

平衡剖面方法在伸展、走滑作用叠加、 配比关系分析中的应用

——以渤海海域辽东湾拗陷为例

李伟^{1,2)}, 郭甜甜^{1,2)}, 吴智平^{1,2)}, 徐长贵³⁾, 吴奎³⁾, 陈兴鹏^{1,2)}, 幽鹏飞^{1,2)}, 郭睿鹏^{1,2)}

1) 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛, 266580;

2) 深层油气地质与地球物理教育部重点实验室, 中国石油大学(华东), 山东青岛, 266580;

3) 中海石油(中国)有限公司 天津分公司, 天津, 300452

内容提要: 新生代辽东湾拗陷处于伸展和走滑作用的共同控制之下,二者强弱关系的变化导致了复杂的叠加、配比关系,本文利用平衡剖面方法,选取了不同地区垂直和平行于主干断裂的两个方向地质剖面进行了平衡剖面的恢复和伸展率的计算,进而探讨了辽东湾拗陷新生代各演化阶段伸展、走滑作用的叠加配比关系,结果表明:始新统孔店组—渐新统沙河街组四段、三段沉积期,辽东湾拗陷以伸展作用为主,走滑作用相对较弱;沙河街组二段—沙河街组一段沉积期表现为弱伸展、弱走滑;渐新统东营组沉积期转变为强走滑、弱伸展,辽中—辽东地区走滑作用强于辽西地区,而伸展作用辽西强于辽中—辽东地区;新近纪—第四纪,辽东湾拗陷伸展和走滑作用均相对较弱,整体拗陷。不同时期伸展和走滑作用的叠加、配比关系控制了辽东湾拗陷构造格局、构造样式的时空差异。本文所提出的理论和方法适用于中国东部多数伸展和走滑作用共同控制的盆地类型,尤其针对主走滑断裂附近发育相当数量走滑派生次级断裂的情况结果更为准确。

关键词: 伸展、走滑作用;叠加、配比关系;平衡剖面;辽东湾拗陷;新生代

辽东湾拗陷位于渤海海域东北部,其南北两端分别与渤中—渤东凹陷和下辽河拗陷相接,东西两侧为胶辽和燕山隆起区,整体呈 NNE 向长条状展布,是渤海湾盆地陆上下辽河拗陷的海域延伸(图1; 吴奎,2009; Qi Jiafu and Yang Qiao, 2010; 徐长贵等,2015; 吴智平等,2016)。新生代辽东湾拗陷所在的渤海海域在太平洋板块俯冲、印度—亚洲大陆碰撞的远程效应、深部地幔上涌、郯庐断裂带走滑等共同作用控制和影响之下(漆家福等,1995,2013; 漆家福,2004; 李三忠等,2013; 吴智平等,2013; 侯贵廷,2001; Dmitrienko et al., 2017)。古新世—早始新世太平洋板块 NNW 向低速俯冲于亚欧大陆之下,印度板块向亚欧大陆高速俯冲,导致中国大陆软流圈蠕散,岩石圈发生减薄;中始新世,印度板块和太平洋板块俯冲速度降低,板块作用减弱,华北地区发生地幔上涌,发生裂陷伸展(漆家福等,1995; Gilder et al., 1999; Zhu Guang et al., 2012)。晚始新世—渐新世,太平洋板块的俯冲方向由 NNW 向转为 NWW

向俯冲(Koppers et al., 2001, 2003; Steinberger et al., 2004),同时印度板块对欧亚大陆板块的俯冲对华北板块施加 NE 向的挤压应力,华北板块向东逃逸,在二者共同作用之下,郯庐断裂带转为右旋走滑运动(Hsiao et al., 2004)。渐新世日本海大规模打开,青藏高原原急剧隆起,末期发生的喜山Ⅱ幕构造运动,使渤海湾地区地壳大范围上升,并使渐新世地层受到程度不等的剥蚀和轻微褶皱。进入新近纪,在岩石圈的松弛收缩及重力均衡调整作用下,渤海海域整体进入区域性拗陷阶段,太平洋板块俯冲速率加快(张鹏等,2007; 包汉勇等,2013),并导致弧后扩张和弧后盆地的发育对中国东部大陆产生向西的推挤力,郯庐断裂带转为右旋压扭活动,在走滑作用影响下,浅层形成大量小断层(万桂梅等,2009; 漆家福等,2010)。

整体而言,走滑和伸展作用是辽东湾拗陷新生代构造发育演化的两大主要动力机制,其内部构造性质也是如此。但是,学者们逐渐注意到这两大动

注:本文为国家科技重大专项项目(编号:2016ZX05006-007)和国家油气重大专项项目(编号:2016ZX05024-002-001)的成果。

收稿日期:2019-02-23; 改回日期:2019-09-19; 责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.06.016

作者简介:李伟,男,1978年生,博士,副教授,主要从事含油气盆地构造分析研究; Email: liwei780923@163.com。

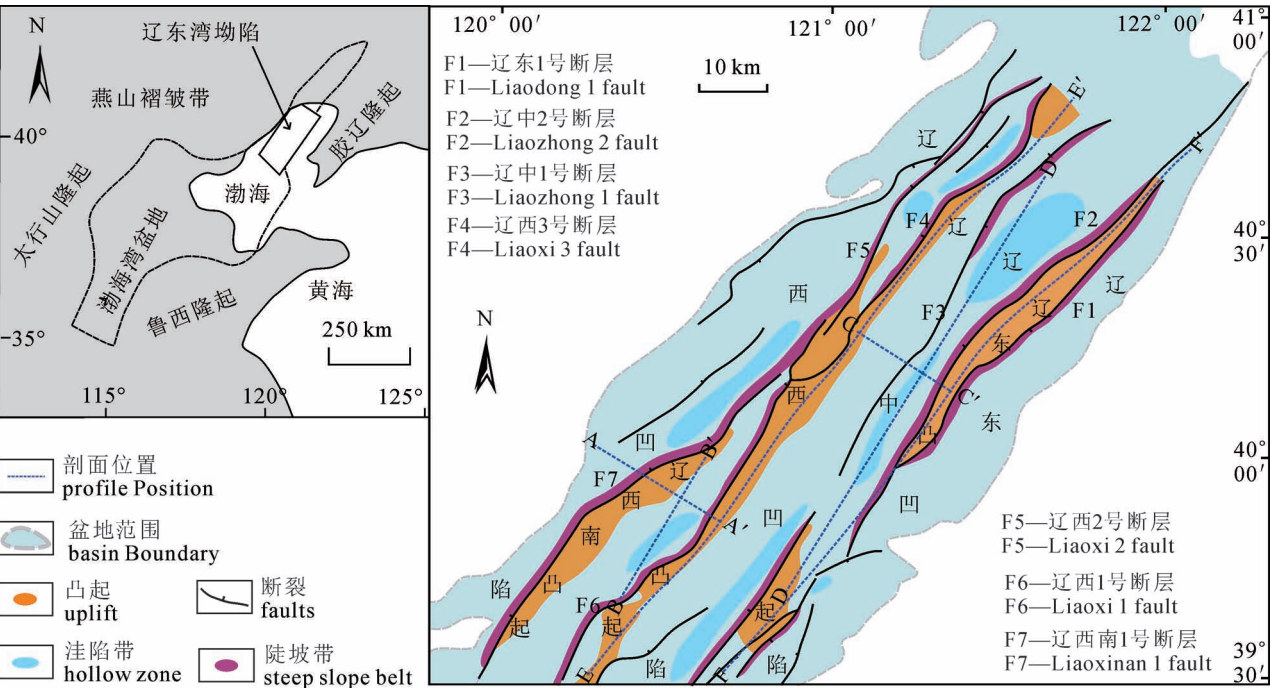


图 1 辽东湾坳陷构造单元及区域位置平面图(据余一欣等,2014 和李伟等,2015 修改)

Fig. 1 Tectonic units and regional locations of the Liaodong Bay depression (modified after Yu Yixin et al., 2014& and Li Wei et al., 2015&)

力机制在时间和空间上存在着复杂的强弱变化,而不是一成不变的,并由此导致了盆地内部不同地质阶段、不同地区断裂体系、构造样式、盆地结构的差异(余一欣等,2011,2014;徐长贵等,2015;李伟等,2015,2016;吕丁友等,2018)。但是目前的研究和认识多是基于现今构造特征的定性推测,或是基于区域构造背景的总结归纳,而缺乏运动学方面定量的深入探讨。

平衡原理最早由 Chamberlin(1910)应用于估算滑脱面的深度,此后 Bally 等(1966)编制了加拿大洛基山脉第一批平衡剖面,Dahlstrom(1969,1970)首次详细讨论了平衡剖面的概念,并提出了剖面平衡的层长一致和构造特定性准则;Elliott(1983)明确提出了剖面平衡的两个检验准则,可接受性和合理性原则;Gibbs(1983)首次把平衡剖面技术引入张性地区的构造恢复。20 世纪 90 年代以来,国内学者陆续将其应用于盆地构造演化研究,在伸展断陷盆地亚分辨断层的预测(漆家福等,2002)、检验构造解释的合理性(肖维德和唐贤君,2014)、构造变形速率(张明山和陈发景,1998;陈竹新等,2005)、恢复构造演化史(张荣强等,2008;李伟等,2010;张建培等,2012)、张性盆地伸展系数求取(包汉勇等,

2013)、多期次不平衡剥蚀(汤济广等,2006)、古构造应力场(佟彦明和钟巧霞,2007)等方面取得了长足的应用,也展现了该方法在地质学研究领域具有广泛的适用性。

