第17卷第4期 石油实验地质 Vol. 17, No. 4
1995年12月 EXPERIMENTAL PETROLEUM GEOLOGY Dec., 1995

渤海湾新生代裂陷盆地的伸展模式及其动力学过程[1]

漆家福 张一伟 陆克政 杨 桥 陈发景

(石油大学,北京 102200) (中国地质大学,北京 100083)

渤海湾盆地是一个新生代裂陷盆地。综合分析盆地区的岩石圈结构及盆地构造特征,大陆岩石圈的伸展变形机制可理解为上部以简单剪切伸展变形为主、下部以纯剪切伸展变形为主的"双层或多层分层伸展模式"。盆地区的构造演化过程中的"事件"序列表明,地幔热作用是控制盆地区裂陷伸展的动力学过程的主要因素,而板块边界作用力传递到盆地区的区域应用场则是深断裂发生走滑活动的动力源。

关键词 伸展模式 动力学过程 裂陷盆地 渤海湾

第一作者简介 漆家福 男 38岁 副教授 石油地质

渤海湾新生代盆地是我国东部的主要产油区之一,同时亦是现代大陆地震比较活跃的区域之一。多年来,我国各部门的地学工作者对这一盆地区的地质-地球物理场特征进行了广泛而深入的研究,并就盆地的形成机制及其动力学过程展开了讨论,提出了多种解释模式及不同的认识。近年来,作者先后对渤海湾地区的下辽河盆地、辽东湾盆地、黄骅盆地等进行了较系统地盆地构造分析,同时广泛研究了整个渤海湾盆地区不同区域的主要地震勘探剖面及有关资料,逐步形成了对渤海湾盆地新生代构造的总体特征的一些初步认识。本文在这些工作的基础上就盆地的形成机制及其动力学过程进行概要讨论。

1 渤海湾盆地主要的地质、地球物理场特征

综合已有的大量地质、地球物理场资料,渤海湾盆地具有以下主要特征:

(1)渤海湾盆地是由6个相对独立的早第三纪裂陷盆地和一个统一的晚第三纪至第四纪拗陷盆地上下叠合而成。每一个早第三纪裂陷盆地又包括若干由基底正断层控制的凹陷和凸起。盆地的主边界断层常只在一侧发育,致使盆地在结构上的不对称性。盆地内的凹陷亦多表现为由旋转平面式、铲式或坡坪式正断层所控制的半地堑结构。断层及基底断块在早第三纪期间的旋转伸展变形清楚地反映在半地堑凹陷的沉积记录中。每一个早第三纪裂陷盆地都可以看作是由一系列旋转的基底正断层组成的伸展构造系统并具旋转伸展变形的特点。其中盆地主边界断层是包容盆地的浅层次地壳伸展构造系统的主干伸展断层,它们向深部延伸很可能在中地壳的韧性层或脆韧转换带中滑脱拆离。整个渤海湾盆地区在宏观上亦表现出旋转伸展变形特点,并具有分区段性。北段的下辽河-辽东湾盆地的主边界断层向北西-北西西倾斜,中段的冀中盆地和黄骅盆地的主边界断层向南东-南东东倾斜,南段的临清

