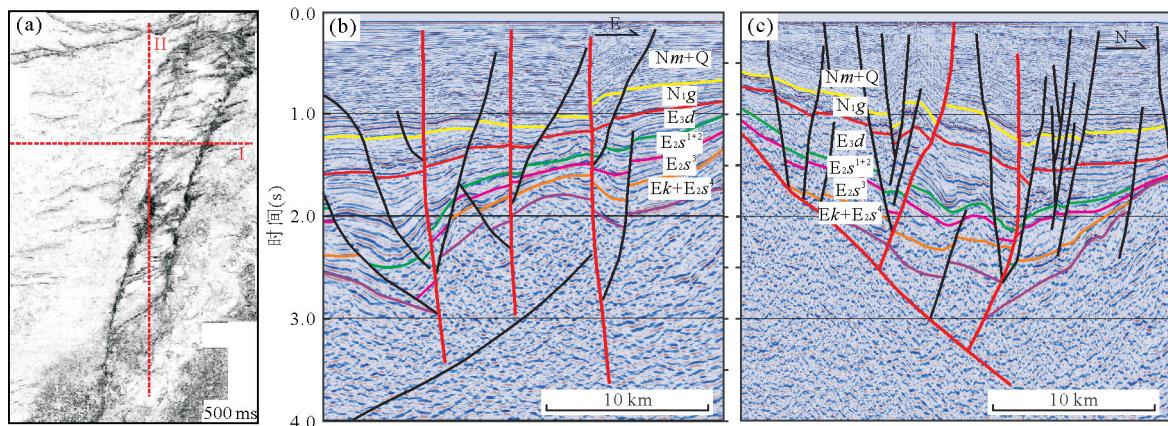


图4 渤南地区郊庐断裂东带平面及剖面特征

Fig.4 Structural patterns of the east branch of Tan-Lu fault zone in the south area of Bohai Sea in plane and section
a.500 ms 水平相干切片;b.EW 向剖面 I;c.SN 向剖面 II

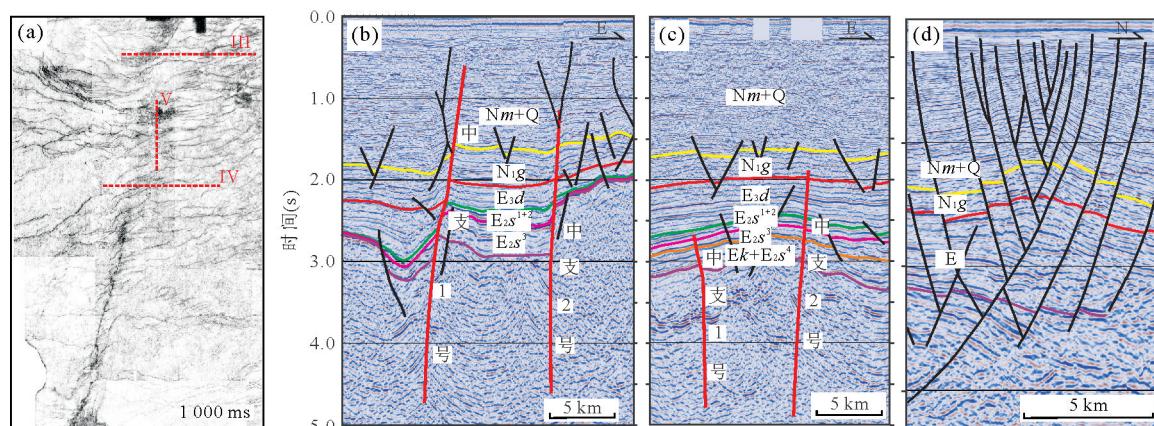


图5 渤南地区郊庐断裂带中带平面及剖面特征

Fig.5 Structural patterns of the middle branch of Tan-Lu fault zone in the south area of Bohai Sea in plane and section
a.1 000 ms 水平相干切片;b.EW 向剖面 III;c.EW 向剖面 IV;d.SN 向剖面 V

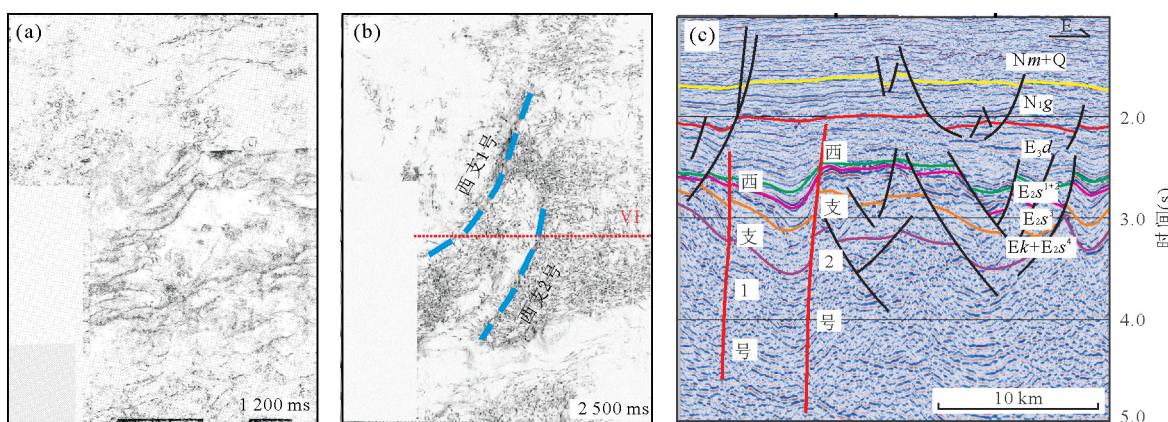


图6 渤南地区郊庐断裂带西支 1 号、2 号断裂平面及剖面特征

Fig.6 Structural patterns of fault 1 and fault 2 of the west branch of Tan-Lu fault zone in the south area of Bohai Sea in plane and section
a.1 200 ms 水平相干切片;b.2 500 ms 水平相干切片;c.EW 向剖面 VI

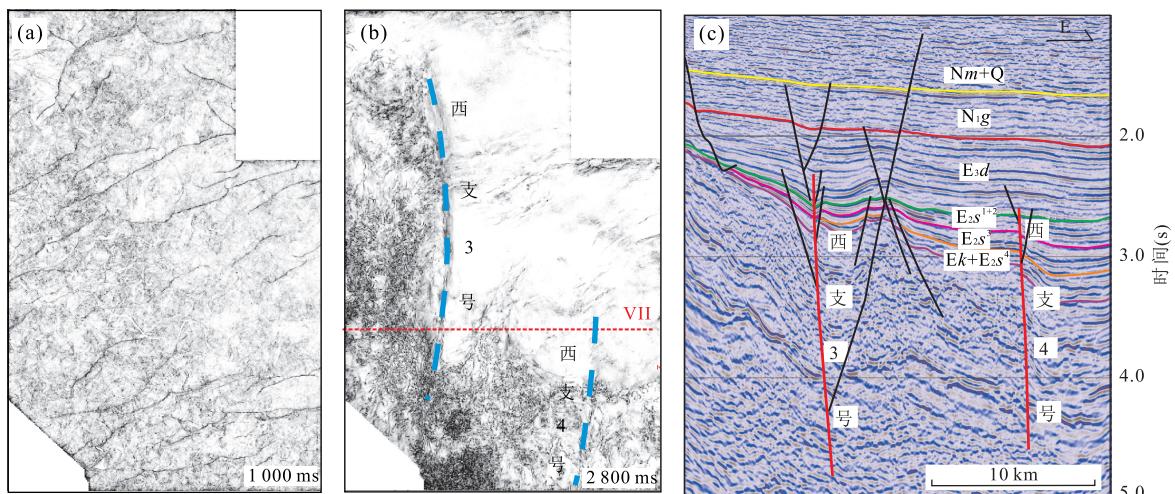


图 7 渤南地区郯庐断裂带西支 3 号、4 号断裂平面及剖面特征

Fig.7 Structural patterns of fault 3 and fault 4 the west branch of Tan-Lu fault zone in the south area of Bohai Sea plane and section
a.1 000 ms 水平相干切片;b.2 800 ms 水平相干切片;c.EW 向剖面Ⅶ

特征不明显(图 6c, 图 7c), 主断裂仅切割至古近系或新近系馆陶组下部。与东带和中带相同, 渤南地区郯庐断裂西带分支断裂仍为左阶排列, 但并未发现明显的挤压构造特征。

