

北黄海盆地构造变形及动力学演化过程

李文勇

国土资源部广州海洋地质调查局, 510760

内容提要:以北黄海盆地构造几何学、运动学特征为基础,探讨了北黄海盆地的构造变形样式及动力学演化过程。研究表明,北黄海盆地的构造变形包括伸展构造变形、挤压构造变形、扭动构造变形以及反转构造变形等,北黄海盆地发育的区域动力学背景即是以区域拉伸作用为主、且叠加有水平挤压作用以及相关的扭动作用,并由此导致了北黄海盆地是以一系列地堑、半地堑式拗陷组成的拉张断陷盆地;北黄海盆地的伸展、挤压与升降作用受控于板块相互作用引起的区域引张与挤压应力场并辅以深部软流圈的微弱上拱隆起作用,其动力学演化过程包括晚侏罗世—早白垩世伸展断陷、晚白垩世—古新世热隆、始新世—渐新世裂陷、渐新世末期—新近纪早期构造反转以及新近纪热沉降等5个阶段。

关键词:北黄海盆地;构造变形样式;动力学演化

自20世纪60年代,我国开始对北黄海盆地进行时断时续的调查和研究,并取得了一系列基础地质研究成果,包括盆地地质、地球物理场、盆地中新生代沉积拗陷及其范围等(冯志强等,2002;赖万忠,2002;龚建明等,2000;罗斌杰等1995)。为了进一步了解北黄海盆地的构造特征和油气资源潜力,近几年来,笔者根据最新的地质调查资料,对北黄海盆地的构造几何学、运动学、动力学以及构造演化等进行了系统探讨(李文勇等,2006a,b),本文即为北黄海盆地构造变形特征及动力学演化过程的研究成果。

盆地构造变形机制及动力学分析可以揭示或再现盆地构造几何学形成的原因或过程,是对盆地构造运动学分析结果的验证,同时也是盆地构造几何学和运动学分析的理论升华(Allen et al., 1990; Ingersoll et al., 1995; Bertram et al., 1989)。北黄海中、新生代盆地属于断陷型盆地,其构造变形机制复杂,动力学演化过程漫长。

1 地质概况

北黄海盆地位于中朝板块东南部,属于胶辽地块和朝鲜北部地块上发育的中、新生代含油气盆地,总体呈NE走向(图1);历经多期构造运动(李廷栋

等,2002;李乃胜,1995;蔡乾忠,1995,2002),形成了多旋回含油气构造-沉积组合(包括中生界的上侏罗统—下白垩统、古近系的始新统和渐新统以及新近系),盆地基底为古生代沉积岩和前寒武纪变质岩(Massoud et al., 1991, 1993; Kim, 1992)。北黄海盆地包括东部拗陷、中部拗陷、西部拗陷、南部凹陷群以及中央隆起、中西部隆起等6个二级构造单元和24个三级构造单元(李文勇等,2006a),拗陷内发育湖相、三角洲相中、新生代地层(包括上侏罗统—下白垩统、始新统、渐新统以及新近系),最大沉积厚度达8000~8400m,隆起地带仅发育新近纪地层。

盆地褶皱、断裂构造均十分发育,以正断层为主,其次可见平移断层和逆断层;按照展布方向,可见近EW—NE向、NW向和NNE向三组方向(图2),其中,近EW—NE向断裂构造最为发育,形成于晚侏罗世—早白垩世;NW向断层总体发育较差,形成于晚白垩世—古近纪早期;NNE向断层在盆地中西部比较发育,于始新世形成。近EW—NE向与NNE向断裂构造是盆地的控制性断裂,常构成盆地边界或盆地内隆起与拗陷的边界。

2 北黄海盆地构造变形

从基本动力学性质分析,北黄海盆地的构造变

注:本文为国家重大科技攻关项目(编号GZH200200104)资助成果。

收稿日期:2007-01-17;改回日期:2007-03-28;责任编辑:郝梓国。

作者简介:李文勇,男,1966年生。博士后,教授级高工,主要从事盆地构造与油气勘探研究工作。通讯地址:510760,国土资源部广州海洋地质调查局;Email:liwy66@163.com。

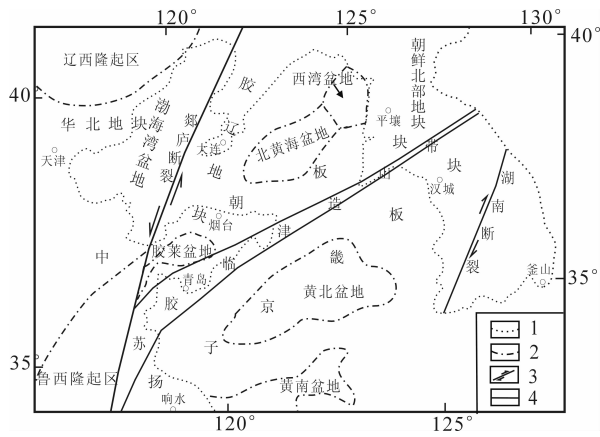


图 1 北黄海盆地地区构造位置图

Fig. 1 Regional tectonic location of North Yellow Sea basin

- 1—海陆边界;2—盆地或隆起区边界;3—走滑断裂;
- 4—造山带边界

- 1—Sea-land borderline;2—borderline of basin or uplift area;
- 3—strike-slip fault;4—borderline of orogenic belt

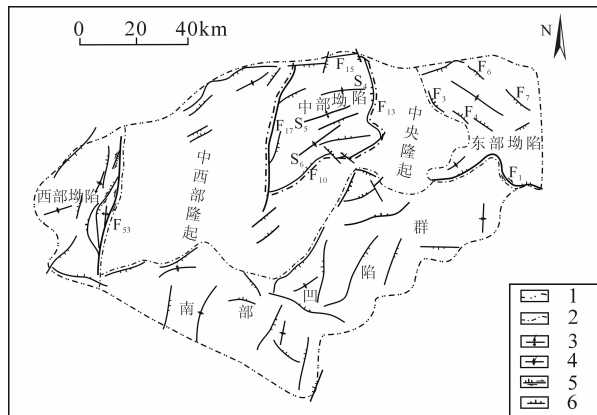


图 2 北黄海盆地构造纲要及构造单元图

Fig. 2 Tectonic sketch and elements for North Yellow Sea basin

- 1—盆地边界;2—二级构造单元边界;3—背斜;4—向斜;
- 5—正-平移断层;6—正断层

- 1—Basin borderline;2—borderline of second-order tectonic unit;3—anticline;4—syncline;5—normal-strike-slip fault;6—normal fault

形包括伸展构造变形、挤压构造变形、扭动构造变形以及反转构造变形等,北黄海盆地发育的区域动力学背景即是区域拉伸作用、挤压作用以及相关扭动作用的叠加,并由此导致了北黄海盆地是以一系列地堑、半地堑式拗陷组成的拉张断陷盆地。

2.1 伸展构造变形

伸展构造变形是断陷盆地构造变形的主体,它

是在拉张构造应力场作用下发生并主要通过正断层表现出来(Kusznir et al., 1992; Lobkovsky et al., 1996; Mchargue et al., 1992)。北黄海盆地正断层十分发育,其正断层几何学对盆地的构造变形具有明显的控制作用,因此是北黄海盆地构造变形机制研究的重要内容。