[1] 本文系中国石油天然气总公司项目"中国东部新生代盆地构造模式"成果的一部分

-东濮盆地的主边界断层向北西西倾斜(图 1)。各分区段之间由北西-北西西向调节带或传递断层带衔接在一起。

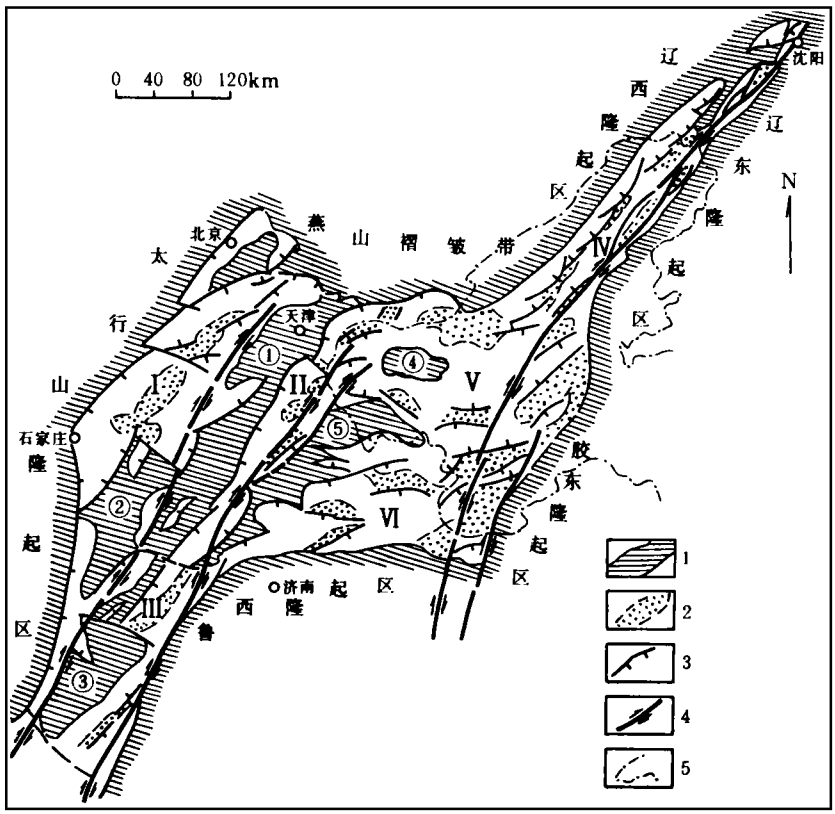

图 1　渤海湾盆地区构造轮廓略图

1. 隆起(区)，缺失下第三系；2. 盆地中的凸起构造(带)；3. 盆地中的凹陷构造(带)；4. 控制盆地或凹陷沉降的主要正断层；5. 盆地中的主要走滑断层；6. 海岸线

Ⅰ. 冀中盆地；Ⅱ. 黄骅盆地；Ⅲ. 临清-东濮盆地；Ⅳ. 下辽河-辽东湾盆地；Ⅴ. 渤中盆地；Ⅵ. 济阳盆地；①沧县隆起；②邢衡隆起；③内黄隆起；④沙垒隆起；⑤埕宁隆起

(2)渤海湾盆地区内存在一些深断裂带。其中以北东-北北东向的“郯庐深断裂”最为醒目，此外还有黄骅-聊城-兰考深断裂、太行山前深断裂等。这些深断裂是盆地的基底弱化带，即早第三纪裂陷盆地是在深断裂基础上发育形成的。但是盆地中的大部分基底正断层(特别是主干伸展断层)似乎与深断裂并无直接关系。前者向深部延伸其产状变缓过渡到中地壳层次的拆离断层面上，深断裂总体上产状较陡且深切岩石圈深部。然而，沿着深断裂带在盆地盖层中发育了带状分布的北北东向右旋走滑的构造带(见图 1)，有些地段走滑断层明显切割伸展断层，其构造变形可以一直影响到上第三纪甚至第四纪地层中(图 2)。

(3)渤海湾盆地区的地壳具水平成层和横向不均匀性。中地壳中存在厚约 5～10km 的低速-高导层，可能是壳内韧性层或脆韧过渡带。早第三纪裂陷盆地对应的地壳厚度及岩石圈厚度相对较小，显示整个岩石圈的伸展变形，且壳下岩石圈的伸展量明显大于地壳伸展

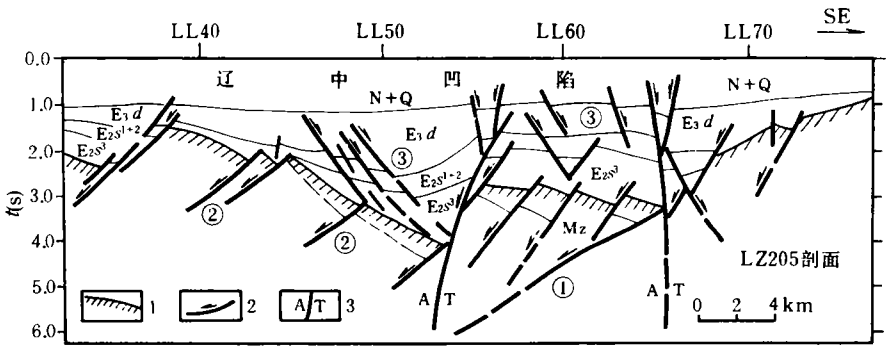

图2　辽东湾盆地中伸展构造与走滑构造的交切关系

（渤海石油公司地震剖面解释）

1.新生代盆地基底；2.伸展断层；3.基底主干正断层（①基底主干正断层；②基底次级正断层；③盖层断层）；3.走滑断层（A：离观察者而去，T：向观察者而来）

量。但岩石圈内（特别是壳内）各界面的隆起轴部并不一一对应[1]，显示岩石圈不同层次间可能存在拆离滑脱面，即使是中下地壳甚至于壳下岩石圈的伸展变形也不是均匀的。

（4）渤海湾盆地是在白垩纪末至古新世初区域隆起背景上发育形成的。早第三纪裂陷初期有较强烈的基性火山岩喷发。裂陷盆地的演化大致可以分为3个裂陷伸展期。孔店组和沙四段代表裂陷伸展Ⅰ期的构造地层组合，沙三段代表裂陷伸展Ⅱ期的构造地层组合，沙二、一段和东营组代表裂陷伸展Ⅲ期的构造地层组合。这3套地层组合之间为微角度不整合或平行不整合接触，表明盆地区在裂陷伸展过程中有间歇性隆升。不同时期盆地伸展构造样式有所不同。在平面上，盆地的构造活动和沉积中心有侧向迁移和轴向迁移两个趋势。侧向迁移是朝着深断裂带对应的走滑构造带方向进行的，轴向迁移则是整个盆地区的两端和边缘向渤中盆地方向发展。