通过以上分析笔者发现, 渤南地区郯庐断裂带的 3 组断裂在垂向和横向上均存在着明显的特征差异, 深层 3 组断裂均较为发育, 切割深度大(图 3a, 3b), 表现为单一直立断裂; 向浅层次级断裂数量逐渐增多, 主断裂倾角逐渐变缓, 自东向西主断裂连续性变差, 主断裂与次级断裂的组合关系由东带的梳状转变为中带的侧列式、雁列式, 西带则主断裂不发育, 次级断裂雁列式分布(图 3c)。此外, 尽管 3 组断裂均呈明显的左阶排列, 在右旋走滑条件下派生局部挤压应力, 但明显的挤压构造主要发育在东部分

支。综合上述对渤南地区郯庐断裂带延伸长度、平面和剖面特征及与次级断裂组合样式的分析, 笔者认为渤南地区郯庐断裂不同分带的走滑强度具有自东向西、由深至浅逐渐减弱的趋势。

2 渤南地区郯庐断裂带的构造演化

郯庐断裂带具有多期次、多性质的复杂活动历史, 近年来的研究表明, 该断裂带起源于印支期华北与华南板块的陆—陆碰撞(朱光等, 2004), 侏罗纪晚期至早白垩世郯庐断裂带发生了大规模的左旋走滑(Gilder *et al.*, 1999; Grimmer *et al.*, 2002; 朱光等, 2004, 2006; Zhu *et al.*, 2005, 2010; Meng *et al.*, 2007; 侯明金等, 2007; 张岳桥等, 2008; 孙晓猛等,

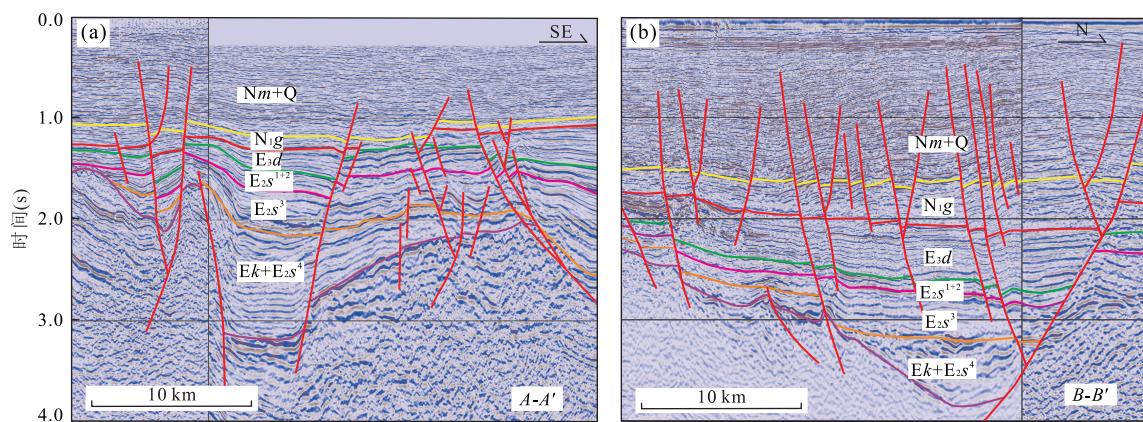


图 8 渤南地区过黄河口和莱州湾凹陷典型地震剖面反映角度不整合的发育

Fig.8 The seismic sections show angular unconformity developed in Huanghekou sag and Laizhouwan sag in the south area of Bohai Sea
a.过莱州湾凹陷 SE 向剖面;b.过黄河口凹陷 SE 向剖面.剖面位置见图 1

2010),晚白垩世至新生代古近纪早期郯庐断裂带的构造演化一直存在争议,且不同分段差异性明显(黄超等,2013),多数学者认为晚白垩世郯庐断裂及相关断裂以右旋走滑为主,伴之以拉分盆地(蔡东升等,2001;侯贵廷等,2001;朱光等,2001,2004;张岳桥等,2008),但是对何时从左旋走滑转变为右旋走滑少有提及。另外一个需要注意的问题就是走滑的强度,通过观察渤海地区现今断裂体系与构造单元展布笔者发现(图1),NWW走向的渤海低凸起被郯庐断裂带中带错开,埕北低凸起和渤海低凸起被郯庐断裂带西带错开,均表现为左旋走滑的特征,似乎与目前学术界普遍认为的郯庐断裂带新生代以来的右旋走滑相矛盾。笔者认为这种特征具有两种涵义,一是持续的左旋走滑活动,另一种则代表了早期左旋与后期右旋的强度差异,即早期左旋走滑强度

大、距离长,而后来的右旋走滑强度小、距离短,尚不足以抵消早期的左旋走滑距离,因此现今仍表现为左旋特征,但不能否认右旋走滑的存在。

2.1 渤南地区郯庐断裂活动的地层响应

地震剖面解释结果表明,在渤海地区的黄河口凹陷和莱州湾凹陷沙四段与沙三段之间均存在着明显的角度不整合,沙四段顶部同相轴削截现象明显(图8)。任建业(2004)曾提出了东营凹陷古近系沙三段底界S6'界面为一个在渤海湾盆地和中国东部许多盆地可以追溯的区域性界面,其发育时间与印度洋板块和太平洋板块新生代期间一次重大的运动学调整时间一致,渤海地区沙四段与沙三段之间的角度不整合同样也应是这次区域构造运动的产物,表明沙四段末期渤海地区经历了区域性的构造转型。此外,莱州湾凹陷沙二段与沙三段之间也发育一个

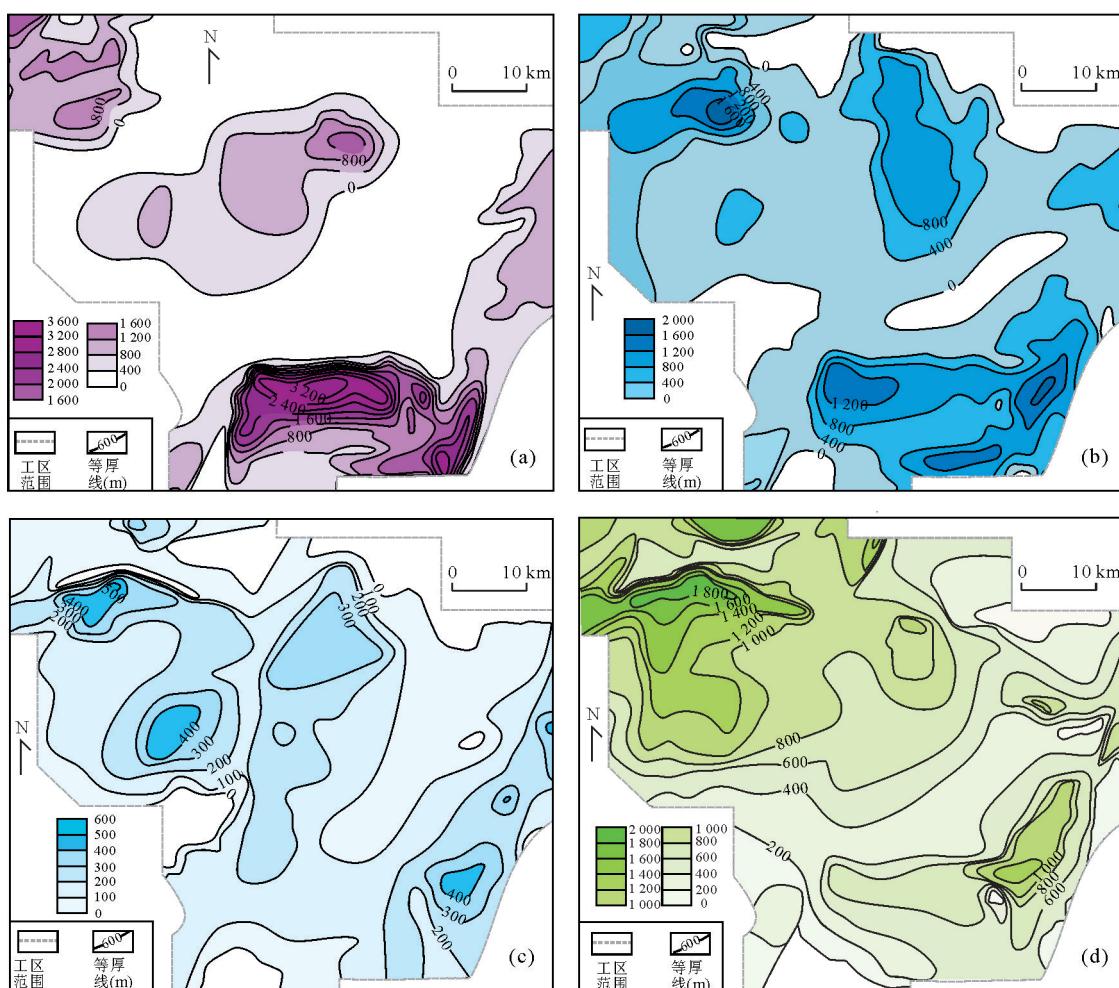


图9 渤海地区新生代各层系残留地层展布等值线

Fig.9 Remnant formation distributive sketch of each layer in Cenozoic in the south area of Bohai Sea
a.孔店组~沙四段;b.沙三段;c.沙二段~沙一段;d.东营组