(1) 正断层断面形态及其控制作用。从断面形态上,北黄海盆地的正断层主要表现为铲式正断层,其中边界正断层控制着盆地各个拗陷的晚侏罗世—早白垩世、始新世以及渐新世沉积。小型铲式正断层一般发育在地壳脆性层(地震层)内,当断层穿过不同的岩性时可以在产状上显示出明显的坡坪式变化。大型铲式正断层一般以中等倾角穿过整个地壳脆性层,断层上盘发育半地堑式沉积盆地。铲式正断层产状上陡下缓,凹面向上,往往沿具有超压特征的软弱层内拆离滑脱,在上盘发育生长构造。

理论计算及物理模拟研究(Withjack et al., 1995; Xiao et al., 1992)表明,盆地内部的变形与控盆主边界断层的几何形态有密切关系。铲式正断层一般导致上盘断块简单的旋转掀斜作用,形成典型的在直立剖面上呈楔状的、平面上呈勺状形态的半地堑式可容空间。上盘的沉降可以达到相当大的深度,聚集巨厚的沉积。同时,上盘可以发育次级的同向或反向断层。

比较而言,铲式断层系可以导致上盘更为复杂的变形,这主要是由铲式断层的几何学特征所决定的。铲式正断层的拉张作用不仅导致上盘滚动褶皱、拉张断弯褶皱的发育,并在上盘中产生反向或同向调节断层。这些调节断层发育的几何学特征、产生的构造位置和发育序次具有规律性。北黄海盆地中部拗陷 F₁₇ 断层、西部拗陷 F₅₃ 断层及其上盘断层系的形成机制可用 Withjack 等(1995)所做实验的第一个模型来解释。以西部拗陷边界断层 F₅₃ 及其上盘断层系的形成为例(图 3a):在变形开始阶段,主边界正断层从底部向上扩展到顶部边缘;拉伸作用继续进行时,产生两个变形带,其中一个变形带紧邻并位于主断层面之上,主要由从主断层面向上扩展的陡倾同向正断层组成;第二个变形带从主断层面的弯折带(从 45° 倾角变为水平的位置)部位向上扩展,变形带由向上变宽的反向断层带构成,这些反向断层的位移从下到上逐渐减小;继续拉伸,第二个变形带向右移动离开断层的弯折部位,而且不再活动。而在断弯带部位重新产生一个新的、同样由反向陡倾断层带组成的变形带;继续拉伸,这个变形带

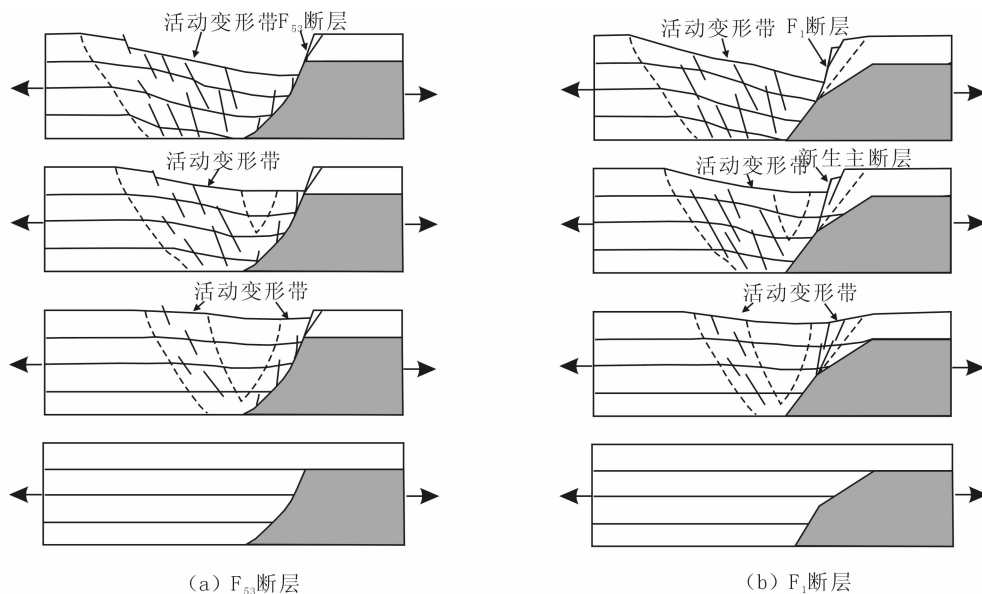


图3 北黄海盆地 F_{53} 、 F_1 正断层及其上盘断层系形成机制示意图

Fig. 3 Formation mechanism on fault system of normal faults F_{53} and F_1 and their upper sides of North Yellow Sea basin

又移动,并离开断弯带;在断弯带部位,新的反向变形带又继续形成。从形成先后顺序看,靠近主断层 F_{53} 弯折带部位的反向断层形成的时代最晚,而远离主断层 F_{53} 弯折带部位的反向断层形成时代最早。

北黄海盆地东部坳陷 F_1 断层及其上盘断层系的形成机制可用 Withjack 等(1995)所做实验的第二个模型来解释(图 3b):主断层 F_1 上部较缓,向下变陡,然后到底部又变平,其上盘主断层上凹弯折带部位的变形与 F_{53} 断层基本一致;所不同的是,第二个变形带从主控边界断层上凸弯折处向上扩展,这个变形带主要由陡倾正向断层组成,随着拉伸的继续,最终只有一条同向正断层向上扩展至顶部,从而构成新的主边界 F_1 正断层。

(2) 断层沿走向发育的非均一性与构造传递带。无论在何种尺度上,正断层系一般沿总体走向的发育程度具有非均一性,也就是说一个正断层系沿总体走向可划分为若干个非连续的断层区段,并通过各自不同的特征表现出来(李丕龙, 2000; Faults et al., 1998)。但同一个断层系的各个区段之间在运动学上是相互关联的,而且是在同一个构造应力场背景下形成的,断层系是通过原先彼此相对孤立的断层区段的扩展和连接而形成的。当雁列式断层垂向和侧向扩展时,在断层叠合部分形成构造传递带。

构造传递带发育于分段活动的相邻断层之间,是伴随断层活动而形成的一种构造形式,通常表现

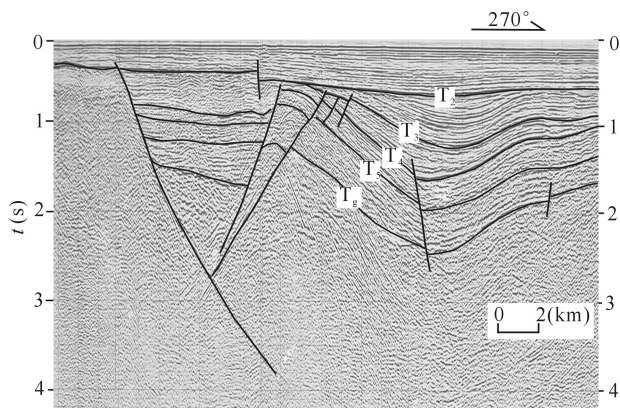


图4 北黄海盆地构造传递带地震剖面

Fig. 4 Seismic profile on structure transfer zone of North Yellow Sea basin

T_2 —新近系与古近系的分界面; T_3 —渐新统与始新统的分界面; T_4 —新生界与中生界的分界面; T_5 —白垩系与侏罗系的分界面; T_6 —前中生界顶界面
 T_2 —Interface between Neogene and Paleogene; T_3 —interface between Oligocene and Eocene; T_4 —interface between Cenozoic and Mesozoic; T_5 —interface between Cretaceous and Jurassic; T_6 —upper surface of premesozoic