以上这些地质、地球物理场特征将是我们在讨论盆地的形成机制及其动力学过程中应该考虑的。

2　渤海湾盆地新生代大陆伸展模式

近些年来，许多学者相继提出了多种大陆伸展构造模式，用以解释不同地区大陆内部或被动大陆边缘裂陷伸展区的各种地质及地球物理场特征。这些大陆伸展模式启发我们理解渤海湾盆地区新生代构造的形成与演化。基于渤海湾盆地区伸展构造以及地壳岩石圈结构特点，我们认为可以用一种分层拆离的组合伸展模式解释新生代的大陆伸展变形机制，而引起大陆分层剪切伸展的动力源可能来自软流圈热隆起，区域应力场亦对大陆伸展作出贡献。

[1] 刘国林，1992年7月在油气构造研讨会上的报告，石油大学（北京）

图 3 是横穿冀中盆地、黄骅盆地和渤中盆地的大陆构造解释性剖面，表现了如下几个基本观点：

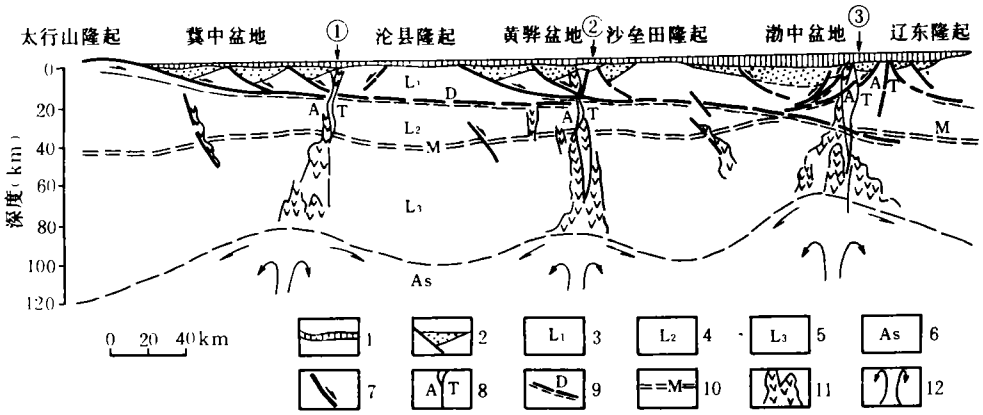

图 3　渤海湾新生代裂陷盆地的大陆岩石圈伸展模式

1. 第四系和上第三系；2. 下第三系；3. 上部地壳脆性伸展构造层（上地壳和中地壳上部）；4. 下部地壳脆性伸展和韧性伸展互层，并有大量基性岩墙侵入；5. 壳下岩石圈韧性伸展层，有基性岩墙侵入和底辟，并且是岩浆源区；6. 软流圈；7. 裂陷盆地中的主干伸展断层；8. 走滑断层及深断裂；9. 中下地壳层中的拆离断层；10. 莫霍面（壳幔界面）；11. 岩浆源区及其通道；12. 软流圈中的热对流及其对上覆岩石圈的拖曳

(1)上层地壳为简单剪切伸展造成不对称的和具掀斜块结构的伸展构造系统，并且控制着早第三纪断陷盆地的形成和演化。

(2)中层地壳内的高导低速层可能构成上层地壳(包括中地壳上部)简单剪切伸展的拆离滑脱界面，但不同区域的拆离断层深度可能有所差异。

(3)下地壳及壳下岩石圈以韧性的纯剪切伸展为主，但其中亦可能存在一些低角度的韧性剪切带使伸展变得不均匀，一些相对能干层则可能表现为“开断裂”并以基性岩墙侵入形式体现其伸展应变，或表现为剪切香肠化，粘滞性香肠化或透镜体化。

(4)壳下岩石圈还有明显的热活动，是盆地区火山活动的岩浆源区。

(5)“深断裂”作为一个垂向构造带，在新生代的活动可能有两种方式。一是“裂开”为深部岩浆上升提供通道，并体现拆离断层下盘的伸展；其二是“走滑”并导致在盆地盖层中形成线性分布的右旋走滑构造带。