明显的角度不整合,而黄河口凹陷沙二段与沙三段之间为整合或平行不整合接触,反映了古近纪莱州湾地区古近纪存在多期的构造变革,而黄河口凹陷自沙三段以后则基本为稳定持续沉积。

进一步结合渤海地区古近系各层系厚度(图 9)特征发现,古新统—早始新统(孔店组—沙四段)分布局限,整体近 EW 向展布,仅在郯庐断裂东带附近 NNE 向展布;中始新统沙三段分布范围扩大,除沿莱北 1 号和黄河口 1 号断裂西段的近东西向展布外,郯庐断裂带附近均表现出为 NNE 向展布,至上始新统沙一、二段,地层整体表现为 NNE 向展布,近 EW 向特征仅在黄河口 1 号西段有所体现;而渐新统东营组展布特征与沙一、二段相类似,但厚度中心已转移到黄河口凹陷西北部。

地层的垂向接触关系和横向展布特征表明渤海地区在古近纪经历了重要的盆地转型,古新世—早始新世以 NWW 和近 EW 向断裂活动为主,郯庐断裂除东带外,中、西分带活动并不明显;中始新世以后的构造转型使得 NWW 和近 EW 向断裂活动强度减弱,NNE 向郯庐断裂中带和西带的活动逐渐加强,加之软流圈上涌方向由南向北的迁移(丁增勇等,2008; 李三忠等,2010; 索艳慧等,2015; 许立青等,2015),在这两种共同作用下,渤海地区地层沉降

中心逐渐向西北方向迁移。

2.2 渤南地区郯庐断裂活动的构造响应

作为渤南地区乃至渤海海域长期活动的深大走滑断裂,郯庐断裂控制和影响了研究区的构造格局,通过对主干断裂的活动特征分析笔者发现,近 EW 和 NWW 向断裂孔店组—沙四段沉积期活动强度较大(图 10, 图 11b),此后逐渐降低;此外,孔店组—沙四段沉积期和沙三段沉积期均表现出了东部活动强度大于西部的特征,从一个侧面反映了早期东部的走滑拉分作用强于西部。就郯庐断裂不同分带而言,东带孔店—沙四段沉积期活动明显,中带的最东支孔店—沙四段沉积期轻微活动,而西支只在沙三段及以后明显活动(图 11a),西带孔店—沙四段沉积期活动不明显,沙三段及东营组沉积期活动明显(图 11a)。以上分析表明,渤南地区古近纪古新世—早始新世(孔店—沙四期)主要活动断裂为 NNE 向郯庐断裂东带和近 EW 或 NWW 向伸展断裂。前人认为,NWW 和近 EW 向伸展断裂为左旋走滑应力场条件下的派生产物(侯贵廷等,2000,2001,2014; 李伟等,2005,2009,2010; 吴智平等,2007; Hou et al., 2014)。因此,笔者认为渤南地区古近纪古新世—早始新世郯庐断裂带左旋走滑,且东带活动强度大,中带和西带活动较弱;中始新世以后郯庐断裂

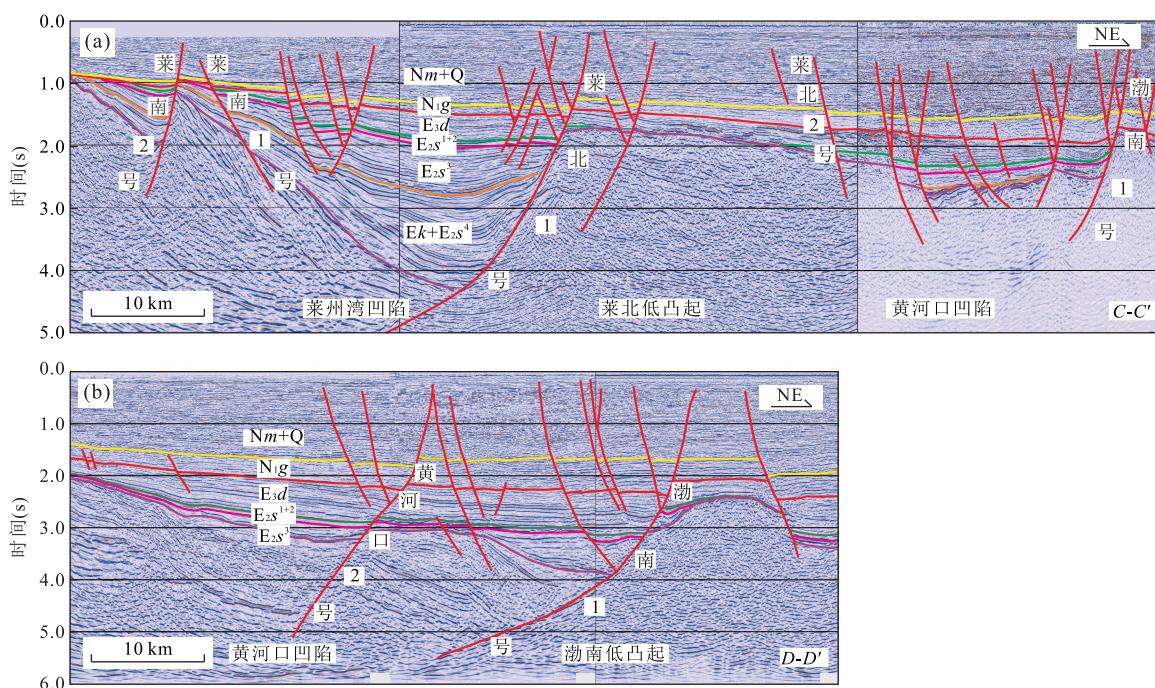


图 10 渤南地区过黄河口东洼—莱北低凸起—莱州湾凹陷及过黄河口西洼地震剖面

Fig.10 The seismic sections through Huanghekou western sag-Laibei low uplift-Laizhouwan sag and Huanghekou eastern sag
a.过黄河口东洼—莱北低凸起—莱州湾凹陷 NE 向地震剖面;b.过黄河口西洼 NE 向地震剖面.剖面位置见图 1

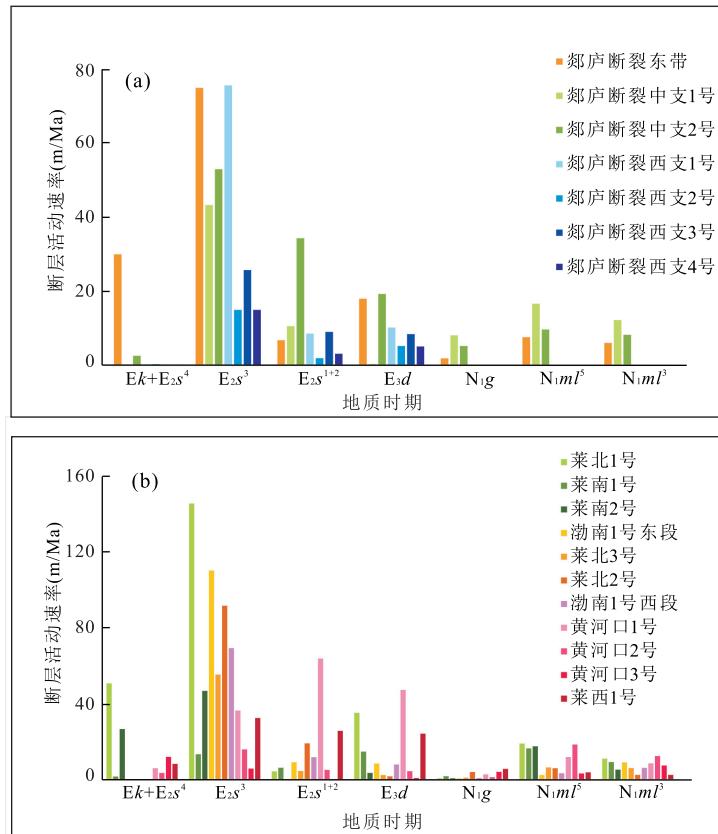


图 11 渤海地区不同方向断裂断层活动速率

Fig.11 Average fault activity rate in each period of different trending faults in the south area of Bohai Sea
a.NNE 向郊庐断裂带分支断裂各时期平均断层活动速率;b.近 EW 向、NWW 向断裂各时期平均断层活动速率