为传递断层、传递变形带、传递断坡等形式(图 4)。由于构造传递带对同入盆水系起着非常显著的控制作用,进而对同断陷地层和盆地内砂体的分布也有着明显的影响,同时构造传递带构造类型复杂,是盆地内潜在的有利圈闭发育区,因此,加强盆地内构造

传递带的研究对油气勘探非常重要。

构造传递带是断层沿走向非均一发育的几何表现,在北黄海盆地表现比较明显。如东部拗陷发育的一套断裂体系,从南向北有 F_1 断裂带、 F_3 — F_4 断裂带以及 F_6 — F_7 断裂带(图 2),这一套断裂体系由一系列断层以非常复杂但又有序的方式组合;总体上看,这些断裂带呈北西向延伸,并呈雁列式展布;在断裂发育的主体区段,断层的断距较大,断层的几何学特征相对简单,但在主断层消失部位及两条主断层的过渡部位,断层的几何学特征变得相当复杂,表现为断裂频数增高,单条断层的断距明显变小,这些部位即所谓的断层位移传递带或将两条主断层连接起来的“桥式构造区”。再如中部拗陷的 F_{10} 断裂带— F_{20} 断裂带— F_{18} — F_{19} 断裂带,南部凹陷群的 F_{26} 断裂带— F_{28} 断裂带— F_{29} 断裂带、 F_{31} 断裂带— F_{32} 断裂带、 F_{48} — F_{49} — F_{50} 断裂带等,均呈北东或北北东向展布,断裂带之间的构造传递带将其分别连接为同一个断裂系(图 2)。

2.2 挤压构造变形

挤压构造变形是指岩层经受水平挤压力作用所发生的弯曲、错断等变形,它通常以褶皱和逆断层等形式表现出来(Cotton et al., 2000; 马寅生等, 2002)。北黄海盆地的褶皱构造比较发育,大多数褶皱是在岩层形成后受力变形而形成的,属于沉积期后褶皱;而由于挤压作用形成的逆断层在北黄海盆地虽有表现,但并不多见。

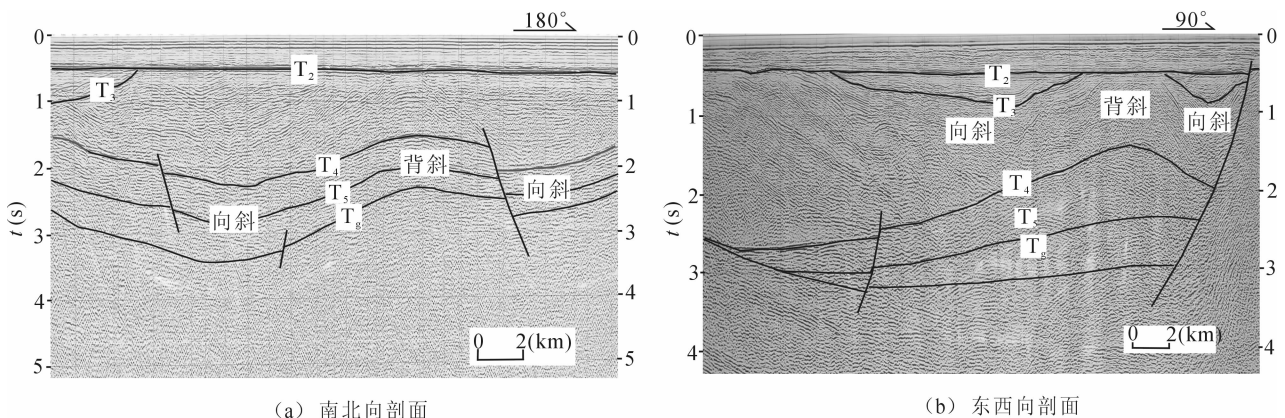
北黄海盆地的水平挤压运动主要有两期:晚白垩世和渐新世末—中新世初。晚白垩世的水平挤压作用使晚侏罗世—早白垩世地层发生褶皱,局部地

段出现逆断层;由于挤压作用方向为近南北向,因此其形迹在南北向剖面比较明显,多表现为近于对称的宽缓背、向斜相间分布形态(图 5a)。渐新世末—中新世初期的水平挤压运动使始新世—渐新世地层乃至中生代地层隆起,并发生不同程度的褶皱、倾斜、削顶夷平,形成重要的角度不整合界面(T_2),同时,部分断层发生反转,由正断层变为逆断层;由于挤压运动方向为北西—南东向,因此其形迹在东西向和北西—南东向剖面比较明显(图 5b)。

2.3 扭动构造变形

(1) 扭动构造应力场。当相邻地壳或岩石圈地块之间以侧向运动为主时,产生扭动构造变形(Moores, 1995)。实际上,这种相对运动很少是纯侧向的,常常包括一定量的正向或反向倾斜滑动。扭动构造是指地壳岩石圈在剪切应力场作用下产生的变形(Dennis, 1972),它是地壳岩石圈水平运动的重要表现,也是含油气盆地分析的一个重要方面,许多含油气盆地及油气圈闭都受到了扭动构造的控制和影响。扭动构造通常有多种表现形式,其中平移(走滑)断层是最主要的表现形式。从运动学的角度,平移(走滑)变形可以区分为非旋转型纯剪切变形和旋转型简单剪切变形。单纯由于挤压或拉张造成的非旋转型剪切在扭动构造中为数极少,大部分扭动构造与旋转型剪切有关(Harding, 1991)。

右旋剪切应力可以分解为挤压分应力和拉张分应力(Tapponnier, 1976)。应变椭圆在变形后由单位圆形变为椭圆形,其主应变轴与右旋剪切力偶斜交。在这样一个应力和应变场的控制下,可以出现一系列的特征构造组合和构造变形序列。其最突出



(a) 南北向剖面

(b) 东西向剖面

图 5 北黄海盆地水平挤压构造变形地震剖面

Fig. 5 Seismic profiles on the horizontal compressed tectonic deformation of North Yellow Sea basin

T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 的意义同图 4

The meaning of T_2 , T_3 , T_4 , T_5 and T_6 are the same as Fig. 4

的特征是在主要的位移带内部和其附近分布有雁列式断层和褶皱。褶皱的轴向与应变椭圆的长轴方向近于平行,褶皱变形的后期可能出现走向与褶皱轴平行的逆断层。在走滑或平移断裂带内及其附近通常有五组断裂:①同向走滑断裂或里德尔(R)剪切;②反向走滑断裂或共轭里德尔(R')剪切;③次级同向断裂或P剪切;④拉张或张性断裂;⑤与主位移带平行的断裂。在右旋剪切应力应变场中,褶皱、R剪切和P剪切为右旋,而R'剪切和拉张断裂则为左旋(Harding, 1991)。以上平移(走滑)断层出现的构造型式在性质上受到位移规模的影响。根据Wilcox(1973)所作的实验,褶皱和里德尔剪切最先发育,随后出现P剪切,最后是较窄的主位移带贯通。