本文以辽东湾坳陷为例,提出了一种在震害资料详细分析解释的基础上,利用平衡剖面技术定量表征伸展、走滑作用叠加配比关系的方法,并针对辽东湾坳陷进行了应用,明确了新生代不同构造演化阶段伸展、走滑作用的强弱关系与时空差异。通过本文的研究,可以为进一步明确辽东湾坳陷乃至整个渤海海域的构造演化过程、成因机制,也可以为进一步的油气成藏主控因素、富集规律研究提供借鉴。

1 辽东湾坳陷构造及地层发育特征

辽东湾坳陷内部地层发育较全,其中太古宇、元古宇、古生界和中生界构成了新生代盆地基底(李德江等,2007;吕丁友等,2009;贾楠等,2015)。而新生代地层发育较为齐全,包括始新统孔店组(E_2k)、渐新统沙河街组(E_3s)和东营组(E_3d),中新统馆陶组(N_1g)、中新统一上新统明化镇组($N_{1-2}m$)和更新统系平原组(Qp)(余一欣等,2013;徐长贵等,2015),整体为一套陆相断陷—坳陷型河流—三角

洲—湖相沉积(王祥等,2011)。依据钻井岩芯、录测井及地震反射特征,可以在新生界识别出 T8(新生界底界面)、T6(沙三段底界)、T5(沙二段底界)、T3(东营组底界)、T2(新近系底界)等区域或局部角度不整合,代表了区域或局部的构造转型事件,可以用来划分构造演化阶段(图 2)。就新生代残留地层展布而言,内部不同凹陷地层沉积差异明显,最厚的辽中凹陷可达 6000 余米,地层发育全;而在东部的辽东凹陷则整体缺失孔店组和沙河街组三、四段,沉积厚度较薄;西侧的辽西凹陷、辽西南凹陷地层发育较全,但厚度明显小于辽中凹陷。

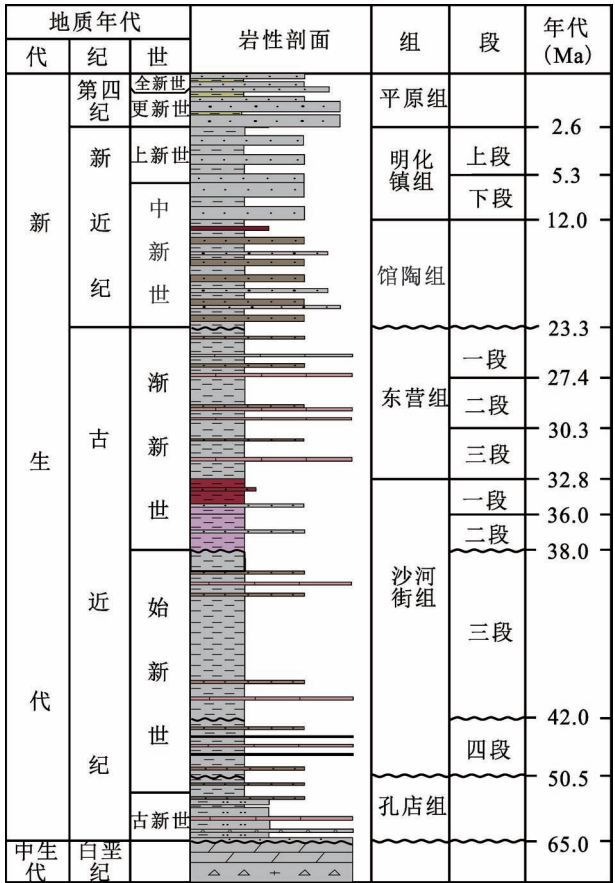


图 2 辽东湾拗陷新生代地层综合柱状图
(据贾楠等,2015 和徐长贵等,2015 修改)

Fig. 2 Comprehensive strata log diagram of Cenozoic in the Liaodong Bay Depression (modified after Jia Nan et al., 2015& and Xu Changgui et al., 2015&)

断裂是辽东湾拗陷最为重要的也是最为普遍发育的构造形迹,包括走滑、伸展和伸展—走滑复合断裂等(余一欣等,2011;徐长贵等,2014),通过对三维连片处理资料平面和剖面特征的详细分析解释,在辽东湾拗陷自东向西可以识别出辽东 1 号、辽中

2 号、辽中 1 号、辽西 3 号、辽西 2 号、辽西 1 号、辽西南 1 号 7 条主干断裂,整体而言,这些主干断裂均具有一定的走滑特征,但是其走滑强度具有“东强西弱”的差异(龚德瑜,2012;王应斌和黄雷,2013;余一欣等,2014,2017);此外,辽东湾地区主干断裂中伸展性质为主的断裂常被走滑性质为主的断裂切割改造,如断面较缓、伸展性质的辽中 2 号断裂南段被辽中 1 号和辽东 1 号断裂切割,辽西地区的辽西南 1 号断裂被斜坡上的走滑断裂切割。除了 NNE 向展布的主干断裂之外,辽东湾地区还发育大量次级断裂,这些断裂数量众多,多为 NE、NEE 和近 EW 向。其中二级断裂多为 NE(E) 向伸展性质断裂,对孔店组、沙河街组地层沉积控制作用明显,主要发育在辽东湾拗陷辽东、辽西地区,辽中地区数量少,垂直于 NEE 向二级断层的地震测线剖面上表现为一系列伸展半地堑,体现了早期伸展作用对盆地的控制作用。三级及以下级别断裂数量最多,尤其在浅层极为发育,深层数量较少,在平面上多呈雁列式展布或与主干断裂形成帚状断裂组合,在辽中、辽东地区最为普遍(图 3),前人研究认为,这些雁列和帚状断裂组合多为先存断裂在走滑作用下复活或走滑派生作用所致(Cunningham, 2007; Haakon Fossen, 2016)。根据主干断裂发育特征及凹凸格局,可以将辽东湾拗陷划分为“三凹夹三凸”的构造格局,自西向东为辽西凹陷、辽西南凸起、辽西凸起、辽中凹陷、辽东凸起、辽东凹陷(余一欣等,2014;徐长贵等,2014,2015;李伟等,2015;任健等,2015;Cheng Yanjun et al.,2015;柳永军,2016)。

2 平衡剖面恢复

2.1 平衡剖面的恢复原理及方法

平衡剖面的基本准则是物质守恒定律:岩石在变形前后物质总量保持不变,根据这个基本准则,可以提出三个具体准则:层长守恒、面积守恒和体积守恒。平衡剖面的制作过程通常采用反演法,即从现今地质剖面出发,最终得出剖面变形前的状态。其制作过程可以分为地质剖面选择、地震剖面构造解释、地质剖面构建、压实校正与剥蚀恢复、平衡剖面计算、平衡恢复结果分析 6 个阶段(肖维德和唐贤君,2014)。

其中,地质剖面的选取是平衡剖面恢复前提与关键,目前多选取垂直于构造带走向的剖面(李伟等,2010)。但就辽东湾拗陷而言,其主干断裂在新生代表现为伸展、走滑复合性质,伸展作用主要表现

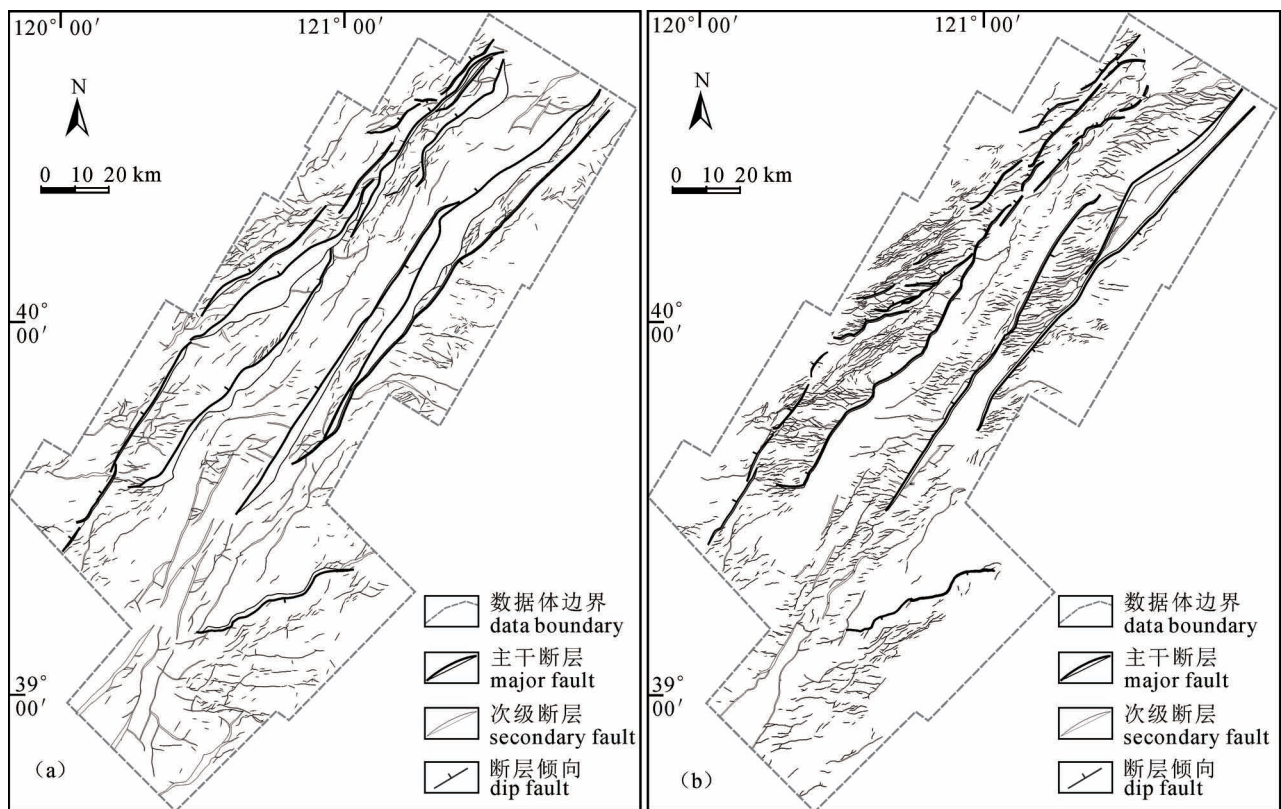


图 3 辽东湾坳陷断裂平面展布图：(a) 新生界底界面断裂平面展布；(b) 东营组底界面断裂平面展布
Fig. 3 Fault plane distribution in the Liaodong Bay depression；(a) plane distribution of faults at the bottom of Cenozoic；
(b) plane distribution of faults at the bottom of the Dongying Formation