中带、西带活动强度逐渐增大, NWW 和近 EW 向断层活动减弱, 且开始出现大量次级 NE 向断裂, 表明区域应力场转为右旋走滑。

2.3 渤海地区郊庐断裂带的构造演化

作为规模如此之大的深大走滑断裂系统, 其构造活动与转型必然要吻合于大规模的板块运动, 如晚侏罗—早白垩世的大规模左旋走滑吻合于 140 Ma 左右西太平洋区伊泽奈崎板块的高速 NNW 向俯冲(李伟, 2007)。综合上述分析, 进一步结合中国大陆东部周边板块的运动方式, 本文将郊庐断裂带渤海段的新生代构造演化划分为三大阶段: 新生代古新世—早始新世, 太平洋板块俯冲方向仍为 NWW 向, 郊庐断裂带表现为左旋走滑, 东带活动强度大, 中带和西带垂向活动较弱, 而是以走滑作用为主; 中始新世以来, 太平洋板块俯冲方向转为 NWW 向(Kopp *et al.*, 2001, 2003; Steinberger *et al.*, 2004), 郊庐断裂带转为右旋走滑, 同时由于俯冲的速度有所增大(Engebretson *et al.*, 1985; Northrup *et al.*, 1995), 渤海地区郊庐断裂 3 组分带断裂均开始活动, 活动强度由东向西逐渐减弱; 至新近纪以

来, 由于岩石圈发生冷却或热作用减弱, 加之日本海的扩张, 中国大陆普遍近东西向变窄(万天丰和朱鸿, 2002), 渤海海域中的郊庐断裂带以右旋走滑变形或走滑—收缩变形为主(漆家福等, 2010; 周维维等, 2014)。

3 郊庐断裂带对渤海地区构造发育演化的控制作用

受控于郊庐断裂 3 组分带断层的构造活动, 渤海地区新生代不同构造单元的盆地结构与构造样式具有明显的差异性和阶段性, 构成了现今复杂多样的构造格局(图 12)。

3.1 渤海地区现今盆地结构与构造样式

渤海地区现今表现为“东、西分带, 南、北分块”的构造格局。在近 EW 向和 NWW 向断裂(黄河口 1 号、渤海 1 号、莱北 1 号断裂等)控制下, 自北向南形成了渤海低凸起、黄河口凹陷、莱北低凸起和莱州湾凹陷, 黄河口凹陷西洼及莱州湾凹陷表现具有中

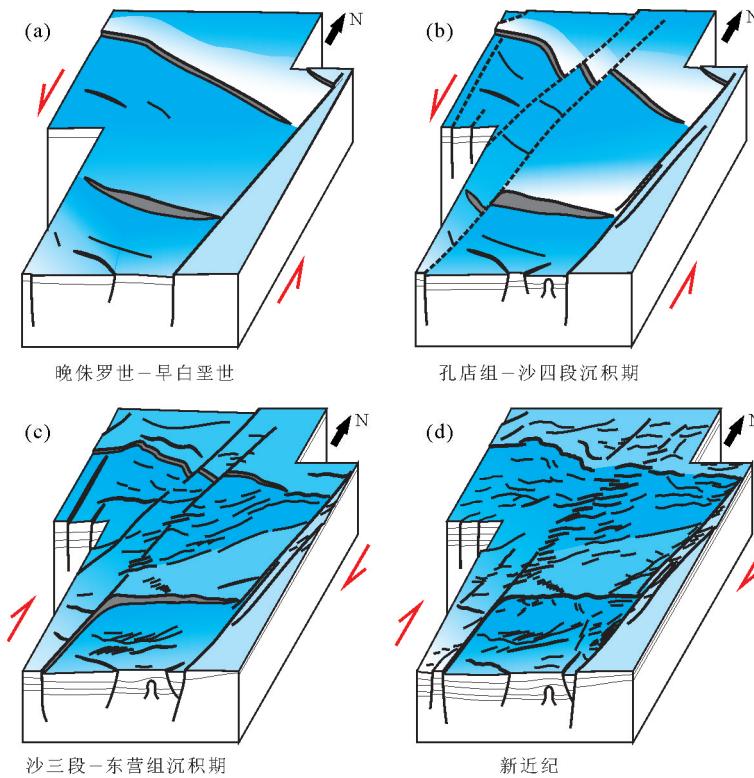


图 12 渤南地区构造演化模式

Fig.12 Tectonic evolution pattern in the south area of Bohai Sea

央隆起的北断南超复式半地堑结构,黄河口东洼为南北双断的特点;在凹陷(洼陷)内部,如黄河口西洼及莱州湾凹陷,又被近 EW 向扭张性质的二级断裂(黄河口 2 号、莱南 1 号、莱南 2 号断裂)分割成南北次洼及中央隆起区(图 1, 图 10)。NNE 向的郯庐断裂带控制和改造了这种南北差异,中带 2 号断裂和东带断裂带构成了莱州湾凹陷和莱北低凸起的东西边界;中带两条断裂的右旋左阶排列形成具压扭性质的中央构造脊,将黄河口凹陷分割成东、西两个次洼;西带分支断裂形成的构造脊则将黄河口凹陷西洼与沾化凹陷分隔。此外,从图 3 上看,整个渤南地区东高西低,莱北低凸起和渤南低凸起东段呈 NNE 向展布,除了沉降中心迁移造成的影响外,也从一个侧面反映了郯庐断裂东带的构造挤压抬升强于中带和西带,亦即走滑作用强于中带和西带。

就构造样式而言,渤南地区主要发育伸展、伸展—走滑、走滑 3 种类型的构造样式。值得注意的是,由于走滑断裂的侧接排列和局部弯曲,还发育有走滑派生构造样式,如前所述的不同分带断裂发育的走滑派生挤压构造样式,挤压的强度由东到西逐渐减弱。此外,从图 3 上笔者发现明化镇组底界面郯庐断裂中带两条分支断层在黄河口凹陷附近均发育

有大量近 EW 或 NWW、NEE 向次级断裂,与主走滑断裂构成帚状断裂组合(伸展叠瓦扇),垂向上这种平面组合样式在沙二段底界面也有体现,但并不明显,而古近系底界面则基本没有显示。进一步结合断裂产状,深层 3 组断裂均表现为单一直立断裂,向浅层次级断裂数量逐渐增多,主断裂倾角逐渐变缓,自东至西主断裂连续性变差,表明郯庐断裂伸展活动由早至晚逐渐增强,且自东向西逐渐增强,而走滑程度逐渐减弱。

3.2 郊庐断裂带对渤南地区构造发育演化的控制作用

受控于郯庐断裂 3 组分带断层的构造活动,渤南地区新生代不同构造单元的盆地结构与构造样式具有明显的差异性和阶段性,构成了现今复杂多样的构造格局(图 12),体现了中、新生代不同演化阶段的构造叠加、改造作用。

中生代晚侏罗世—早白垩世郯庐断裂带左旋走滑,在左旋应力情况下派生出 NNE 向伸展应力,整个渤海湾盆地以 NWW 向伸展断裂活动为主(侯贵廷等,2000,2001,2014;李伟等,2005,2009,2010;吴智平等,2007;Hou et al., 2014)。就渤南地区而言,郯庐断裂东带活动强烈,在其西侧发育 NWW 向的