构造的发育不是瞬时的,而是持续的递进变形。早期形成的构造趋于发生旋转,所以平移(走滑)构造带中褶皱和断层的最终方位取决于位移的规模和变形历史中这些构造形成的时期。此外,岩石的物理性质和先存构造对平移(走滑)构造带内的构造样式有一定的影响。岩石的物理性质对石油地质学研究非常重要,平移(走滑)断层可以使得渗透性明显不同的岩石相邻,当石油穿过断面运移时,断面就具有封闭或输导特性。地壳岩石圈内的平移(走滑)断层往往沿先存地壳内部的薄弱带发育。

(2) 北黄海盆地平移断层变形实例分析。中、新生代以来,中国东部经历了多期次区域构造应力场的改变,发育一系列平移(走滑)断裂,并经历了多

次由左旋平移(走滑)到右旋平移(走滑)的变换。在这种区域应力背景之下,北黄海盆地内产生了三条具有平移(走滑)分量的拉张断陷带,即西部断陷带、中部断陷带和南部断陷带。本次大规模的油气勘探中密集的地震测线资料已经发现了具有平移(走滑)性质的断裂带,主要表现为NNE向,如 F_{53} 、 F_{17} 、 F_{31} — F_{32} — F_{38} — F_{40} 断裂带,它们分别控制着西部、中部和南部断陷带的沉积发育和空间展布;其次,位于北黄海盆地东部的 F_1 断裂NW段和规模较大的NW向断层也具有平移(走滑)性质。控制断陷带沉积和空间形态的主干断裂在不同地段均发现有花状构造的踪迹。

图6显示了NNE向 F_{53} 断裂带、 F_{17} 断裂带和 F_{31} — F_{32} — F_{38} — F_{40} 断裂带的特征,在主干断裂上盘均发育有一系列的分支断层和伴生褶皱,它们与主断层的配置关系显示了NNE向断裂带在古近纪时期经历过右旋张扭平移运动。

图7a反映了 F_1 断裂带的中部NW段剖面构造组合及其变形特征,可以看出,主断层断面较陡,上盘发育一系列反倾断层,中生代和古近纪的反倾断层为正断层,而在古近纪末和新近纪初的反倾断层则为逆断层。这一复杂的花状构造反映该断裂至少经历了早期张扭性平移运动和晚期压扭性平移运动两个阶段。

图7b为北黄海盆地东部坳陷中部构造带的一个NW向断裂带地震剖面,主断层断面陡,主断层下盘可见同倾正断层,主断层上盘发育一系列伴生

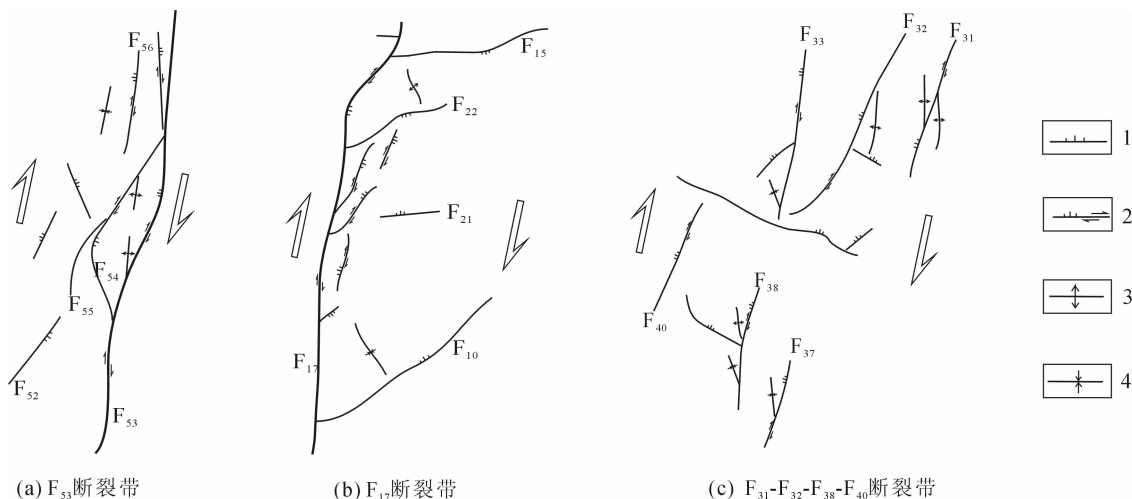
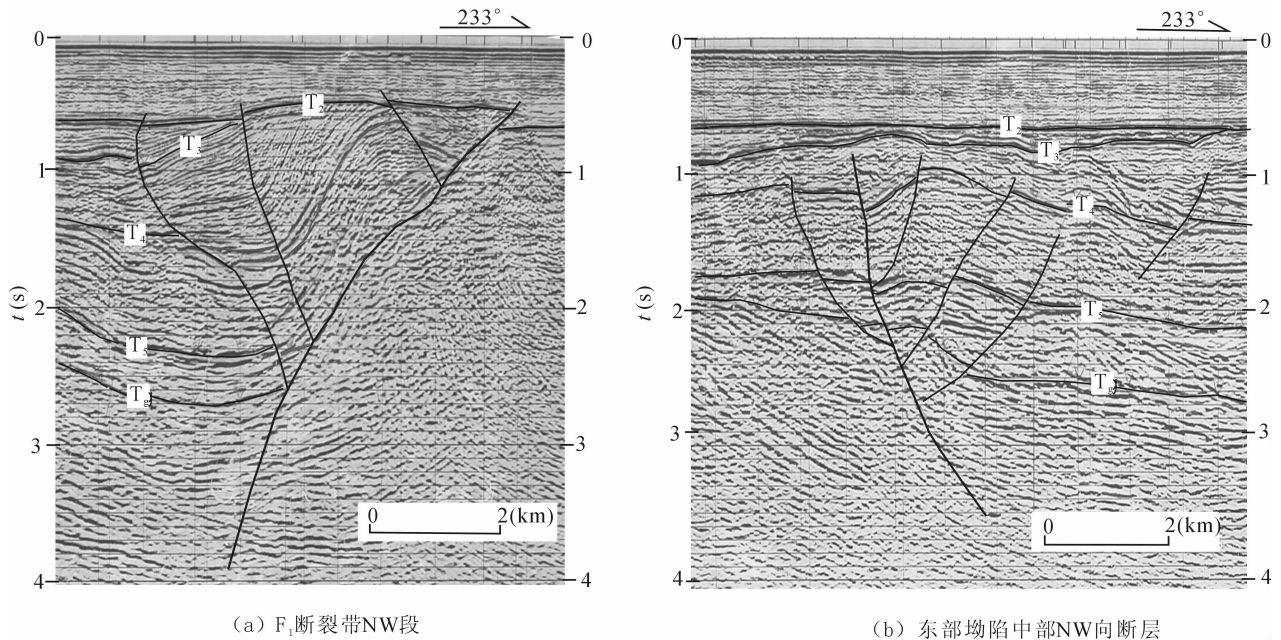