在与断层垂直的 NW 方向,走滑作用则主要表现平行于断层的 NE 方向。由于主干断裂的走滑作用,在其附近大多派生出伸展作用,即走滑变形转换为伸展变形(李伟等,2015,2018),这种由走滑作用所派生出的伸展作用其方向与主干断裂平行,产生的派生断层多为近 EW、NNW 走向,数量多,多发育于主干断裂一侧(图 3),体现了走滑作用的强度,前人也提出了通过走滑断裂附近派生雁列式正断层的累计水平断距(伸展变形量)的统计分析来计算走滑位移量的方法(童亨茂等,2008;李伟等,2018)。正是基于以上考虑并借鉴前人研究成果,本文在地质剖面选取时选择了 NW 和 NE 两个方向,其中 NW 向剖面垂直于主干断裂和主要构造带,主要反映主干断裂的伸展作用;而 NE 向剖面垂直于走滑派生次级断裂,主要反映走滑派生次级断裂的伸展作用,间接可以体现主走滑断裂走滑作用的强弱。为了进一步对比不同辽西、辽中—辽东地区的差异,本文分别在两个地区选取了两个方向的四条地震剖面。在

选取了合适的地震剖面后,对其进行了构造、地层解释及时深转换,从而得到了现今变形后的地质剖面。

由于研究区岩层主要为刚性的,本文运用层长守恒准则绘制平衡剖面,即假定地层厚度不变,岩层在变形后的长度和初始沉积时的长度是相同的(Dahlstrom,1969)。在同沉积伸展盆地的平衡剖面恢复过程中,需进行去压实校正。本文采用的 Geosec 软件提供了去压实校正功能,去压实过程中所需要的层速度数据由中海油天津分公司渤海石油研究院提供(表 1)。地层剥蚀在辽东湾坳陷新生代主要发生在东营组沉积末期,本文主要采用了构造横剖面法(厚度趋势法)(周瑶琪和吴智平,2000;李伟等,2005)进行了恢复。

表 1 辽东湾坳陷新生界各构造层层速度表
Table 1 Layer velocity of each structural layers in the Liaodong Bay depression in Cenozoic

时期	Nm	Ng	Ed	Es ₁₋₂	Es ₃	Ek—Es ₄
层速度(m/s)	1904.95	2035.84	2286.17	2350.98	2562.47	2662.71

另外一个需要注意的问题就是断层活动时间的确定,这在前人的文献中较少提及,或者没有引起大家的重视,但本文认为其非常重要。众所周知,断层切割到哪套地层并不代表该时期断层就已经开始活动,这对于古生界及更老的太古宙、元古宙地层容易区分,但就中、新生代地层内发育的断层而言,由于切割层位多、性质多样、先存断裂复活等原因,其活动时间往往难以确定,本文首先依据构造形成与发展的阶段性、统一性(漆家福等,2001)确定该时期以何种性质断层发育为主,进而针对普遍发育的伸展断层或走滑—伸展断层通过两盘地层厚度的差异、两盘地震反射特征确定:当断层两盘厚度相差不大、且地震反射轴表现为明显的被切割错断表明断层在该套地层沉积时没有活动,为后期活动所致;当断层上盘地层厚度明显大于下盘、且上盘近断层处存在杂乱或空白反射时,可以推测断层形成于该套地层沉积期。

在平衡剖面制作完成后,可以计算盆地在各地质时期不同方向上的形变率(伸展率或压缩率)(佟彦明和钟巧霞,2007),进而推测各地质时期的应力状态,分析应力强度。计算方法如下:设每条剖面某一地质时期原始长度为 L_0 ,变形后长度为 L_1 ,则形变率为 $(L_1-L_0)/L_0 \times 100\%$ (张建培等,2012;韦振权等,2018)。

2.2 平衡剖面恢复结果

根据以上方法及原则,本文利用 Geosec 软件对辽西地区和辽中地区不同方向的地震剖面进行了平衡剖面的恢复,得到了新生代各演化阶段的原始剖面(图4,图5),并计算了各演化阶段的伸展量与伸展率(图6)。由于二维剖面的局限性,反映辽东湾拗陷新生代以伸展作用为主,不同级别的伸展断层发育,但是在不同阶段、不同地区、不同方向上剖面特征和伸展率的大小存在差异,这就为本文的研究提供了可鉴之处。

3 辽东湾拗陷新生代伸展、走滑作用叠加配比关系

新生代辽东湾拗陷处于伸展和走滑作用的共同控制之下,构造变形复杂。本文依据不同性质构造作用的作用时间,分为叠加和配比两种类型,其中叠加是指不同性质的构造作用在不同时间作用于同一地质体,而配比是指不同性质构造作用在同一时间作用于同一地质体,这两种作用类型共同控制了地质体的形成演化。需要注意的是,无论是构造作用

的叠加或是配比均会存在不同性质构造作用强弱大小的差异,进而产生不同的应变特征,形成复杂多样的构造变形。而如何明确叠加、配比过程中不同性质构造作用的强弱关系是构造地质学研究的热点也是难点之一。本文基于不同方向地震测线的平衡剖面恢复与伸展量计算,为这一问题的探讨提供了依据。

3.1 Ek—Es₄沉积期

孔店组—沙四段沉积期,NW向剖面反映辽西、辽中—辽东地区主干断裂均已开始活动,对盆地构造格局和地层沉积具有明显的控制作用(图4a7、图5a7);而NE向剖面反映活动断层数量较少,甚至不活动,对地层沉积控制作用不明显(图4b7、图5b7)。剖面伸展率反映该时期NW向剖面伸展作用明显强于NE向剖面,同时辽中—辽东地区NW向剖面伸展率明显大于辽西地区(图6)。进一步结合前人研究成果,Ek—Es₄沉积期郯庐断裂处于从左旋到右旋的转型期,此时走滑作用相对较弱,运动方式可能仍以左旋走滑为主(漆家福等,2010;贾楠等,2015;Hu Panpan et al.,2018)。因此本文推测该时期辽东湾拗陷以NW向伸展作用为主,而NE向左旋走滑作用相对较弱,同时辽中—辽东地区伸展作用强于辽西地区。

3.2 Es₃沉积期

该时期基本继承了孔店组—沙四段沉积期的构造格局(图4a6、b6,图5a6、b6),主伸展方向未发生明显变化,仍然为NW向,但NW向剖面伸展率有所减小(图6),表明该时期为NW向的中等伸展。前人研究认为,中始新世以来,太平洋板块俯冲方向转为NWW向(Koppers, et al.,2001,2003;Steinberger et al.,2004),郯庐断裂带转为右旋走滑,本文计算的NE向剖面伸展率有所增大,但仍小于NW向剖面,表明该时期NE向右旋走滑作用相对较弱。

3.3 Es₂—Es₁沉积期

该时期辽西地区NW向剖面揭示主干断裂的控沉作用(图4a5),而NE向剖面未表现出明显的地层沉积厚度的横向变化(图4b5);辽中—辽东地区NW向剖面主干断层具有控沉作用,但不显著(图5a5),而NE向剖面地层厚度横向变化明显(图5b5)。就剖面伸展率而言,相比较沙三段沉积期,NW和NE向剖面伸展率均有所减小(图6),因此本文认为辽东湾拗陷该时期受NW向弱伸展、NE向右旋弱走滑的构造作用。