黄河口 1 号断裂和莱北 1 号断裂, 控制了黄河口凹陷和莱州湾凹陷的形成, 由于该时期郯庐断裂中带和西带不活动或活动较弱, NWW 向伸展断裂走向延伸远、连续性好, 因此下降盘的黄河口凹陷与莱州湾凹陷规模大于现今, 且黄河口凹陷为一整体, 并未分隔成两个次洼(图 12a)。晚白垩世受控于区域挤压应力的影响, 加之岩石圈板块的加厚(吴福元等, 2008), 浅部地壳伸展作用停止, NWW 向伸展断裂停止活动(李伟等, 2010), 黄河口凹陷和莱州湾凹陷并未接收沉积。

新生代古近纪古新世—早始新世(孔店组—沙四段沉积期), 岩石圈板块再次减薄, 郯庐断裂带继承了中生代早白垩世以来的构造特征, 仍以左旋走滑为主, 派生出的 NNE 向伸展应力导致渤海地区 NWW 向的黄河口 1 号、莱北 1 号断裂复活, 活动强烈, 控制了北断南超的黄河口凹陷和莱州湾凹陷的形成, 地层沉积厚度大, 上盘近断层处发育有明显的扇三角洲沉积。值得注意的是, 该时期郯庐断裂带中带、西带具有一定的水平走滑, 因此错开了早期的 NWW 向伸展断裂和凹陷格局, 导致黄河口凹陷被分割为东、西两个次洼(图 12b), 现今莱州湾凹陷的西界并不是其原始沉积边界, 地震剖面上并未显示出明显的边缘相或向中央构造脊超覆终止, 而是表现为明显的同相轴错断。

中始新世(沙三段沉积期)以来, 郯庐断裂带转为右旋走滑, 3 组分带断层均开始活动, 派生出大量次级断裂, 不同方向断裂共同控制了凹陷的形成和地层的沉积; 中带和西带的左阶右阶排列派生出构造挤压应力, 中带的走滑转换带进一步加剧了黄河口凹陷的东西分隔, 西带的走滑转换带将黄河口凹陷西部次洼与沙南凹陷和沾化凹陷分隔。早期 NWW 向的伸展断裂继续活动, 并被改造成近 EW 向, 在距郯庐断裂带较近部位可见明显的断层弯曲、拖拽现象, 在走滑断裂末端逐渐发育伸展叠瓦扇(帚状断裂组合)。需要指出的是, 尽管郯庐断裂带转为右旋走滑, 但由于右旋走滑量较小, 并没有完全抵消左旋走滑的位移量, 因此现图 12c 上观察到构造单元的分布仍表现为左旋特征。

新近纪以来, 郯庐断裂带仍为右旋走滑, 但伴之以近 EW 向的区域挤压, 渤海地区主断裂的伸展活动强度普遍降低, 相比较而言走滑应力所占比例增大, 开始发育大量垂向断距较小的近 EW 和 NEE 向次级断裂, 且多发育于主干断裂位置, 雁行式排列, 对地层沉积的控制作用较弱(图 12d)。

4 结论

(1) 渤海地区郯庐断裂带具有 3 组分支断裂, 3 组分支断裂在垂向上和横向既具有相似性, 也表现出了明显的差异性。深层 3 组断裂均较为发育, 表现为单一直立断裂; 向浅层次级断裂数量逐渐增多, 主断裂倾角逐渐变缓, 自东至西主断裂连续性变差; 3 组断裂平面上均呈明显的左阶排列, 在右旋走滑条件下派生局部挤压应力, 明显的挤压构造主要发育在东部分支。整体而言, 渤海地区郯庐断裂不同分带的走滑强度具有自东至西、由深至浅逐渐减弱的趋势。

(2) NNE 向的郯庐断裂带控制和改造了近 EW 向和 NWW 向断裂形成的北断南超的构造格局, 中带 1 号、中带 2 号断裂形成的中央构造脊将黄河口凹陷分割成东、西两个次洼; 西带分支断裂形成的构造脊则将黄河口凹陷西洼与沾化凹陷分隔。郯庐断裂不同分带断裂由东向西走滑程度的逐渐减弱造成了渤海地区东高西低的构造格局。受控于郯庐断裂的走滑活动, 郯庐断裂中带两条分支断层与次级断裂构成帚状断裂组合, 垂向上由深至浅逐渐增强, 表明由早至晚郯庐断裂中带分支断层的伸展作用逐渐增强。

(3) 新生代古新世—早始新世郯庐断裂带渤海段左旋走滑, 东带垂向活动明显, 中带和西带垂向不活动或活动较弱, 渤海地区中生代开始形成 NWW 向伸展断裂系统复活并被错断; 中始新世以来, 渤海地区郯庐断裂带转为右旋走滑, 3 组分带断裂均具垂向活动, 表现为强烈的走滑并兼有伸展运动, 活动强度由东向西逐渐减弱; 新近纪—第四纪郯庐断裂带渤海段表现为右旋走滑兼有挤压, 主走滑断裂不连续, 代之以大量规模较小的次级断裂系统。

5 讨论

前人普遍认识到了郯庐断裂带具有明显的分段性, 不同段的活动时间、活动强度等均存在差异, 本文研究表明, 除了这种走向上的差异性, 横向上不同分支断裂同样存在差异。中国大陆东部主要受控于滨太平洋构造域的影响, 太平洋板块的俯冲碰撞是郯庐断裂构造活动及转型的主要控制因素, 构造应力主要来自于东部, 因此必然体现出自东向西走滑作用强弱的差异, 但是目前对于这方面的研究较少, 而对走滑强弱差异性直观准确地判识依据目前也尚不明确。笔者认为, 除了走滑断裂样式、走滑断裂对

地层沉降控制作用的差异外,走滑位移量的大小应该是走滑强弱的直观表现,针对盆地区,构造物理模拟实验和构造解析相结合的方法(单家增等,2004;童亨茂等,2008)具有较强的适用性和较高的准确性,可以与断层的垂向活动分析相结合作为郯庐断裂不同分带断层活动强度差异性研究的切入点。此外,横向不同分带断裂的差异性对于盆地结构与构造样式的影响也是一个很好的切入点,紧邻郯庐断裂带的辽东湾、渤海、渤南地区,和位于郯庐断裂西侧的渤海中、渤海西地区,在盆地构结构和构造样式上具有明显的差异;局部由郯庐断裂带附近至远离郯庐断裂带构造样式也存在明显的差异,应该对其时空展布规律进行深入、细致的研究。

此外,不同分支断裂的活动特征在时间上有无差异,如针对郯庐断裂带由左旋到右旋转型这一问题,任建业等(2004)认为东营凹陷沙三段底界对应这一事件,陈洁等(2004)则认为济阳坳陷孔店组与沙四段之间不整合对应,黄雷等(2012)对渤海海域的研究则认为这一事件对应沙三期末,并认为这一事件对中国大陆东部的影响可能具有迁移性。而本文的研究表明,渤海海域渤南地区郯庐断裂由左旋向右旋转型这一事件对应于沙三段与沙四段之间的不整合,笔者认为,前人对这一转型事件在时间上认识的差异性很有可能是郯庐断裂不同分带断层活动差异性的体现,亦即转型时间的差异造成了横向不整合的差异,但是在渤海湾盆地内部,新生界古近系构造层存在多个区域或局部的不整合,是具体哪一个不整合对应这一转型事件,尚需要诸多证据加以厘定。

作为渤海海域的重要油气产区,渤南地区发现了一系列大、中型油气藏,尤其是在郯庐断裂不同分带断层之上及其附近,从目前的勘探成果上看,中带的渤海 28-34 构造和西部的渤海 25-1/S 构造探明石油地质储量均在亿吨以上,且含油层系主要在新近系,而东带的垦利 6-4/5 和垦利 12-2 构造储量相对较低,含油层系则主要集中在古近系,整体具有自东向西逐渐变浅、储量逐渐变多的规律。通过多年对胜利、渤海、南海的工作积累,笔者发现,就走滑断裂对油气运聚成藏的控制作用而言,除了对生烃洼陷的控制之外,更多的起到了输导和封堵作用,何时输导或封堵主要受控于走滑断裂结构特征、活动时间和强度、局部伸展或挤压应力性质的差异,走向不同分段、横向不同分带、垂向不同层系均可能存在显著的不同,但是目前尚缺乏对于这种差异性的具体判定标准,多停留在定性的讨论。在今后的工作中应

以构造的差异性分析为切入点,在此基础上进一步结合不同位置勘探成功或失败案例的解剖,以明确走滑作用对油气成藏的控制作用。

作为中国东部发育的巨型走滑断裂系统,郯庐断裂带对中、新生代以来的成盆、成矿作用具有重要的控制和影响,随着各种地质、地球物理资料的不断丰富,在今后的研究工作中,应进一步开展对于郯庐断裂带横向不同分支构造活动差异性的研究,并在此基础上探讨这种差异性对于区域和局部构造成因演化、油气富集与分布规律的控制作用。