图6 北黄海盆地 F_{53} 、 F_{17} 、 F_{31} — F_{32} — F_{38} — F_{40} 断裂带扭动体系

Fig. 6 Shear structural system of fault zone F_{53} , F_{17} and F_{31} — F_{32} — F_{38} — F_{40} of North Yellow Sea basin

1—正断层;2—正-平移断层;3—背斜;4—向斜

1—Normal fault; 2—normal-strike-slip fault; 3—anticline; 4—syncline

(a) F₁断裂带NW段

(b) 东部拗陷中部NW向断层

图 7 北黄海盆地 NW 向断裂带花状构造地震剖面

Fig. 7 Seismic profiles on the flower structures from NW faulted zones of North Yellow Sea basin

T₂、T₃、T₄、T₅、T_g的意义同图 4

The meaning of T₂, T₃, T₄, T₅ and T_g are the same as Fig. 4

褶皱和反向断层,这些反向断层仅在中生代底部有少数表现为逆断层,而在中生代和古近纪早期则明显表现为正断层,剖面总体表现为负花状构造形态。由此可见,该断裂带在中生代和古近纪早期主要发生张扭性平移运动,断裂带发育的伴生褶皱应是古近纪末期较强烈的压扭性平移运动的反映。

综上所述,北黄海盆地的主要断裂多不同程度地表现出平移扭动的动力学性质,它们不仅表现在平面上的斜列,而且在剖面上也表现为花状构造形态。其中,NNE 向断裂的平移扭动最为明显,其负花状构造主要是在始新世—渐新世时期由右旋张扭平移作用形成的;NW 向断裂的张扭作用,主要发生在古近纪早期,表现为右旋扭动特点,但在古近纪末又发生反转,表现为左旋压扭性动力学性质;EW 向断裂可能经历了中生代左旋张扭、始新世—渐新世早期右旋张扭以及古近纪末左旋压扭等动力学过程。

2.4 反转构造变形

反转构造属于叠加构造类型之一,其独特的地质构造特征对油藏的形成极为有利。反转构造活动的成因具有多样性,可能由多种作用、多种机制所造成(张玉明等,2006)。正反转构造可以由主压应力对断陷盆地的正向挤压所产生的冲断层与逆掩断层

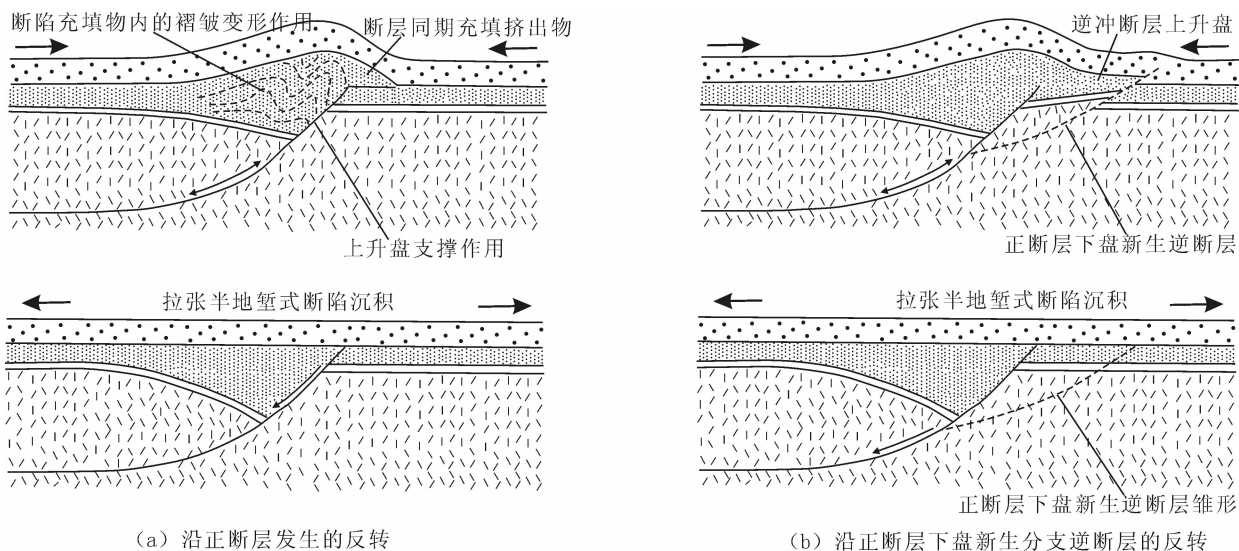
的活动形成,也可以由主压应力对断陷盆地的斜向挤压所产生的压扭性断层的活动形成,正反转构造的形成时期出现在拉张断陷向挤压隆起转化的时期。负反转构造既可以在区域性挤压作用和应力松弛,并由重力作用支配下的正断层的拉张断陷活动形成;也可以由区域拉伸或张扭应力作用造成,其形成时期出现在由挤压隆起向拉张断陷转化时期。在拉张或挤压过程中,重力活动引起的块体的旋转也可以导致盆地局部出现反转。

从大尺度角度看,北黄海盆地连同盆地基底应至少发生过五次动力学性质反转,即:中侏罗世之前的基底遭受挤压隆升到晚侏罗世—早白垩世的拉张断陷,之后转入晚白垩世—古新世的挤压隆起,至始新世—渐新世又转变为伸展断陷,到渐新世末—中新世初又转为挤压抬升剥蚀,至新近纪全面进入区域沉降。

从盆地内部构造角度看,北黄海盆地的构造反转变形比较普遍,它是断裂面两种力学性质逆转形成的构造,反转形式有正反转和负反转,而且主要表现在近 EW—NE 向断层和 NW 向断层。正反转作用主要发生在构造应力场由早期拉张转变为挤压抬升的晚白垩世—古新世以及古近纪末,其中尤以古近纪末最为显著,负反转作用主要发生于构造应力

场由早期挤压转变为拉张断陷的始新世—渐新世。在中生代和古近纪断陷盆地中的近EW—NE向正断层和NW向正断层,当构造环境由先期的拉张体制转化为后期的挤压体制时,北黄海盆地可见到两种正反转构造变形,一种是利用原有的张性正断层面发生逆转,使断陷期充填层序发生变形,或者有限挤出,形成反转构造(图8a、图9a),此种构造的一个突出特点是,由于上升盘基底的支撑作用,使之既无新断层产生,又使断陷期层序发生了挤压褶皱;另一

种变形是,当倾向较陡张性正断层控制的半地堑发生反转时,上升盘在原正断层的基础上沿相对坚硬的岩块与相对柔软的岩块的接触带上(即断陷盆地与大型潜山披覆构造带的边界断裂附近)产生一条缓倾的新的逆冲断裂面,使整个半地堑发生反转(图8b、图9b)。研究分析表明,由于压扭作用易于沿袭原有的岩石破裂面(正断层)在反转期间再活动为逆断层,因此,北黄海盆地以第一种正反转构造变形比较常见。