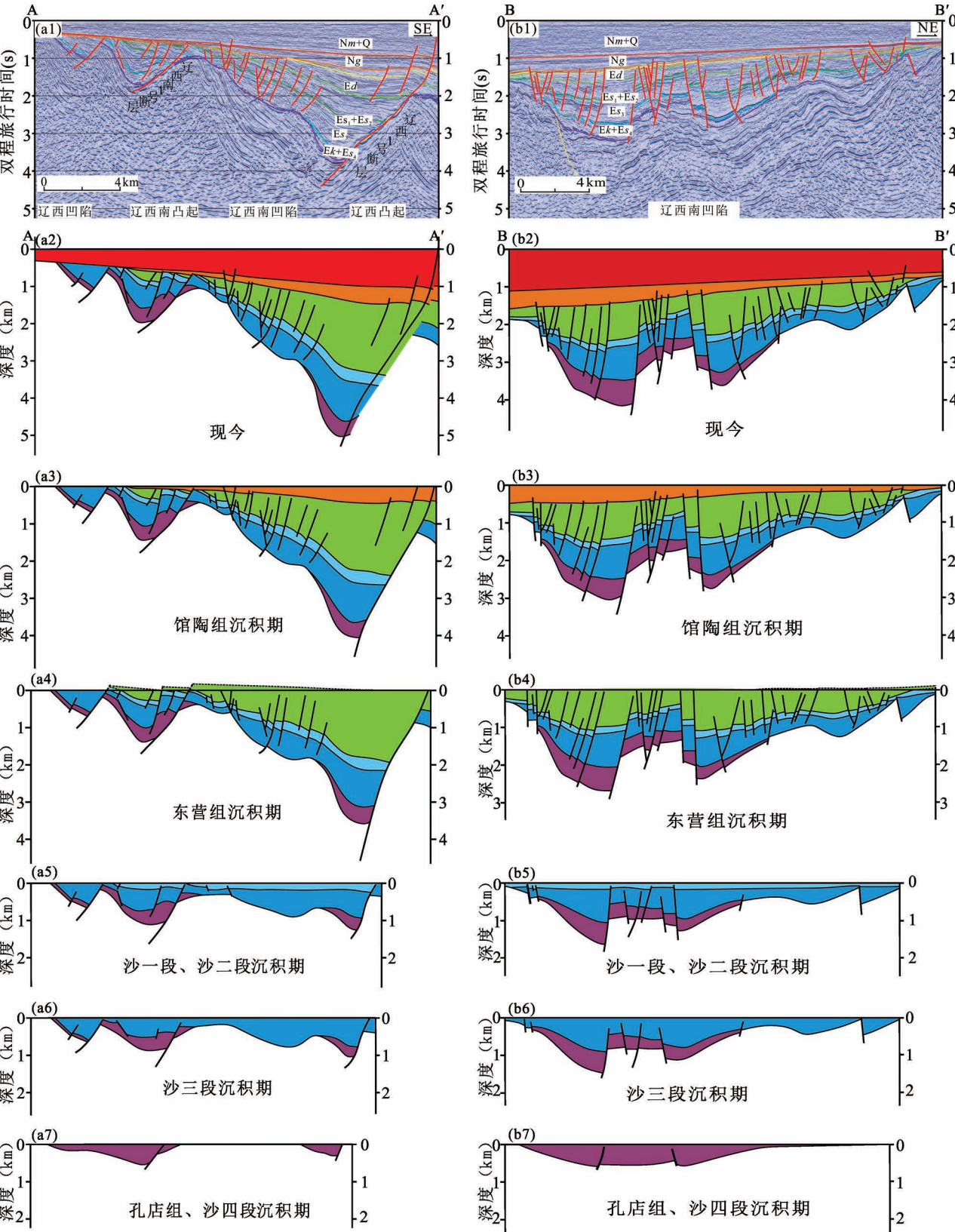


图 4 辽西地区不同方向地震剖面特征及构造演化剖面(测线位置见图 1)：
(a) 辽西地区 NW 向剖面；(b) 辽西地区 NE 向剖面

Fig. 4 Characteristics of seismic profiles and tectonic evolution profiles in different directions in Liaoxi (western Liaoning) area (see Fig. 1 for locations of profiles; (a) NW trending profile in Liaoxi area; (b) NE trending profile in Liaoxi area)

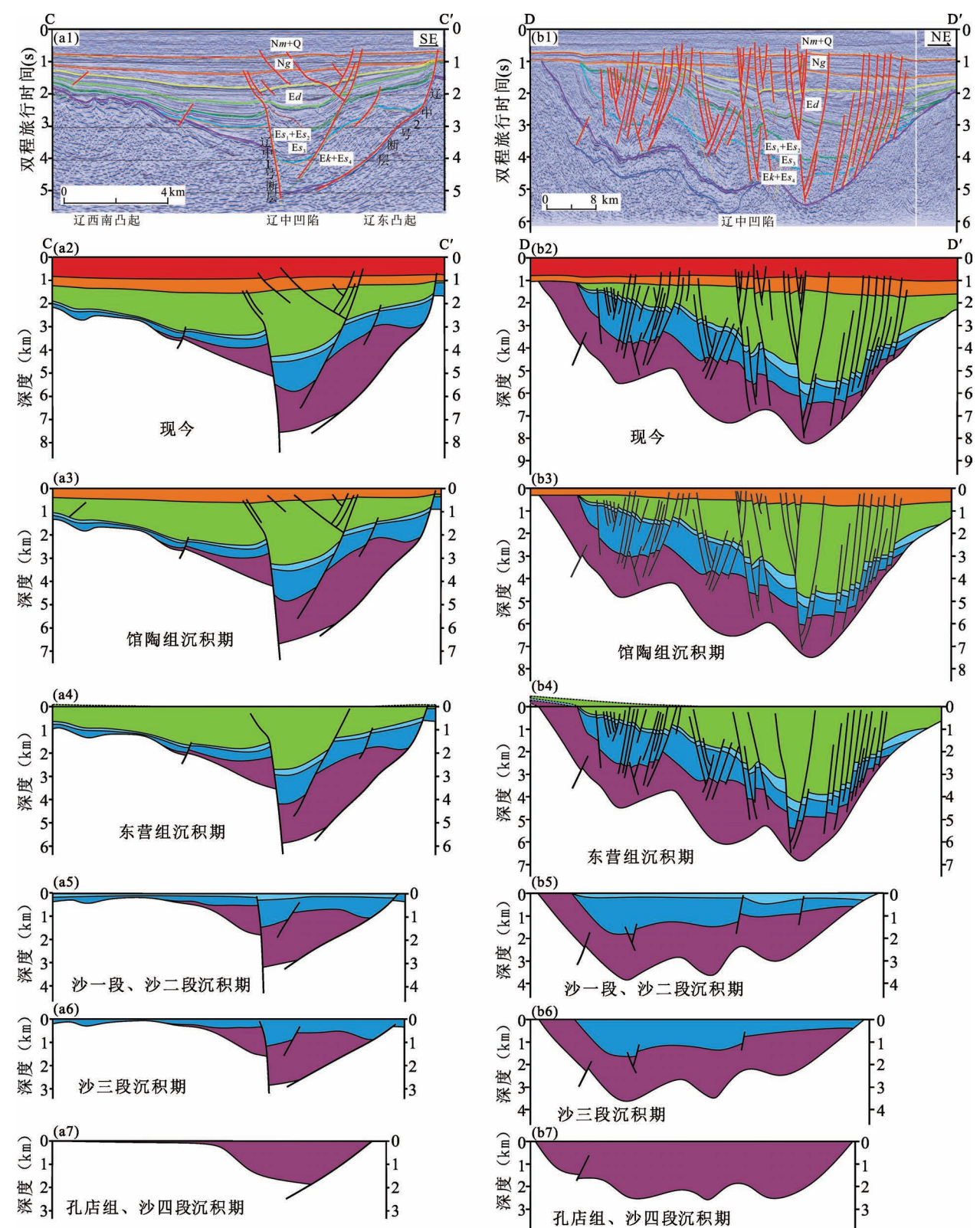


图 5 辽中—辽东地区不同方向地震剖面特征及构造演化剖面(测线位置见图 1);
(a) 辽中—辽东地区 NW 向剖面;(b) 辽中—辽东地区 NE 向剖面

Fig. 5 Characteristics of seismic profiles and tectonic evolution profiles in different directions in Liaozhong(central Liaoning) — Liaodong(eastern Liaoning) area (see Fig. 1 for locations of profiles; (a) NW trending profile in Liaozhong — Liaodong area; (b) NE trending profile in Liaodong — Liaodong area)

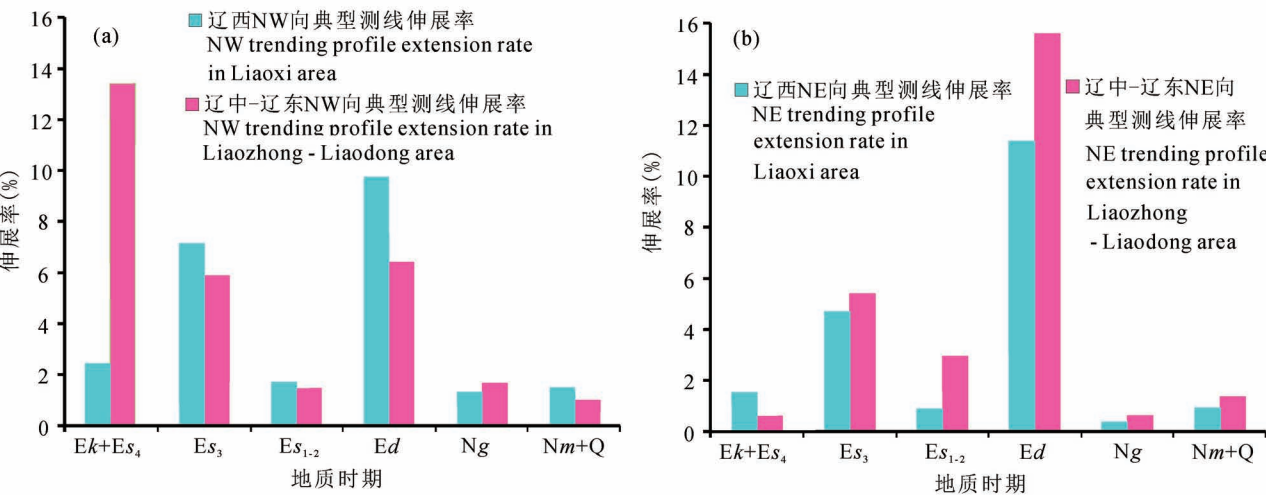


图 6 辽东湾拗陷新生代各演化阶段的伸展率直方图：(a) NW 向剖面伸展率；(b) NE 向剖面伸展率
Fig. 6 Histogram of extension rate at the different evolution stages in the Liaodong(eastern Liaoning) Bay Depression in Cenozoic: (a) NW trending profile extension rate; (b) NE trending profile extension rate