致谢:感谢审稿专家在论文评审和修改过程中提出的宝贵意见和建议。

References

- Cai, D.S., Luo, Y.H., Wu, W.L., et al., 2001. Shallow Tectonic Deformation and Its Relationship to Hydrocarbon Enrichment in Bohai Depression and Adjacent Areas, Bohai Bay Basin, *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 15(1):35–43(in Chinese with English abstract).
- Chen, J., 2004. Characteristics and Prospecting Meaning of Sedimentary Basin in Structural Transitional Stages in Kongdian Formation of Jiyang Depression, *Progress in Geophysics*, 19(2):392–398(in Chinese with English abstract).
- Chen, S. P., Lü, D. Y., Wang, Y. B., et al., 2010. Neogene Quaternary Strike-Slip Movement in Bohai Basin and Its Significance in Petroleum Exploration, *Acta Petrolei Sinica*, 31(6):894–899(in Chinese with English abstract).
- Deng, Y.H., 2004. Tensional-Shear Faults and Analysis of Oil and Gas Migration—Taking Bohai Oil Province for Example, *China Petroleum Exploration*, 9(2):33–37(in Chinese with English abstract).
- Ding, Z. Y., Wang, L. S., Zhong, K., et al., 2008. Distribution Characteristics and Tectonic Significance of Cenozoic Remnant Formation, Bohai Bay Basin, *Geological Journal of China Universities*, 14(3):405–413(in Chinese with English abstract).
- Engbegetson, D.C., Cox, A., Gordon, R.G., 1985. Relative Motions between Oceanic and Continental Plates in the Pacific Basin, *Geological Society of America Special Papers*, 93:1–60.doi:10.1130/spe206-p1
- Fu, Q., Liu, B.B., Xu, C.H., et al. 2013. The Couple Relationship of Quantitative Analysis of the Structures and Oil & Gas Accumulation in Huanghekou Depression, Bohai Bay Basin, *Acta Petrolei Sinica*, 34 (Suppl. 2): 112–119(in Chinese with English abstract).
- Gilder, S.A., Leloup, P.H., Courtillot, V., et al., 1999. Tectonic Evolution of the Tancheng-Lujiang (Tan-Lu) Fault

- via Middle Triassic to Early Cenozoic Paleomagnetic Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B7): 15365—15390. doi: 10.1029/1999JB900123
- Grimmer, J. C., Jonckheere, R., Enkelmann, E., et al., 2002. Cretaceous-Cenozoic History of the Southern Tan-Lu Fault Zone: Apatite Fission-Track and Structural Constraints from the Dabie Shan (Eastern China). *Tectonophysics*, 359(3—4): 225—253. doi: 10.1016/s0040—1951(02)00513—9
- Hou, G. T., 2014. *Geodynamics of Bohai Basin*. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Hou, G. T., Qian, X. L., Cai, D. S., 2000. Space-Time Relationship between Tectonics and Sedimentation of Mesozoic-Cenozoic Bohai Basin. *Oil & Gas Geology*, 21(3): 201—206 (in Chinese with English abstract).
- Hou, G. T., Qian, X. L., Cai, D. S., 2001. The Tectonic Evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic Time. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 37(6): 845—851 (in Chinese with English abstract).
- Hou, G., Hari, K. R., 2014. Mesozoic-Cenozoic Extension of the Bohai Sea: Contribution to the Destruction of North China Craton. *Frontiers of Earth Science*, 8(2): 202—215. doi: 10.1007/s11707—014—0413—3
- Hou, M. J., Zhu, G., Mercier, J., et al., 2007. Analyzing on Geodynamics and Regional Tectonic Evolution of the Tan-Lu Fault Zone (Anhui Segment) and Its Environs. *Chinese Journal of Geology: Scientia Geologica Sinica*, 42(2): 362—381 (in Chinese with English abstract).
- Hu, W., Zhu, G., Yan, L. J., et al., 2014. Analysis of Relationship between Seismic Activity and Crust Electrical Textures for the Central Segment of the Tan-Lu Fault Zone. *Geological Review*, 60(1): 80—90 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X. G., Tan, M. Y., Zhang, M. Z., 2007. The Strike-Slip Structure in the East of Jiyang Depression. *Petroleum Geophysics*, (1): 50—54, 58 (in Chinese with English abstract).
- Huang, C., Yu, C. H., Zhang, G. L., et al., 2013. Cenozoic Dextral Strike-Slip Displacement of the Middle Tan-Lu Fault Zone. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 43(3): 820—832 (in Chinese with English abstract).
- Huang, L., Wang, Y. B., Wu, Q., et al., 2012. Cenozoic Tectonic Evolution of the Laizhouwan Sag in Bohai Bay Basin. *Acta Geologica Sinica*, 86(6): 867—876 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, J. P., 2008. Cenozoic Kinematics of the Yingkou-Weifang Fault Zone in Eastern China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(4): 57—64 (in Chinese with English abstract).
- Kopp, H., Flueh, E. R., Klaeschen, D., et al., 2001. Crustal Structure of the Central Sunda Margin at the Onset of Oblique Subduction. *Geophysical Journal International*, 147(2): 449—474. doi: 10.1046/j.0956—540x.2001.01547.x
- Kopp, H., Kopp, C., Phipps Morgan, J., et al., 2003. Fossil Hot Spot-Ridge Interaction in the Musicians Seamount Province: Geophysical Investigations of Hot Spot Volcanism at Volcanic Elongated Ridges. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B3): 2160. doi: 10.1029/2002jb002015
- Li, S. Z., Suo, Y. H., Dai, L. M., et al., 2010. Development of the Bohai Bay Basin and Destruction of the North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 17(4): 64—89 (in Chinese with English abstract).
- Li, W., 2007. Mesozoic Basin Evolution and the Exploration of the Pre-Tertiary Petroleum in the Area of Bohai Bay Basin (Dissertation). China University of Petroleum, Dongying (in Chinese with English abstract).
- Li, W., Wu, Z. P., Liu, H., 2009. Mesozoic and Cenozoic Basin Evolution and Coal-Derived Gas Accumulation of Upper Paleozoic in the Area of Bohai Bay Basin. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 16(1): 13—16 (in Chinese with English abstract).
- Li, W., Wu, Z. P., Zhao, W. D., 2010. Structural Characteristics and Basin Transformation in the Bohai Bay Basin in the Yanshan Era. *Progress in Geophysics*, 25(6): 2068—2077 (in Chinese with English abstract).
- Li, W., Wu, Z. P., Zhou, Y. Q., 2005. Reconstruction of the Thickness of the Mesozoic Strata and Mesozoic Prototype Basin in the Jiyang Depression. *Geological Review*, 51(5): 507—516 (in Chinese with English abstract).
- Lü, D. Y., Hou, D. M., Yang, Q. H., et al., 2011. A Study on Structure Origins and Hydrocarbon Accumulation Pattern in the West Part of Bonan Lower-Uplift. *China Offshore Oil and Gas*, 23(4): 229—233 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Q. R., Li, S. Y., Li, R. W., 2007. Mesozoic Evolution of the Hefei Basin in Eastern China: Sedimentary Response to Deformations in the Adjacent Dabieshan and along the Tanlu Fault. *Geological Society of America Bulletin*, 119(7—8): 897—916. doi: 10.1130/b25931.1
- Niu, C. M., 2012. Tectonic Evolution and Hydrocarbon Accumulation of Laizhouwan Depression in Southern Bohai Sea. *Oil & Gas Geology*, 33(3): 424—431 (in Chinese with English abstract).
- Northrup, C. J., Royden, L. H., Burchfiel, B. C., 1995. Motion of the Pacific Plate Relative to Eurasia and Its Potential Relation to Cenozoic Extension along the Eastern Mar-