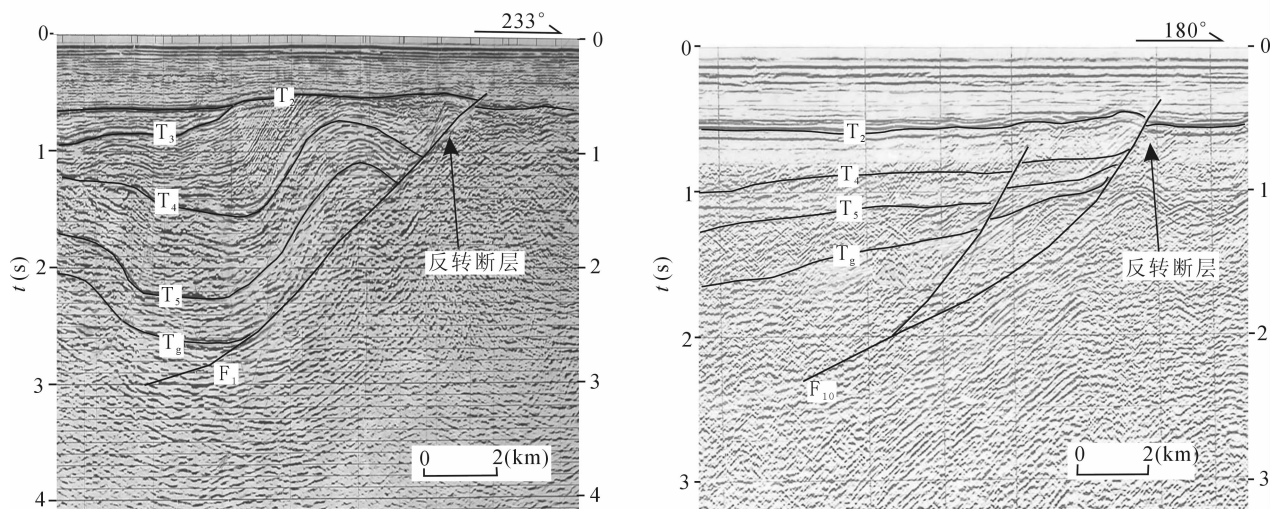


(a) 沿正断层发生的反转

(b) 沿正断层下盘新生分支逆断层的反转

图8 北黄海盆地正反转构造模式图

Fig. 8 Patterns on positive inverse structures of North Yellow Sea basin



(a) 沿袭正断层形成的正反转构造

(b) 沿正断层下盘新生分支逆断层形成的正反转构造

图9 北黄海盆地正反转构造地震剖面

Fig. 9 Seismic profiles on positive inverse structures of North Yellow Sea basin

T₂、T₃、T₄、T₅、T₆的意义同图4

The meaning of T₂, T₃, T₄, T₅ and T₆ are the same as Fig. 4

需要说明,北黄海盆地也发育负反转构造,但由于渐新世末的强烈挤压作用,使早期的负反转构造形迹被掩盖或被改造模糊,因此,在地震剖面上常见到清晰的正反转构造,而负反转构造不易直观识别。

3 北黄海盆地动力学演化过程

北黄海盆地中、新生代构造演化的动力学机制分析,是要解释在中、新生代的区域构造背景下盆地内部构造演化的动力来源问题。

3.1 动力来源

(1) 板块相互作用引起区域引张应力场是驱动岩石圈或地壳伸展断陷的重要动力来源。中、新生代时期太平洋板块往北西方向和近北方向向中国大陆东部边缘下俯冲,所产生的地幔热流向大陆方向蠕散时,加速了上地壳朝大洋方向的漂移,形成一系列由近东西—北东向和北北东向断层组合控制的断陷盆地,其大小不一,千姿百态,但排列有序。印度板块向北推移,与欧亚大陆地壳碰撞所产生的挤压应力也影响本区,致使本区除伸展构造运动外,还有水平走滑构造运动,与这些不同方向应力场有着密切关系。

(2) 深部软流圈上拱隆起也是北黄海断陷成盆的辅助动力来源。由于地幔软流圈的上涌作用,使其上岩石圈产生水平引张,岩石圈减薄,从而发生破裂、下沉以至形成断陷盆地和伸展构造。根据前人对中国东部众多盆地的研究分析表明(Lin et al., 2002; Zhang et al., 2004),区域岩石圈具有明显的层圈结构,在中地壳上段为低速层,深度 18~23km,它是地震波传播和变化、导电性、部分熔融、岩浆形成及高温物质—塑性流动的汇聚层。它在深、浅层构造变形过程中起到牵制和纽带作用,控制拗陷沉降的基底铲式断层归并于低速层。在盆地断陷伸展时期,拗陷主干断层向深部延展。重磁资料分析证实,对应于北黄海盆地的三条主干断层,深部有四条岩石圈断裂相对应^①。同时,火成岩沿深大

断裂旁侧成带状或串珠状分布,反映了熔融物质是沿着深大断裂上升形成侵入岩或喷出地表,表明它作为深部热输出的主要通道在中、新生代伸展断陷作用中占有一定地位。

3.2 伸展作用模式

根据区域构造动力学分析和北黄海盆地的结构构造特点,认为北黄海盆地的伸展作用受控于板块相互作用引起的区域引张应力场并辅以深部软流圈的微弱上拱隆起作用,为此,本文提出北黄海盆地的伸展作用模式如图 10 所示。北黄海盆地浅层地壳中的伸展构造表现为不对称的地堑、半地堑形式;软流圈微隆起的总体形态应与盆地基底形态呈镜像反映。该模式可以较合理地解释引起大陆剪切伸展的动力源可能来源于区域应力场并辅以软流圈微弱热隆起。

该模式中的基本观点:

(1) 上地壳为简单剪切伸展,造成不对称的和具掀斜块断结构的伸展构造样式。

(2) 中地壳层内的低速层可能构成上地壳简单剪切伸展的拆离滑脱层。

(3) 下地壳及上地幔岩石圈以韧性纯剪切伸展为主。

(4) 壳下岩石圈还有一定的热活动,是盆地火山活动的岩浆源区。

3.3 北黄海盆地动力学演化阶段

(1) 晚侏罗世—早白垩世伸展断陷阶段。由于太平洋板块沿北西方向欧亚板块的俯冲,引起中国大陆东部边缘岩石圈拆沉,同时俯冲作用诱发的地幔热流向大陆方向蠕散,加速了上地壳朝大洋方向的漂移,从而导致中国东部大陆边缘的区域性弧后拉张,因此形成了一系列近东西至北东向的张性正断层,拉开了北黄海盆地晚侏罗世—早白垩世的伸展断陷动力学阶段。张性正断层的特点是:断面北西倾,形成基岩面北西翘南东倾;沿着断裂带有岩浆侵入或喷发。

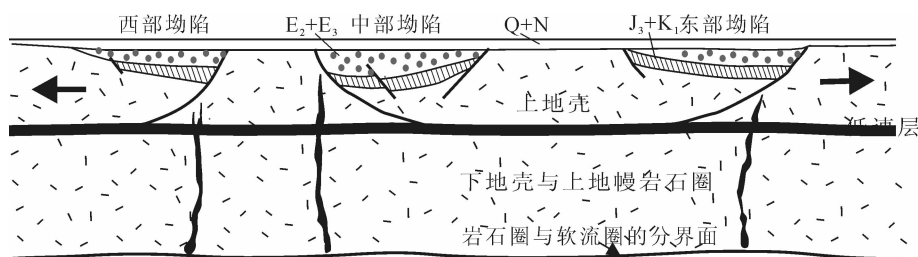


图 10 北黄海盆地伸展作用模式图

Fig. 10 Extension pattern of North Yellow Sea basin

(2) 晚白垩世—古新世热隆阶段。中生代末,太平洋板块以北北西方向在欧亚板块东部边缘继续俯冲,强烈的挤压作用,使北黄海地区地壳及上地幔一同卷入,导致上地幔部分熔融物质发生横向流动,形成巨型的“幔隆”与“幔坳”。处在“幔隆”区的北黄海盆地整体抬升,遭受剥蚀,这一作用一直持续到古新世末。