3.4 Ed 沉积期

该时期构造特征与前期发生了明显变化,首先体现在断层数量上,NE 向剖面上开始发育大量次级断层,具有明显的组系型,表现为多米诺式、多级“Y”字形组合,反映其应形成于同一构造应力场控制之下(图 4b4,图 5b4)。如前所述,NE 向剖面在反映走滑派生次级断裂的伸展作用的同时间接体现 N(N)E 向主干断裂走滑作用的强弱,因此本文认为辽西和辽中—辽东地区主干断裂右旋走滑强烈活动的时间主要在古近纪东营组沉积期。而且 NE 向剖面伸展率明显大于 NW 向剖面(图 6),因此该时期辽东湾拗陷处于 NE 右旋强走滑、NW 向弱伸展的构造作用之下。

此外,对比辽西和辽中—辽东地区可以发现,NE 向剖面反映辽中—辽东地区伸展率大于辽西地区,而 NW 向剖面结果恰好相反(图 6),表明在东营组沉积期 NE 右旋走滑作用辽中—辽东地区强于辽西地区,而 NW 向伸展作用辽西大于辽中—辽东地区。

3.5 新近纪—第四纪

新近纪—第四纪,辽东湾拗陷整体表现为披覆式沉积,地层厚度横向差异变化不大,活动断层数量减少(图 4b、c,图 5b、c),不同地区、不同方向剖面伸展率均相对较低,且差异不明显(图 6),表明该时期辽东湾拗陷伸展和走滑作用均相对较弱,整体拗陷。

4 讨论

相比于断层垂向活动性的计算而言,走滑位移量的估算难度较大,尤其是在盆地区或覆盖区(李伟等,2018),进而给定性分析和定量表征走滑和伸展作用的叠加、配比关系带来了困难。相较于基于现今构造特征的定性推测、或是基于区域构造背景的总结归纳而言,本文提出了一种在地震资料详细分析解释的基础上,利用平衡剖面技术分析伸展和走滑作用叠加、配比关系的方法,并针对辽东湾拗陷进行了应用,进而明确了辽东湾拗陷新生代各演化阶段伸展和走滑作用的叠加、配比关系。对比前人对渤海湾盆地辽河拗陷西部凹陷(童亨茂等,2008)、济阳拗陷西南部临南洼陷(郭兴伟等,2009)的研究成果和认识,本文得到的结论与之较为吻合,这也在一定程度上说明了该方法具有较为广泛的适用性,可以进一步推广至张扭性盆地。

受控于新生代各演化阶段伸展和走滑作用的叠加配比关系,辽东湾拗陷构造发育演化特征具有明显的时空差异性。新生代孔店组—沙四段、沙三段沉积期辽东湾拗陷以伸展作用为主,东营组沉积期则转变为强走滑、弱伸展的构造应力场,在南部的辽中南洼地区体现的尤为明显,该地区发育有典型的伸展被走滑叠加改造构造样式,古近系孔店组—沙四段及其下部地层主要受产状较缓的伸展断层控制,为典型伸展半地堑结构,而后期的走滑断裂对其

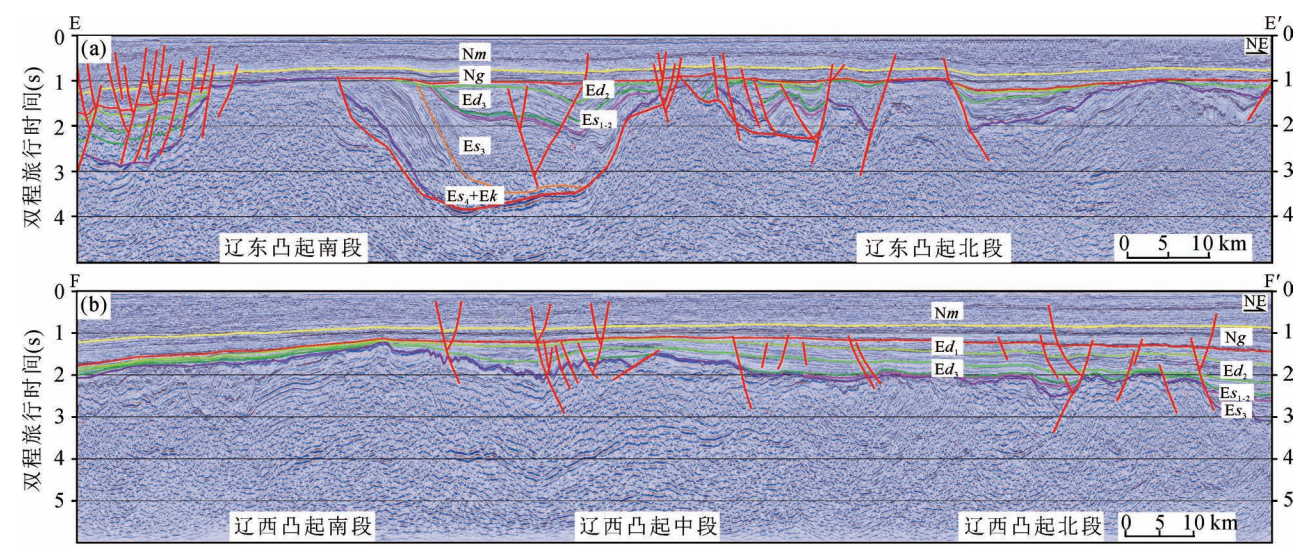


图 7 辽东湾拗陷 NE 向过凸起地震剖面(测线位置见图 1);
(a) 过辽东凸起 NE 向地震剖面;(b) 过辽西凸起 NE 向地震剖面
Fig. 7 NE seismic sections through the salient in the Liaodong (eastern Liaoning) Bay Depression (see Fig. 1 for locations of profiles): (a) NE seismic section through the Liaodong salient; (b) NE seismic section through the Liaoxi (western Liaoning) salient

进行了切割改造,体现了古近纪晚期和新近纪走滑作用对古近纪早期伸展构造的叠加改造(李伟等, 2015;吕丁友等,2018);就不同地区而言,新生代辽中—辽东地区走滑作用均强于辽西地区,而伸展作用辽西强于辽中—辽东地区,同时由于控制辽中凹陷的辽中 2 号和辽中 1 号断裂的走滑作用较强,辽西和辽东凸起的构造发育特征很好的说明了这一点,由于辽中—辽东地区走滑作用较强,加之走滑断裂的 S 形弯曲和叠覆排列,派生局部伸展和挤压应力导致了辽东凸起的整体连续性差、串珠状排列(图 7a);而西部辽西凸起主要形成于伸展作用控制之下,连续性好,地形变化平缓(图 7b)。

但是,该方法也有其适用性和局限性,具体体现在如下几个方面:①采用本文提出的方法时,首先要求研究区具备丰富的三维地震资料,因此在露头区或是勘探程度相对较低地区难以适用;此外,地质剖面的选取需要尽量避免其他地质因素的影响,尤其是在平行于主走滑断裂方向,应尽量选取主要穿过走滑派生次级断裂的剖面,而避免切到底辟构造、大型控凹(洼)断裂等,当确实难以避免时,应尽量保证这些因素的影响程度相对较小。②该方法建立在主干断层存在伸展、走滑两种运动方式的基础之上,其中对走滑作用强度的定量表征基于对走滑派生次级断裂的统计获得,因此适用于主走滑断裂附近发

育相当数量走滑派生次级断裂的情况,如渤海海域的辽东湾拗陷、渤东—庙西凹陷以及南部的黄河口凹陷、青东凹陷等;而当走滑派生次级断裂不发育或发育程度较弱时,该方法难以应用或者误差相对较大,如在郯庐断裂带西侧的济阳拗陷东部,尽管也存在走滑作用,但由于没有形成主走滑断裂、走滑派生次级断裂发育也不清晰,难以采用该方法进行研究。

③本文所提出的方法同样受限于平衡剖面方法,如在平衡平衡剖面恢复过程中基本没有考虑地层横向伸长或缩短量的影响,当该量值相对于伸展量或走滑量不能忽略时,那么必然会影响计算结果的准确性。

5 结论

(1)新生代辽东湾拗陷处于伸展和走滑作用的共同控制之下,依据不同性质应力的作用时间,分为叠加和配比两种类型,其中叠加是指不同性质的构造作用在不同时间作用于同一地质体,而配比是指不同性质构造作用在同一时间作用于同一地质体,无论是叠加或是配比均会存在不同性质构造作用强弱大小的差异,进而产生不同的应变特征,形成复杂多样的构造变形。

(2)针对伸展和走滑作用共同控制的盆地而言,平衡剖面技术可以有效地分析伸展和走滑作用

的叠加、配比关系,其关键在于选取合适的地质剖面,垂直于主干断裂的剖面主要反映主干断裂的伸展作用,垂直于走滑派生次级断裂的剖面主要反映走滑派生次级断裂的伸展作用,间接可以体现主干断裂走滑作用的强弱。

(3)新生代孔店组—沙四段、沙三段沉积期,辽东湾拗陷以伸展作用为主,走滑作用相对较弱;沙二—沙一段沉积期表现为弱伸展、弱走滑;东营组沉积期转变为强走滑、弱伸展,辽中—辽东地区走滑作用强于辽西地区,而伸展作用辽西强于辽中—辽东地区;新近纪—第四纪,辽东湾拗陷伸展和走滑作用均相对较弱,整体拗陷。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

包汉勇,郭战峰,张罗磊,黄亚平. 2013. 盆地伸展系数求取方法与评价—以苏北盆地为例. 石油实验地质, 35(3): 331 ~ 338.