- gin of Eurasia, *Geology*, 23(8):719.doi:10.1130/0091-7613(1995)023<0719:motppr>2.3.co;2
- Peng, W.X., Shi, H., Sun, H.F., et al., 2009a. Dextral Strike-Slip Evidence on Seismic Slice for Tanlu Strike-Slip Fault. *Oil Geophysical Prospecting*, 44(6):755—759, 783,649 (in Chinese with English abstract).
- Peng, W.X., Xin, R.C., Sun, H.F., et al., 2009b. Formation and Evolution of Laizhou Bay Sag in Bohai Bay. *Acta Petrolei Sinica*, 30(5):654—660(in Chinese with English abstract).
- Peng, W. X., Zhang, R. C., Sun, H. F., et al., 2010. Displacement of the Tanlu Fault since Paleocene and Its Influence on the Laizhou Bay Sag, Bohai Bay Basin of China. *Geotectonica et Metallogenesis*, 34(4):585—592(in Chinese with English abstract).
- Qi, J.F., 2004. Two Tectonic Systems in the Cenozoic Bohai Bay Basin and their Genetic Interpretation. *Chinese Geology*, 31(1):15—22 (in Chinese with English abstract).
- Qi, J.F., Zhou, X.H., Wang, Q.S., 2010. Structural Model and Cenozoic Kinematics of Tan-Lu Deep Fracture Zone in Bohai Sea Area. *Geology in China*, 37(5):1231—1242 (in Chinese with English abstract).
- Qi, J.F., Deng, R.J., Zhou, X.H., et al., 2008. Structural Characteristics of the Tan-Lu Fault Zone in Cenozoic Basins Offshore the Bohai Sea. *Science in China (Ser. D)*, 38(Suppl.1):19—29 (in Chinese).
- Ren, J.Y., 2004. Tectonic Significance of S_(6') Boundary in Dongying Depression, Bohai Gulf Basin. *Earth Science*, 29(1):69—76,92 (in Chinese with English abstract).
- Shan, J.Z., Zhang, Z.W., Sun, H.J., et al., 2004. Modeling Experiments of Generation Mechanism of Yingkou-Tongerbu Fracture Zone in the Liaohe Depression. *Petroleum Exploration and Development*, 31(1):15—17 (in Chinese with English abstract).
- Song, G.Q., 2006. Magnetotelluric Depth Sounding Sections of Tan-Lu Fault Zone and Its Crustal Structure in Shandong, Jiangsu and Anhui Provinces. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 13(6):1—4(in Chinese with English abstract).
- Steinberger, B., Sutherland, R., O'Connell, R. J., 2004. Prediction of Emperor-Hawaii Seamount Locations from a Revised Model of Global Plate Motion and Mantle Flow. *Nature*, 430(6996):167—173.doi:10.1038/nature02660
- Sun, H.F., Zhou, X. H., Peng, W. X., et al., 2011. Late-Stage Hydrocarbon Accumulation and Enrichment in the Huanghekou Sag, Southern Bohai Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 38(3):307—313(in Chinese with English abstract).
- Sun, X.M., Wang, S.Q., Wang, Y.D., et al., 2010. The Structural Feature and Evolutionary Series in the Northern Segment of Tancheng-Lujiang Fault Zone. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1):165—176(in Chinese with English abstract).
- Suo, Y.H., Li, S.Z., Xu, L.Q., et al., 2015. Cenozoic Structural Evolution and Prototype Basin of the Great Qikou Sag, the Bohai Bay Basin. *Chinese Journal of Geology*, 50(2):473—488(in Chinese with English abstract).
- Tang, L.J., Chen, X. Y., Zhou, X. H., et al., 2011. Structural Analysis of Tan-Lu Fault Zone in the Bohai Sea. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 33(1):170—176(in Chinese with English abstract).
- Tong, H.M., Mi, R.S., Yu, T.C., et al., 2008. The Strike-Slip Tectonics in the Western Liaohe Depression, Bohai Bay Basin. *Acta Geologica Sinica*, 82(8): 1017—1026 (in Chinese with English abstract).
- Wan, G. M., Tang, L. J., Zhou, X. H., et al., 2010. Neogene-Quaternary Fault Characteristics and Its Formation Mechanism in Bohai Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 31(4): 591—595(in Chinese with English abstract).
- Wan, T. F., Zhu, H., 2002. Tectonics and Environment Change of Meso-Cenozoic in China Continent and Its Adjacent Areas. *Geoscience*, 16(2):107—120(in Chinese with English abstract).
- Wang, G.C., 1998. Relationship of Tanlu Fault to the Inversion and Flower Structures in Bohai Bay. *China Offshore Oil And Gas (Geology)*, (5):1—7 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Xu, Y. G., Gao, S., et al., 2008. Lithospheric Thinning and Destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6):1145—1174(in Chinese with English abstract).
- Wu, G.Q., Lü, X.X., Zhou, X.H., et al., 2013. Response of Cenozoic Tan-Lu Fault Activity in Laizhou Bay Area, Bohai Sea. *Petroleum Geology and Experiment*, 35(4): 407—413(in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. P., Hou, X. B., Li, W., 2007. Discussion on Mesozoic Basin Patterns and Evolution in the Eastern North China Block. *Geotectonica et Metallogenesis*, 31(4):385—399(in Chinese with English abstract).
- Xu, C.G., 2016. Strike-Slip Transfer Zone and Its Control on Formation of Medium and Large-Sized Oilfields in Bohai Sea Area. *Earth Science*, 41(9):1548—1560(in Chinese with English abstract).
- Xu, L.Q., Li, S.Z., Suo, Y.H., et al., 2015. Fault System and Basin Prototype of the Great Qikou Sag, Bohai Bay Basin. *Chinese Journal of Geology*, 50(2):489—502 (in Chinese with English abstract).

- Xu, Y.D., Liu, Z.Q., 2006. Strike-Slip Tectonic Characteristics of Yingwei Fault Zone. *Journal of Oil and Gas Technology*, 28(6): 12–15 (in Chinese with English abstract).
- Yan, L.J., 2013. Neotectonic Active Characteristics and Dynamic Mechanism of the Shandong Segment of the Tan-Lu Fault Zone (Dissertation). Hefei University of Technology, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M.Z., Fu, J.P., Yin, X.Y., 2006. Characters of Strike-Slip and Extrusion Structure in Zhuanghai Region. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 13(2): 5–7 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M.Z., Fu, J.P., Yin, X.Y., 2006. Characters of Strike-Slip and Extrusion Structure in Zhuanghai Region. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 13(2): 5–7 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Wang, L.S., Shi, H.S., et al., 2010. The Mesozoic-Cenozoic Tectonic Evolution of the Shandong Segment of the Tan-Lu Fault Zone. *Acta Geologica Sinica*, 84(9): 1316–1323 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.T., Zhou, X.H., Niu, C.M., et al., 2014. Hydrocarbon Accumulation Mode in Huanghekou Sag of Bohai Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 36(3): 30–36 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.Q., Dong, S.W., 2008. Mesozoic Tectonic Evolution History of the Tan-Lu Fault Zone, China: Advances and New Understanding. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1371–1390 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, B., Deng, Z.H., Chao, H.T., et al., 2008. Strike-Slip Tectonic Characteristics, Evolution and Dynamic Mechanism of Yingwei Fault Zone. *Northwestern Seismological Journal*, 30(2): 117–123 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, W.W., Wang, W.F., An, B., et al., 2014. Identification of Potential Fault Zones and Its Geological Significance in Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 39(11): 1627–1638 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Niu, M.L., Xie, C.L., et al., 2010. Sinistral to Normal Faulting along the Tan-Lu Fault Zone: Evidence for Geodynamic Switching of the East China Continental Margin. *The Journal of Geology*, 118(3): 277–293. doi: 10.1086/651540
- Zhu, G., Wang, D.X., Liu, G.S., et al., 2001. Extensional Activities along the Tan-Lu Fault Zone and Its Geodynamic Setting. *Chinese Journal of Geology*, 36(3): 269–278 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Wang, Y.S., Niu, M.L., et al., 2004. Synorogenic Movement of the Tan-Lu Fault Zone. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 169–182 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Wang, Y.S., Liu, G.S., et al., 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Strike-Slip Motion on the Tan-Lu Fault Zone, East China. *Journal of Structural Geology*, 27(8): 1379–1398. doi: 10.1016/j.jsg.2005.04.007
- Zhu, G., Xu, Y.D., Liu, G.S., et al., 2006. Structural and Deformational Characteristics of Strike-Slippings along the Middle-Southern Sector of the Tan-Lu Fault Zone. *Chinese Journal of Geology*, 41(2): 226–241, 255 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X.X., Lü, X.X., Wang, D.Y., et al., 2009. Controlling Effect of a Strike-Slip Transform Belt on Hydrocarbon Accumulations in the Huanghekou Sag, the Bohai Sea Waters. *Oil & Gas Geology*, 30(4): 476–482 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 蔡东升,罗毓晖,武文来,等,2001.渤海浅层构造变形特征、成因机理与渤中坳陷及其周围油气富集的关系.中国海上油气(地质),15(1):35–43.
- 陈洁,2004.济阳孔店构造转型期沉积盆地的特征及勘探意义.地球物理学进展,19(2):392–398.
- 陈书平,吕丁友,王应斌,等,2010.渤海盆地新近纪—第四纪走滑作用及油气勘探意义.石油学报,31(6):894–899.
- 邓运华,2004.张一扭断裂与油气运移分析——以渤海油区为例.中国石油勘探,9(2):33–37.
- 丁增勇,王良书,钟锴,等,2008.渤海湾盆地新生界残留地层分布特征及其构造意义.高校地质学报,14(3):405–413.
- 傅强,刘彬彬,徐春华,等,2013.渤海湾盆地黄河口凹陷构造定量分析与油气富集耦合关系.石油学报,34(z2):112–119.
- 侯贵廷,2014.渤海湾盆地地球动力学.北京:科学出版社.
- 侯贵廷,钱祥麟,蔡东升,2000.渤海中、新生代盆地构造活动与沉积作用的时空关系.石油与天然气地质,21(3):201–206.
- 侯贵廷,钱祥麟,蔡东升,2001.渤海湾盆地中、新生代构造演化研究.北京大学学报:自然科学版,37(6):845–851.
- 侯明金,朱光,Mercier, J.,等,2007.郯庐断裂带(安徽段)及邻区的动力学分析与区域构造演化.地质科学,42(2):362–381.
- 胡惟,朱光,严乐佳,等,2014.郯庐断裂带中段地震活动性与深部地壳电性结构关系的探讨.地质论评,60(1):80–90.
- 胡贤根,谭朋友,张明振,2007.济阳坳陷东部走滑构造形成机制.油气地球物理,(1):50–54, 58.
- 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.吉林大学学报:地球科学版,43(3):820–832.
- 黄雷,王应斌,武强,等,2012.渤海湾盆地莱州湾凹陷新生代盆地演化.地质学报,86(6):867–876.