(3) 始新世—渐新世裂陷阶段。至始新世,太平洋板块向欧亚板块的俯冲运动减慢或处于间歇阶段,中国东部处于松弛—拉张状态,岩石圈发生伸展开裂,形成一组以北北东方向为主的张性断裂系。同时,印度板块与亚洲板块之间开始初步碰撞,中国东部大陆地壳向东漂移,使北北东向断裂进一步拉开,并具有右旋张扭性质,坳陷(凹陷)东西侧产生第一边界断层,它们按北北东方向雁行排列。因此,该时期应是以伸展作用为主并与走滑作用共存的发育时期。

随着北北东向伸展断裂系的发生以及断陷盆地的逐渐形成,深部地幔物质开始被动上涌,引起地壳深部重力和热能不平衡。由于地球是一个均衡体,在拉张、重力和热力调整作用下,沿着已拉开的断裂面做垂直滑动成为主导因素,上盘向下滑动,不断拉张,形成以半地堑为主的盆地结构形式。在半地堑中由于后期沉积物不断增加,差异升降不断加剧,坳陷(或凹陷)不对称,在抬升方向上沉积较薄,下倾部位沉积较厚,断块体发生垂直旋转并形成x型节理面,当基岩面翘倾到一定角度,能克服岩块在斜面上的摩擦力时,岩块(上覆地层)沿着基岩面滑动,上覆地层产生同生断层,这些同生断层往往发生于早期断层上盘,其走向与早期断层大致平行。另一种则发育在基底斜坡上,与主干断层相向滑动,构成地堑型凹陷,如西部坳陷的 F_{58} 断层等。

地质学家马杏垣教授等(1983)认为,地球是一个高度活动体,岩石圈具有层圈结构,构造变形是多成因、多级制、多期次的。因此,本区表现的多期次断裂和岩浆活动,是幕式伸展作用的表现,上部地壳伸展量主要集中于主干断裂带上。

(4) 渐新世末期—新近纪早期构造反转阶段。古近纪末期,太平洋板块西缘俯冲方向由北北西转变为北西西,同时印度板块与亚洲板块之间碰撞产生的北东向挤压应力,使得北黄海地区的构造应力场发生反转,断裂活动由张扭性转变为压扭性,区域升降活动由拉张断陷转变为挤压隆升。该时期的区域性抬升剥蚀,无疑是幕式裂陷末期反转作用的具

体表现。

构造反转形成的动力学机制因素很多,大尺度区域性构造反转,可以认为是由于软流圈对流环的上升和刺穿贯入岩石圈,使区域性质内应力和偏应力发生变化,引起反转,也可以是由板块边界演变时发生的区域性应力变化造成反转(Bott, 1993)。小尺度(局部的)构造反转,往往是由于局部派生应力场的转变或走滑断裂运动方向改变或底辟(泥底辟、盐底辟、火山底辟等)作用引起构造反转。

(5) 新近纪热沉降阶段。这一时期岩浆活动明显减弱,伸展作用趋于停止,沉积盖层厚度不断稳定缓慢增加,在岩石圈的热松弛及重力均衡调整作用下,使裂陷盆地整体下沉,由断陷转为坳陷。

4 结论

(1) 北黄海盆地的构造变形包括伸展构造变形、挤压构造变形、扭动构造变形以及反转构造变形等四类,其中伸展构造变形是北黄海盆地的主体,并以一系列地堑、半地堑式坳陷表现出来。

(2) 北黄海盆地的伸展、挤压与升降作用受控于板块相互作用引起的区域引张与挤压应力场并辅以深部软流圈的微弱上拱隆起作用,其动力学演化过程包括晚侏罗世—早白垩世伸展断陷、晚白垩世—古新世热隆、始新世—渐新世裂陷、渐新世末期—新近纪早期构造反转以及新近纪热沉降等五个阶段。

致谢: 本文所涉及的研究工作得到了中国工程院金庆焕院士、广州海洋地质调查局前任总工程师黄永祥教授、副总工程师吴能友教授和张光学教授以及地科处、矿产所等大力支持和指导,在此深表谢意!

注 释

① 广州海洋地质调查局. 2006. 北黄海盆地地质构造特征研究. 内部资料.

参 考 文 献

- 蔡乾忠. 1995. 中国东部与朝鲜大地构造单元对应划分. 海洋地质与第四纪地质, 15(1): 7~24.
- 蔡乾忠. 2002. 黄海含油气盆地区域地质与大地构造环境. 海洋地质动态, 18(11): 8~12.
- 冯志强, 姚永坚, 曾祥辉. 2002. 对黄海中、古生界地质构造及油气远景的新认识. 中国海上油气(地质), 16(6): 367~373.
- 龚建明, 温珍河, 陈建文. 2000. 北黄海盆地中生代地层的地质特征和油气潜力. 海洋地质与第四纪地质, 20(2): 69~78.
- Kim C S. 1992. 朝鲜周围海域的地震地层学和地质构造. 海洋地质