陈竹新,贾东,张愷,魏国齐,李本亮,魏东涛,沈扬. 2005. 龙门山前陆褶皱冲断带的平衡剖面分析. 地质学报, 79(1): 38 ~ 45.

Dmitrienko L V,王鹏程,李三忠,曹现志,周在征,胡梦颖. 2017. 东亚大汇聚与中—新生代地球表层系统演变. 海洋地质与第四纪地质, 37(4): 37 ~ 68.

龚德瑜. 2012. 辽中凹陷油气成藏规律研究. 导师:徐国盛. 四川:成都理工大学博士学位论文: 1 ~ 136.

郭兴伟,吴智平,杨小秋,许鹤华,张志珣,施小斌,孙珍. 2009. 渤海湾盆地临南洼陷张扭构造演化及应力场数值模拟. 海洋地质与第四纪地质, 29(6): 75 ~ 82.

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.

贾楠,刘池洋,张功成,黄雷,赵俊峰,卢山. 2015. 辽东湾拗陷新生代差异抬升事件的确定及其地质意义. 地学前缘, 22(3): 77 ~ 87.

李德江,朱筱敏,董艳雷,张小静,陈建庆,孙琦,熊作为. 2007. 辽东湾拗陷古近系沙河街组层序地层分析. 石油勘探与开发, 34(6): 699 ~ 676.

李三忠,余珊,赵淑娟,刘鑫,龚淑云,索艳慧,戴黎明,马云,许忠青,曹现志,王鹏程,孙文军,杨朝,朱俊江. 2013. 东亚大陆边缘的板块重建与构造转换. 海洋地质与第四纪地质, 33(3): 65 ~ 94.

李伟,吴智平,周瑶琪. 2005. 济阳拗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.

李伟,吴智平,侯旭波,于洪洲. 2010. 平衡剖面技术在临清拗陷东部盆地分析中的应用. 油气地质与采收率, 17(2): 58 ~ 64.

李伟,任健,刘一鸣,李春锐. 2015. 辽东湾拗陷东部新生代构造发育与成因机制. 地质科技情报, 34(6): 58 ~ 64.

李伟,陈兴鹏,吴智平,张婧,任健,刘超,李春锐. 2016. 渤海海域辽中南洼压扭构造带成因演化及其控藏作用. 高校地质学报, 22(3): 502 ~ 511.

李伟,平明明,周东红,吴奎,张婧,房璐,陈兴鹏. 2018. 辽东湾拗陷新生代主干断裂走滑量的估算及其地质意义. 大地构造与成矿学, 42(3): 455 ~ 454.

柳永军,徐长贵,吴奎,张江涛,朱文森. 2016. 辽中南洼走滑反转带的形成及其对油藏的控制作用. 大庆石油地质与开发, 35(3): 16 ~ 21.

吕丁友,杨明慧,周心怀,魏刚,刘乐,李春霞,郑晓凤. 2009. 辽东湾拗陷辽西低凸起潜山构造特征与油气聚集. 石油与天然气地质, 30(4): 490 ~ 496.

吕丁友,李伟,郭睿朋,吴奎,张江涛. 2018. 辽东湾拗陷辽中南洼构造发育演化特征与成因机制. 海洋地质前沿, 34(4): 25 ~ 32.

漆家福,张一伟,陆克政,杨桥,陈发景. 1995. 渤海湾新生代裂陷盆地的伸展模式及其动力学过程. 石油实验地质, 17(4): 316 ~ 323.

漆家福,杨桥,王子煜,周建勋. 2001. 关于编制盆地构造演化剖面的几个问题的讨论. 地质论评, 47(4): 387 ~ 392.

漆家福, Groshong R H Jr, 杨桥. 2002. 用面积平衡原理预测伸展断陷盆地中岩层内部应变及亚分辨正断层的方法. 地球科学, 27(6): 696 ~ 702.

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. 渤海海域中郊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,李晓光,于福生,于天才. 2013. 辽河西部凹陷新生代构造变形及“郯庐断裂带”的表现. 中国科学:地球科学, 43(8): 1324 ~ 1337.

任健,吴智平,徐长贵,李伟,张晓庆,张婧. 2015. 辽东凸起北段新生代隆升时间的确定:来自裂变径迹的证据. 世界地质, 34(2): 408 ~ 418.

汤济广,梅廉夫,沈传波,于水明,周锋. 2006. 平衡剖面技术在盆地构造分析中的应用进展及存在的问题. 油气地质与采收率, 13(6): 19 ~ 22.

童亨茂,宓荣三,于天才,刘宝鸿,孟令箭,杨景勇. 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 ~ 1025.

佟彦明,钟巧霞. 2007. 利用平衡剖面快速判定盆地区域古构造应力方向——一种分析古构造应力方向的新方法. 石油实验地质, 29(6): 633 ~ 636.

万桂梅,汤良杰,周心怀,余一欣,陈绪云. 2009. 郯庐断裂带在渤海海域渤东地区的构造特征. 石油学报, 30(3): 342 ~ 346.

王祥,王应斌,吕修祥,范秋海. 2011. 渤海海域辽东湾拗陷油气成藏条件与分布规律. 石油与天然气地质, 32(3): 342 ~ 351.

王应斌,黄雷. 2013. 渤海海域营潍断裂带展布特征及新生代控盆模式. 地质学报, 87(12): 1811 ~ 1825.

韦振权,张莉,帅庆伟,易海,钱星,雷振宇,王衍棠. 2018. 平衡剖面技术在台湾海峡盆地西部构造演化研究中的应用. 海洋地质与第四纪地质, 38(5): 194 ~ 201.

吴奎. 2009. 辽东凸起南倾设端勘探地震研究. 导师:吴国忱. 青岛:中国石油大学硕士学位论文: 1 ~ 67.

吴智平,薛雁,颜世永,宿雯,王昕,徐长贵,周心怀. 2013. 渤海海域渤东地区断裂体系与盆地结构. 高校地质学报, 19(3): 463 ~ 471.

吴智平,张婧,任健,徐长贵,李伟,张晓庆. 2016. 辽东湾拗陷东部地区走滑双重构造的发育特征及其石油地质意义. 地质学报, 90(5): 848 ~ 856.

肖维德,唐贤君. 2014. 平衡地质剖面技术发展现状与实际应用——以苏北盆地溱潼凹陷为例. 海洋地质前沿, 30(5): 58 ~ 63.

徐长贵,余一欣,吴奎,万静,柳屿博,徐小龙,吴航. 2014. 辽东湾拗陷断裂联接及其控油气作用. 石油与天然气地质, 35(4): 456 ~ 462.