- 姜建平,2008.营口—潍坊断裂带新生代运动学特征.海洋地质与第四纪地质,28(4):57—64.
- 李三忠,索艳慧,戴黎明,等,2010.渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏.地学前缘,17(4):64—89.
- 李伟,2007.渤海湾盆地区中生代盆地演化与前第三系油气勘探(博士学位论文).东营:中国石油大学.
- 李伟,吴智平,刘华,2009.中、新生代渤海湾盆地区演化与上古生界煤成气成藏.油气地质与采收率,16(1):13—16.
- 李伟,吴智平,赵文栋,2010.渤海湾盆地区燕山期构造特征与盆地转型.地球物理学进展,25(6):2068—2077.
- 李伟,吴智平,周璠琪,2005.济阳坳陷中生代地层剥蚀厚度、原始厚度恢复及原型盆地研究.地质论评,51(5):507—516.
- 吕丁友,侯东梅,杨庆红,等,2011.渤南低凸起西段构造成因机制与油气成藏规律研究.中国海上油气,23(4):229—233.
- 牛成民,2012.渤海南部海域莱州湾凹陷构造演化与油气成藏.石油与天然气地质,33(3):424—431.
- 彭文绪,张如才,孙和风,等,2010.古新世以来郯庐断裂的位移量及其对莱州湾凹陷的控制.大地构造与成矿学,34(4):585—592.
- 彭文绪,史浩,孙和风,等,2009a.郯庐走滑断层右旋走滑的地震切片证据.石油地球物理勘探,44(6):755—759,783,649.
- 彭文绪,辛仁臣,孙和风,等,2009b.渤海海域莱州湾凹陷的形成和演化.石油学报,30(5):654—660.
- 漆家福,2004.渤海湾新生代盆地的两种构造系统及其成因解释.中国地质,31(1):15—22.
- 漆家福,周心怀,王谦身,2010.渤海海域中郯庐深断裂带的结构模型及新生代运动学.中国地质,37(5):1231—1242.
- 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.中国科学:D辑,(S1):19—29.
- 任建业,2004.渤海湾盆地东营凹陷 S_(6') 界面的构造变革意义.地球科学,(1):69—76,92.
- 单家增,张占文,孙红军,等,2004.营口—佟二堡断裂带成因机制的构造物理模拟实验研究.石油勘探与开发,31(1):15—17.
- 宋国奇,2006.郯庐断裂带鲁苏皖段大地电磁测深剖面与地壳结构.油气地质与采收率,13(6):1—4.
- 孙和风,周心怀,彭文绪,等,2011.渤海南部黄河口凹陷晚期成藏特征及富集模式.石油勘探与开发,38(3):307—313.
- 孙晓猛,王书琴,王英德,等,2010.郯庐断裂带北段构造特征及构造演化序列.岩石学报,26(1):165—176.
- 索艳慧,李三忠,许立青,等,2015.渤海湾盆地大歧口凹陷新生代构造演化与盆地原型.地质科学,50(2):473—488.
- 汤良杰,陈绪云,周心怀,等,2011.渤海海域郯庐断裂带构造解析.西南石油大学学报(自然科学版),33(1):170—176.
- 童亨茂,宓荣三,于天才,等,2008.渤海湾盆地辽河西部凹陷的走滑构造作用.地质学报,82(8):1017—1026.
- 万桂梅,汤良杰,周心怀,等,2010.渤海海域新近纪—第四纪断裂特征及形成机制.石油学报,31(4):591—595.
- 万天丰,朱鸿,2002.中国大陆及邻区中生代—新生代大地构造与环境变迁.现代地质,16(2):107—120.
- 王国纯,1998.郯庐断裂与渤海海域反转构造及花状构造.中国海上油气(地质),5(5):1—7.
- 吴福元,徐义刚,高山,等,2008.华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论.岩石学报,24(6):1145—1174.
- 吴国强,吕修祥,周心怀,等,2013.新生代郯庐断裂活动在莱州湾地区的响应.石油实验地质,35(4):407—413.
- 吴智平,侯旭波,李伟,2007.华北东部地区中生代盆地格局及演化过程探讨.大地构造与成矿学,31(4):385—399.
- 徐佑德,柳忠泉,2006.郯庐断裂带营滩段走滑断裂特征.石油天然气学报,28(6):12—15.
- 徐长贵,2016.渤海走滑转换带及其对大中型油气田形成的控制作用.地球科学,41(9):1548—1560.
- 许立青,李三忠,索艳慧,等,2015.渤海湾盆地大歧口凹陷断裂系统与陆内拉分断陷.地质科学,50(2):489—502.
- 严乐佳,2013.郯庐断裂带山东段新构造活动特征与动力学机制(硕士学位论文).合肥:合肥工业大学.
- 张明振,付瑾平,印兴耀,2006.桩海地区的走滑和挤压构造特征.油气地质与采收率,13(2):5—7.
- 张鹏,王良书,石火生,等,2010.郯庐断裂带山东段的中新生代构造演化特征.地质学报,84(9):1316—1323.
- 张新涛,周心怀,牛成民,等,2014.渤海湾盆地黄河口凹陷油气成藏模式.石油天然气学报,36(3):30—36.
- 张岳桥,董树文,2008.郯庐断裂带中生代构造演化史:进展与新认识.地质通报,27(9):1371—1390.
- 周斌,邓志辉,晁洪太,等,2008.营滩断裂带走滑构造特征、演化及动力学机制.西北地震学报,30(2):117—123.
- 周维维,王伟峰,安邦,等,2014.渤海湾盆地隐性断裂带识别及其地质意义.地球科学,39(11):1627—1638.
- 朱光,王道轩,刘国生,等,2001.郯庐断裂带的伸展活动及其动力学背景.地质科学,36(3):269—278.
- 朱光,王勇生,牛漫兰,等,2004.郯庐断裂带的同造山运动.地学前缘,11(3):169—182.
- 朱光,徐佑德,刘国生,等,2006.郯庐断裂带中—南段走滑构造特征与变形规律.地质科学,41(2):226—241,255.
- 朱秀香,吕修祥,王德英,等,2009.渤海海域黄河口凹陷走滑转换带对油气聚集的控制.石油与天然气地质,30(4):476—482.