- 译丛,(3):1~8.
- 赖万忠. 2002. 黄海海域沉积盆地与油气. 海洋地质动态, 18(11):13~16.
- 李乃胜. 1995. 黄海三大盆地的构造演化. 海洋与湖泊, 26(4):354~362.
- 李丕龙. 2000. 断陷盆地油气聚集模式及其动力学特征. 石油大学学报(自然科学版), 24(4):26~28.
- 李廷栋, 莫杰. 2002. 黄海地质构造与油气资源. 海洋地质动态, 18(11):4~7.
- 李文勇, 李东旭, 王后金. 2006a. 北黄海盆地构造几何学研究新进展. 地质力学学报, 12(1):18~26.
- 李文勇, 李东旭, 夏斌. 2006b. 北黄海盆地构造演化特征分析. 现代地质, 20(2):268~276.
- 罗斌杰, 王春江, 董成默. 1995. 朝鲜安州盆地原油地球化学特征. 石油学报, 16(4):40~47.
- 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 汪一鹏. 1983. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造. 地质学报, 57(1):23~26.
- 马寅生, 吴满路, 曾庆利. 2002. 燕山及邻区中生代挤压与伸展的转换和成矿作用. 地球学报, 23(2):115~122.
- 张玉明, 张青林, 王明君, 杨木壮. 2006. 松辽盆地十屋断陷反转构造样式及其油气勘探意义. 地球学报, 27(2):151~156.
- Allen P A, Allen J R. 1990. Basin analysis principles and applications. London: Blackwell Scientific Publications, 422~465.
- Bertram G T, Milton N J. 1989. Reconstructing basin evolution from sedimentary thickness: the importance of palaeobathymetric control, with reference to the North Sea. *Geology*, 2:247~257.
- Cai Qianzhong. 1995. Corresponding division of geotectonic units of Eastern China and Korea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 15(1):7~24(in Chinese with English abstract).
- Cai Qianzhong. 2002. Regional geology and geotectonic environment of petroliferous basins in the Yellow Sea. *Marine Geology Letters*, 18(11):8~12(in Chinese with English abstract).
- Cotton J, Koyi H. 2000. Modeling of thrust fronts above ductile and frictional detachments: application to structures in the Salt Range and Potwar Plateau, Pakistan. *Geological Society of America Bulletin*, 112(3):351~363.
- Dennis J G. 1972. Structural geology. New York: Konald Press, 125~132.
- Faulds J E, Varga R J. 1998. The role of accommodation zones and transfer zones in the regional segmentation of extended terranes. In: Faulds J E, Stewart J h. eds. Accommodation zones and transfer zones: segmentation of the Basin and Range Province. Boulder, Colorado, Geological Society of American Special, 323.
- Feng Zhiqiang, Yao Yongjian, Zeng Xianghui. 2002. New understanding of Mesozoic-Paleozoic tectonics and hydrocarbon potential in Yellow sea. *China Offshore Oil and Gas(geology)*, 16(6):367~373(in Chinese with English abstract).
- Gong Jianming, Wen Zhenhe, Chen Jianwen. 2000. Geological characteristics and hydrocarbon generating potential of Mesozoic strata in the North Yellow Sea basin. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 20(2):69~78 (in Chinese with English abstract).
- Harding T P. 1991. Identification of wrench faults using subsurface structural data: criteria and pitfalls. *AAPG Bulletin*, 75(11):110~120.
- Ingersoll R V, Busby C J. 1995. Tectonics of sedimentary basins. Cambridge: Blackwell, 142~151.
- Kim C S. 1992. Seismic stratigraphy and geological structures in the sea around Korea. Translation on *Marine Geology*, (3):1~8 (in Chinese with English abstract).
- Kuszniir N J, Ziegler P A. 1992. Mechanics of continental extension and sedimentary basin formation. *Tectonophysics*, 5(215):117~131.
- Lai Wanzhong. 2002. Sedimentary basins and petroleum of the Yellow sea. *Marine Geology Letters*, 18(11):13~16(in Chinese with English abstract).
- Li Naisheng. 1995. Tectonic evolution of three basin in the Yellow Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 26(4):354~362 (in Chinese with English abstract).
- Li Pilong. 2000. Accumulating models of of petroleum and their dynamic characteristics in faulted depression basin. *Journal of the university of petroleum, China*, (edition of natural science), 24(4):26~28(in Chinese with English abstract).
- Li Tingdong, Mo Jie. 2002. Geologic structures and petroleum resources of the Yellow Sea. *Marine Geology Letters*, 18(11):4~7(in Chinese with English abstract).
- Li Wenyong, Li Dongxu, Wang Houjin. 2006. Research progress on structural geometry of the North Yellow Sea basin. *Journal of Geomechanics*, 12(1):18~26 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyong, Li Dongxu, Xia Bin. 2006. Characteristics of structural evolution of North Yellow Sea basin. *Geoscience*, 20(2):268~276(in Chinese with English abstract).
- Lin C S, Zhang Y M, Li S T, et al. 2002. Quantitative modeling of multiphase lithospheric stretching and deep thermal history of some tertiary rift basins in eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 76(3):324~330.
- Lobkovsky L I, Cloetingh S, Nikishin A M. 1996. Extensional basins of the former Soviet union structure, basin formation mechanisms and subsidence history. *Tectonophysics*, 5(266):251~285.
- Luo Binjie, Wang Chunjiang, Dong Chengmo. 1995. Organic geochemical characteristics of oils from Anzhou basin, DPR Korea. *Acta Petrolei Sinica*, 16(4):40~47 (in Chinese with English abstract).
- Ma X Y, Liu H F, Wang W X, Wang Y P. 1983. Meso-Cenozoic taphrogeny and extensional tectonics in eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 57(1):23~26.
- Ma Yinsheng, Wu Manlu, Zeng Qingli. 2002. The Mesozoic-Cenozoic compression and extension transformation process and ore-forming process in Yanshan and adjacent area. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(2):115~122.

- Massoud M S, Scott A C, Killops S D. 1991. Oil source rock potential of the lacustrine Jurassic Sim Uuju formation, West Korea bay basin, Part I. *Journal of Petroleum Geology*, 14(4): 365~386.
- Massoud M S, Scott A C, Killops S D. 1993. Oil Source rock potential of the lacustrine Jurassic Sim Uuju formation, West Korea Bay Basin, Part II. *Journal of Petroleum Geology*, 16(3): 265~284.
- Mchargue T R, Heidrick T L, Livingston J. 1992. Episodic structural development of the Central Africa rift in Sudan. *Tectonophysics*, 5(213): 187~202.
- Moores E. 1995. *Tectonics*. New York: W. H. Freeman and Company, 189~201.
- Tapponnier P, Molnar P. 1976. Slip-line field theory and large scale continental tectonics. *Nature*, 264: 319~324.
- Wilcox R E, Harding T P, Seely D R. 1973. Basic wrench tectonics. *AAPG Bulletin*, 57(2): 74~96.
- Withjack M O, Islam Q T, La P R. 1995. Normal faults and their hanging-wall deformation: an experimental study. *AAPG Bulletin*, 79(6): 1~18.
- Xiao H, Suppe J. 1992. Origin of rollover. *AAPG Bulletin*, 76: 509~525.
- Zhang X B, Xu Y C, Sun M L, et al. 2004. Discovery and its geological significance of the mantle-derived helium in the inclusions of the Ordovician oil-bearing reservoir rocks in the Huanghua depression. *Science in China(Ser. D)*, 47(1): 23~29.
- Zhang Yuming, Zhang Qinglin, Wang Mingjun, Yang Muzhuang. 2006. The reverse structural styles in the Shiwu rift depression, Songliao basin, and their oil and gas exploration significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 27(2): 151~156.

Tectonic Deformation Mechanism and Geodynamic Process of North Yellow Sea Basin

LI Wenyong

Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Guangzhou, 510760

Abstract

Based on the structural geometry and kinematics of North Yellow Sea basin, the tectonic deformation style and geodynamic process of North Yellow Sea basin are studied. The result shows that there are four kinds of tectonic deformation for North Yellow Sea basin, including extensional structural deformation, compressed structural deformation, shear structural deformation and inverse structural deformation, etc, and the regional geodynamic setting for North Yellow Sea basin were mainly the regional extension superimposed by horizontal compressing and correlative shearing, which resulted in extensional faulted basin for North Yellow Sea basin with a series of graben and half-graben mode depressions. The extension, compression, elevation and subsidence of North Yellow Sea basin were controlled by regional extensional and compressional stress field caused by interaction of plates and weak uplifting of asthenosphere underneath, and its geodynamic evolution process included five stages such as extensional fault depression in Late Jurassic-Early Cretaceous, thermo-upwelling in late Cretaceous-Paleocene, rifting in Eocene-Oligocene, structural inversion in late Oligocene-early Neogene and thermo-subsiding in Neogene.

Key words: North Yellow Sea basin; tectonic deformation style; geodynamic evolution