徐长贵,任健,吴智平,李伟,张婧,张晓庆. 2015. 辽东湾拗陷东部

- 地区新生代断裂体系与构造演化. 高校地质学报, 21(2): 215 ~ 222.
- 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 吕丁友, 魏刚, 王桂华. 2011. 渤海海域新生代断裂发育特征及形成机制. 石油与天然气地质, 32(2): 273 ~ 279.
- 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 魏刚, 吴奎, 张新颖, 杨克基. 2013. 渤海辽东湾坳陷金县构造变换带发育特征. 现代地质, 27(5): 999 ~ 1004.
- 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 吴奎, 柳屿博, 杨克基, 周鑫. 2014. 渤海辽东湾坳陷走滑断裂差异变形特征. 石油与天然气地质, 35(5): 632 ~ 638.
- 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 魏刚, 吕丁友. 2017. 渤海海域郯庐断裂带差异构造变形与油气聚集. 地质论评, 63(S1): 81 ~ 82.
- 张建培, 唐贤君, 张田, 张绍亮, 余逸凡. 2012. 平衡剖面技术在东海西湖凹陷构造演化研究中的应用. 海洋地质前沿, 28(8): 31 ~ 37.
- 张明山, 陈发景. 1998. 平衡剖面技术应用的条件及实例分析. 石油地球物理勘探, 33(4): 532 ~ 540.
- 张鹏, 王良书, 钟锴, 丁增勇. 2007. 郯庐断裂带的分段性研究. 地质论评, 53(5): 586 ~ 591.
- 张荣强, 吴时国, 周雁, 余朝华, 冯德勇, 于正军. 2008. 平衡剖面技术及其在济阳坳陷桩海地区的应用. 海洋地质与第四纪地质, 28(6): 135 ~ 141.
- 周瑶琪, 吴智平. 2000. 地层间断面的时间结构研究. 北京: 地质出版社.
- Bally A W, Gordy P L, Stewart G A. 1966. Structure, seismic data, and orogenic evolution of southern Canadian rocky mountains. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 15(3): 337 ~ 381.
- Bao Hanyong, Guo Zhanfeng, Zhang Luolei, Huang Yaping. 2013. Calculating methods and assessment of stretching factor: a case study of northern Jiangsu basin. Petroleum Geology & Experiment, 35(3): 331 ~ 338.
- Chamberlin R T. 1910. The Appalachian folds of central Pennsylvania. The Journal of Geology, 18(3): 228 ~ 251.
- Chen Zhuxin, Jia Dong, Zhang Qie, Wei Guoqi, Li Benliang, Wei Dongtao, Shen Yang. 2005. Balanced cross-section analysis of the fold—thrust belt of the Longmen Mountains. Journal of Geology, 79(1): 38 ~ 45.
- Cheng Yanjun, Wu Zhiping, Yan Shiyong, Xu Changgui, Li Wei, Zhang Jing, Zhang Shaochen, Ren Jian, Su Wen, Zhang Jiangtao. 2015. Cenozoic tectonic evolution of Liaodong dome, northeast Liaodong Bay, Bohai, offshore China, constraints from seismic stratigraphy, vitrinite reflectance and apatite fission track data. Tectonophysics, 659: 152 ~ 165.
- Cunningham W D, Mann P. 2007. Tectonics of strike-slip restraining and releasing bends. Geological Society, London: Special Publications, 290(1): 1 ~ 12.
- Dahlstrom C D A. 1969. Balanced cross sections. Canadian Journal of Earth Sciences, 6(4): 743 ~ 757.
- Dahlstrom C D A. 1970. Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky mountains. Bulletin of Canadian Petroleum Geologists, 18(3): 332 ~ 406.
- Dmitrienko L V, Wang Pengcheng, Li Sanzhong, Cao Xoan zhi, Zhou Zaizheng, Hu Mengying, Suo Yanhui, Guo Lingli, Wang Yongming, Li Xiyao, Liu Xin, Yu Shengyao. 2017. Meso—Cenozoic evolution of earth surface system under the east Asian tectonic super convergence. Marine Geology & Quaternary Geology, 37(4): 37 ~ 68.
- Elliott D. 1983. The construction of balanced cross-sections. Journal of Structural Geology, 15(1): 101.
- Fossen H, Rotevatn A. 2016. Fault linkage and relay structures in extensional settings—a review. Earth-Science Reviews, 154: 14 ~ 28.
- Gibbs A D. 1983. Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics. Journal of Structural Geology, 5(2): 153 ~ 160.
- Gilder S A, Leloup P H, Courtillot V, Chen Yan, Robert S, Zhao Xixi, Xiao Wenjiao, Nadir Halim, Jean-Pascal Cogné, Zhu Rixiang. 1999. Tectonic evolution of the Tancheng — Lujiang (Tan-Lu) fault via middle triassic to Early Cenozoic paleomagnetic data. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978 ~ 2012), 104 (B7): 15365 ~ 15390.
- Gong Deyu. 2012. Oil and gas accumulation in Liaozhong Sag. Tutor: Xu Guosheng, Sichuan: dissertation submitted to Chengdu University for doctoral degree: 1 ~ 136.
- Guo Xingwei, Wu Zhiping, Yang Xiaoqiu, Xu Hehua, Zhang Zhixun, Shi Xiaobin, Sun Zhen. 2009. The evolution of transtensional structure and numerical modeling of stress field, Linnan subsag, Bohai bay basin. Marine Geology & Quaternary Geology, 29(6): 75 ~ 82.
- Hou Guiting, Qian Xianglin, Cai Dongsheng. 2001. The tectonic evolution of Bohai basin in Mesozoic and Cenozoic time. Universitatis Pekinensis (Acta Scientiarum Naturalium), 37(6): 845 ~ 851.
- Hu Panpan, Yang Fengli, Wang Wei, Xu Changgui, Zhang Rucai, Hu Yuyang, Xi Binbin. 2018. Thermal anomaly profiles inferred from fluid inclusions near extensional and strike-slip faults of the Liaodong Bay Subbasin, Bohai Bay Basin, China: Implications for fluid flow and the petroleum system. Marine and Petroleum Geology, 93: 520 ~ 538.
- Hsiao L Y, Graham S A, 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. AAPG Bulletin, 88(1): 71 ~ 97.
- Jia Nan, Liu Chiyang, Zhang Gongcheng, Huang Lei, Zhao Junfeng, Lu Shan. 2015. The Cenozoic distinct uplift events in the Liaodong bay depression and their geological significance. Earth Science Frontiers, 22(3): 77 ~ 87.
- Koppers A A P, Morgan J P, Morgan J W, Staudigel H. 2001. Testing the fixed hotspot hypothesis using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age progressions along seamount trails. Earth and Planetary Science Letters, 185(3~4): 237 ~ 252.
- Koppers, A A P, Staudigel H, Duncan R A. 2003. High-resolution $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the oldest oceanic basement basalts in the western pacific basin. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 4(11): 1~20.
- Li Dejiang, Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, Zang Xiaojing, Chen Jianqing, Sun Qi, Xiang Zuowei. 2007. Sequence stratigraphy and depositional system of Paleogene Shahejie formation in Liaodong bay depression. Petroleum Exploration and Development, 34(6): 699 ~ 676.
- Li Sanzhong, Yu Shan, Zhao Shujuan, Liu Xin, Gong Shuyun, Suo Yanhui, Dai Liming, Ma Yun, Xu Liqing, Cao Xianzhi, Wang Pengcheng, Sun Wenjun, Yang Zhao, Zhu Junjiang. 2013. Tectonic transition and plate reconstructions of the east Asian continental margin. Marine Geology & Quaternary Geology, 33(3): 65~94.
- Li Wei, Wu Zhiping, Zhou Yaoqi. 2005. Reconstruction of the thickness of the Mesozoic strata and Mesozoic proto-type basin in the Jiyang Depression. Geological Review, 51(5): 507 ~ 516.

- Li Wei, Wu Zhiping, Hou Xubo, Yu Hongzhou. 2010&. Application of balanced cross section on the basin analysis, east area of Linqing depression. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 17(2): 58 ~ 64.
- Li Wei, Ren Jian, Liu Yiming, Li Chunrui. 2015&. Development and formation mechanism of Cenozoic tectonics in the east area of Liaodong bay depression. *Geological Science and Technology Information*, 34(6): 58 ~ 64.
- Li Wei, Chen Xingpeng, Wu Zhiping, Zhang Jing, Ren Jian, Liu Chao, Li Chunrui. 2016&. Study on the origin and evolution of transpressional structural belt and its control on oil and gas accumulation in the south of Liaozhong Sub-sag, Bohai sea area. *Geological Journal of China Universities*, 22(3): 502 ~ 511.
- Li Wei, Ping Mingming, Zhou Donghong, Wu Kui, Zhang Jing, Fang Lu, Chen Xingpeng. 2018&. Estimation of the Cenozoic strike-slip displacement for major faults in the Liaodong bay depression and its geological significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(3): 455 ~ 454.
- Liu Yongjun, Xu Changgui, Wu Kui, Zhang Jiangtao, Zhu Wensen. 2016&. Formation of the strike-slip inverse structural belt and its controlling action on the oil reservoirs in Liaozhong south subsag. *Petroleum Geology and Oil field Development in Daqing*, 35(3): 16 ~ 21.
- Lü Dingyou, Yang Minghui, Zhou Xinhui, Wei Gang, Liu Le, Li Chunxia, Zheng Xiaofeng. 2009&. Structural characteristics and hydrocarbon accumulation in the buried hills of the Liaoxi low salient, the Liaodong Bay depression. *Oil & Gas Geology*, 30(4): 490 ~ 496.
- Lü Dingyou, Li Wei, Guo Ruipeng, Wu Kui, Zhang Jiaotao. 2018&. Tectonic evolution and forming mechanism of the southern Liaozhong Sag, Liaodong Bay depression. *Marine Geology Frontiers*, 30(4): 25 ~ 32.
- Qi Jiafu, Zhang Yiwei, Lu Kezheng, Yang Qiao, Chen Fajing. 1995&. Extensional pattern and dynamic process of the Cenozoic rift basin in the Bohai bay. *Experimental Petroleum Geology*, 17(4): 316 ~ 323.
- Qi Jiafu, Yang Qiao, Wang Ziyu, Zhou Jianxun. 2001&. Some problems about compiling tectonic sections of basin. *Geological Review*, 47(4): 387 ~ 392.
- Qi Jiafu, Groshong R H Jr, Yang Qiao. 2002&. Analysis method for predicting strain of interior beds and sub-resolution faults from area-balance theory in extensional basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(6): 696 ~ 702.
- Qi Jiafu. 2004&. Two tectonic systems in the Cenozoic Bohai Bay basin and their genetic interpretation. *Geology of China*, 31(1): 15 ~ 22.
- Qi, Jiafu, Yang Qiao. 2010. Cenozoic structural deformation and dynamic processes of the Bohai bay basin province, China. *Marine and Petroleum Geology*, 27(4): 0 ~ 771.
- Qi Jiafu, Zhou Xinhui, Wang Qianshen. 2010&. Structural model and Cenozoic kinematics of Tan-Lu deep fracture zone in Bohai sea area. *Geology in China*, 37(5): 1231 ~ 1242.
- Qi Jiafu, Li Xiaoguang, Yu Fusheng, Yu Tiancai. 2013&. Cenozoic structural deformation and expression of the “Tan-Lu Fault Zone” in the West Sag of the Liaohe depression, Bohai bay basin province, China. *Science China; Earth Sciences*, 43(8): 1324 ~ 1337.
- Ren Jian, Wu Zhiping, Xu Changgui, Li Wei, Zhang Xiaoping, Zhang Jing. 2015&. Determination of uplifting ages during Cenozoic in northern Liaodong uplift: evidence from fission track dating. *Global Geology*, 34(2): 408 ~ 418.
- 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.
- Tang Jiguang, Mei Lianfu, Shen Chuanb, Yu Shuiming, Zhou Feng. 2006&. Advances and problem in the application of balanced cross-section technique in structure studies of basins. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 13(6): 19 ~ 22.
- Tong Hengmao, Mi Rongsan, Yu Tiancai, Liu Baohong, Meng lingjian, Yang Jingyong. 2008&. The strike-slip tectonics in the western Liaohe depression, Bohai bay basin. *Acta Geologica Sinica*, 82(8): 1017 ~ 1025.
- Tong Yanming, Zhong Qiaoxia. 2007&. Fast determination of basins paleo-tectonic stress direction by balanced cross—a new method to analyze paleo-tectonic stress direction. *Petroleum Geology & Experiment*, 29(6): 633 ~ 636.
- Wan Guimei, Tang Liangjie, Zhou Xinhui, Yu Yixin, Chen Xuyun. 2009&. Tectonic characteristics of the Tanlu fault zone in Bodong area of Bohai sea. *Acta Petrolei Sinica*, 30(3): 342 ~ 346.
- Wang Xiang, Wang Yingbin, Lü Xiuxiang, Fan Qiuhai. 2011&. Hydrocarbon accumulation conditions and distribution patterns in the Liaodong bay depression, the Bohai sea. *Oil & Gas Geology*, 32(3): 342 ~ 351.
- Wang Yingbing, Huang Lei. 2013&. Distribution characteristic of the Yang-Wei fault zone offshore the Bohai sea and Cenozoic basin-controlling model. *Acta Geologica Sinica*, 87(12): 1811 ~ 1825.
- Wei Zhenquan, Zhang Li, Shuai Qingwei, Yi Hai, Qian Xing, Lei Zhenyu, Wang Yantang. 2018&. Application of balanced cross section technique to the study of tectonic evolution of western Taiwan Strait basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(5): 194 ~ 201.
- Wu Kui. 2009&. Research of the seismic exploration in southern plunge of Liaodong up lift. Tutor: Wu Guochen, Qingdao: dissertation submitted to China University of Petroleum for master degree, 1 ~ 67.
- Wu Zhiping, Xue Yan, Yan Shiyong, Su Wen, Wang Xin, Xu Changgui, Zhou Xinhui. 2013&. The development characteristics of the fault system and Basin structures of the Bodong sag, East China. *Geological Journal of China Universities*, 19(3): 463 ~ 471.
- Wu Zhiping, Zhang Jing, Ren Jian, Xu Changgui, Li Wei, Zhang Xiaoping. 2016&. Development characteristics of strike-slip duplex in the eastern part of Liaodong Bay depression and its petroleum geological significance. *Journal of Geology*, 90(5): 848 ~ 856.
- Xiao Weide, Tang Xianjun. 2014&. Development of balanced cross-section technique and its application to Quintong depression of North-Jiangsu basin. *Marine Geology Frontiers*, 30(5): 58 ~ 63.
- Xu Changgui, Yu Yixin, Wu Kui, Wan Jing, Liu Yubo, Xu Xiaolong, Wu Hang. 2014&. Fault linkages and their control on hydrocarbon accumulation in the Liaodong Bay depression, offshore Bohai Bay basin. *Oil & Gas Geology*, 35(4): 456 ~ 462.
- Xu Changgui, Ren Jian, Wu Zhiping, Li Wei, Zhang Jing, Zhang Xiaoping. 2015&. Cenozoic fault system and tectonic evolution of the eastern Liaodong Bay depression. *Geological Journal of China Universities*, 21(2): 215 ~ 222.
- Yu Yixin, Zhou Xinhui, Xu Changgui, Lü Dingyou, Wei Gang, Wang Guihua. 2011&. Characteristics and formation mechanisms of the Cenozoic faults in the Bohai sea waters. *Oil & Gas Geology*, 32(2): 273 ~ 279.
- Yu Yixin, Zhou Xinhui, Xu Changgui, Wei Gang, Wu Kui, Zhang Xinying, Yang Keji. 2013&. Formation of JX Transfer Zone in the Liaodongwan Depression Offshore Bohai Bay Basin. *Geoscience*, 27

(5): 999 ~ 1004.

Yu Yixin, Zhou Xinhuai, Xu Changgui, Wu Kui, Liu Yubo, Yang Keji, Zhou Xin. 2014#. Differential deformation of strike slip faults in the Liaodong Bay depression, offshore Bohai Bay basin. *Oil & Gas Geology*, 35(5): 632 ~ 638.

Yu Yixin, Zhou Xinhuai, Xu Changgui, Wei Gang, Lü Dingyou. 2017#. Differential structural deformation of Tan-Lu fault zone and hydrocarbon accumulation in offshore Bohai Bay basin. *Geological Review*, 63(S1): 81 ~ 82.

Zhang Jianpei, Tang Xianjun, Zhang Liang, Zhang Shaoqing, Yu Yifan. 2012#. Application of balanced cross section technique to the research of tectonic evolution of Xihu sag in the east China sea. *Marine Geology Frontiers*, 28(8): 31 ~ 37.

Zhang Mingshan, Chen Fajing. 1998#. Application condition of balanced-section technique and the case analysis. *Oil Geophysical Prospecting*, 33(4): 532 ~ 540.

Zhang Peng, Wang Liangshu, Zhong Kai, Ding Zengyong. 2007#. Research on the segmentation of Tancheng — Lujiang fault zone. *Geological Review*, 53(5): 586 ~ 591 .

Zhang Rongqiang, Wu Shiguo, Zhou Yan, Yu Zhaohua, Feng Deyong, Yu Zhengjun. 2008#. Tectonic evolution of the Zhuanghai area, Bohai Bay basin, east China: the application of balanced cross sections. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(6): 135 ~ 141.

Zhou Yaoqi, Wu Zhiping. 2000#. Study on Time Structure of Stratigraphic Discontinuity. Beijing. Geological Publishing House.

Zhu Guang, Jiang Dazhi, Zhang Bilong, Chen Yin. 2012. Destruction of the eastern north china craton in a backarc setting: evidence from crustal deformation kinematics. *Gondwana Research*, 22(1): 86 ~ 103.

Application of balanced cross-section method in extension, strike-slip superposition and ratio analysis: A case study of Liaodong Bay depression, Bohai Bay Basin

LI Wei^{1,2)}, GUO Tiantian^{1,2)}, WU Zhiping^{1,2)}, XU Changgui³⁾, WU Kui³⁾,
CHEN Xingpeng^{1,2)}, YOU Pengfei^{1,2)}, GUO Ruipeng^{1,2)}

1) School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266580;
2) Key Laboratory of Deep Oil & Gas Geology and Geophysics (China University of Petroleum), Ministry of Education, Qingdao, Shandong, 266580;
3) Tianjin Branch, CNOOC Limited, Tianjin, 300452

Objectives: During the Cenozoic evolution of the Liaodong (eastern Liaoning) Bay Depression, Bohai Bay basin, it was controlled by the interaction of extension and strike-slip stress. These two properties stress changed in different stages, result in the complicated superposition and ratio between extension and strike-slip. This complicated relationship is one of the most important factors for the evolution of the depression, but it is a lack of research. In this paper, we aim to extract the superposition and ratio of extension and strike-slip and restore the Cenozoic evolution of the Liaodong Bay Depression.

Methods: Based on fine interpretation of 3D seismic data, this paper restored the tectonic evolution history of the typical section and calculated the cross-section extension rate through balanced cross-section method, which were parallel to or perpendicular to the main fault in Liaoxi sag and Liaozhong sag. Finally, superposition and ratio of extension and strike-slip were analyzed at the different stage in the Liaodong bay depression in Cenozoic.

Results: The result shows that Liaodong Bay Depression was dominated by extension, and strike-slip was relatively weak during the sedimentary period from Kongdian Formation to Sha-3 Member. While Liaodong Bay Depression was controlled by weak extension and weak strike-slip during Sha-2 and Sha-1 Member depositional period. Further, Liaodong Bay Depression was dominated by intense strike-slip and weak extension during Dongying Formation depositional period. The strike-slip displacement of Liaozhong and Liaodong area was larger than Liaoxi area, while the extension displacement of Liaoxi area was larger than Liaozhong and Liaodong area at this stage. Weak extension and weak strike-slip controlled development of Liaodong Bay Depression during the Neogene and Quaternary.

Conclusions: The superposition and proportion of extensional and strike-slip controlled the temporal and spatial differences of structural deformation in the Liaodong Bay Depression at different development stage. The theory and method we used in this paper can be applied to the basins that controlled by extensional and strike-slip stress in eastern China, especially the area where developed abundant strike-slip derived secondary faults near the main

strike-slip faults.

Keywords: extension and strike-slip; superposition and ratio relationship; balanced cross-section; Liaodong Bay depression; Cenozoic

Acknowledgements: The research is supported by the National Science and Technology Major Project (No. 2016ZX05006-007) and National Oil and Gas Major Project (No. 2016ZX05024-002-001)

First Author: LI Wei, male, born in 1978, associate professor, mainly engaged in structural analysis of petroliferous basin; Email: liwei780923@163.com

Manuscript received on: 2019-02-23; Accepted on: 2019-09-19; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.06.016

(上接第 1486 页) 为“国际影响力优秀学术期刊”。《年报》自 2012 年起已连续发布 8 年,其提供的统计数据科学准确、客观公正地分析了我国自主创办的本土学术期刊的国际影响力水平(自然科学—工程技术期刊的 *CI* 是以各期刊被 SCI 统计源期刊他引数据为基础计算)。《年报》指出:今年共有 350 种自然科学与工程技术期刊入选“2019 中国最具国际影响力学术期刊”和“2019 中国国际影响力优秀学术期

刊”,这些 TOP 期刊是我国学术期刊“走出去”的杰出代表,是我国科技强国战略和世界一流科技期刊建设的排头兵,对我国学术期刊的国际影响力提升起到了良好的带动作用。

LIU Zhiqiang: *Geological Review, Acta Geologica Sinica* (Chinese and English edition) continuously awarded the title of “the most influential international academic journals of China”