这种混合式双层或分层组合伸展模式，在不同层次的岩石圈构造中可以表现为不同的伸展构造样式，容纳不同的伸展量，其中可有多个近水平的拆离滑脱面(层)来进行调节和转换。总体上是韧性层伸展量大于脆性层伸展量，壳下岩石圈伸展量大于地壳伸展量。

关于深部断裂在岩石圈裂陷伸展作用中所起的作用有必要进一步讨论。从浅层构造形态看，盆地区内的走滑构造系统与深部断裂在垂向上保持着密切的联络。因此，“深断裂”作为一种垂向构造带可能没有完成被卷入到由一系列近水平拆离断层控制的伸展构造系统中。换言之，不同层次的伸展构造系统没有破坏“深断裂”作为垂向构造带的结构特征。因而

在"深断裂"位置，上部岩石圈与下部岩石圈之间并没有大规模的相对位移。下部岩石圈发生的相对均匀的韧性伸展通过近水平的拆离断层将其伸展应变传递到上部岩石圈的伸展连锁断层系统中。上部岩石圈与下部岩石圈的拆离滑脱方式可能极为复杂多样，拆离断层相当于近水平的传递断层或转换断层联系着上、下不同形式的伸展构造，也联系着伸展构造与深断裂走滑构造。另一方面，"深断裂"是新生代火山活动的集中地带，表明它作为深部热输出的主要通道在新生代裂陷伸展作用中占有重要地位。

3 渤海湾新生代盆地形成和演化的动力学过程

一般认为，裂陷作用有两种极端的动力学机制，即"主动断裂"机制和"被动断裂"机制。前者是指由于软流圈热对流、热底辟并导致岩石圈发生热膨胀隆起和区域性裂陷作用，后者是指由于区域引张应力场导致发生裂陷作用。在理论上，这两种裂陷作用机制造成的裂陷盆地的演化过程可能有不同的"事件"序列。主动裂陷机制的地幔热异常出现于裂陷盆地形成之前，软流圈局部隆起及相伴发生的热对流和热底辟驱动岩石圈发生裂陷伸展，因而可能出现"热隆起"→"火山活动"→"裂陷沉降"→"热沉降"等事件序列。在被动裂陷机制中，任何地幔热异常都是裂陷作用的反映，因而可能出现"裂陷沉降"→"热隆起"(?)→"活山活动"(?)→"均衡沉降、热沉降"等事件序列。但是，正如 Ramberg 和 Morgan(1984)指出，裂陷作用的主动机制与被动机制不可能是彼此孤立的，主动机制可能被一种决定裂陷时间(亦包括裂陷区位置和裂陷方向等)的被动机制所控制，而被动机制引起的地幔热作用亦可能使被动裂陷向主动裂陷转化。因此，裂陷盆地的形成过程中，裂陷作用既有"主动"成分，亦有"被动"成分，并且在不同阶段可能表现为以不同的动力学机制占优势。渤海湾盆地区的早第三纪裂陷盆地在演化历史上经历了穹窿作用(晚白垩世－古新世)→火山作用(古新世－始新世相对强烈，渐新世次之)→裂陷伸展作用(始新世相对强烈，渐新世次之)→热沉降作用(晚第三纪－第四纪)。这与一些主动裂陷机制产生的典型事件序列相似，同时上层岩石圈的脆性伸展构造及裂陷盆地与下部岩石圈韧性伸展构造及软流圈隆起有较好的对应关系(至少就目前的资料来看是这样的)，说明裂陷作用的动力学过程中"主动裂陷"机制占有较多成分。软流圈局部热隆起及热脉动可能是导致裂陷作用发生的主要动力源。另一方面，渤海湾盆地区位于亚洲大陆东部边缘，新生代时期太平洋板块往北西西向俯冲于亚洲大陆岩石圈之下，印支板块向北推移与亚洲大陆碰撞，这些边界作用力亦必然对渤海湾新生代裂陷作用产生直接或间接的影响。

基于上述基本设想，试对渤海湾盆地新生代裂陷作用产生的的动力学过程作以下简要分析：

(1)晚白垩世－古新世，渤海湾地区出现大范围的地幔热异常，造成岩石圈热膨胀隆起。由于先存的地壳结构不均一性，使深部热活动呈现不均匀现象，先存的构造软弱带是热活动相对强烈的部位。这一时期太平洋板块与东亚大陆的 B 型俯冲作用对渤海湾地区的地幔热异常活动有至关重要的影响。其一是由于古太平洋板块俯冲至大陆下，对深部(软流圈或更深的层次)热对流体制的改造和破坏；其二是大陆岩石圈深部新的热活动(热对流)体制的形成受到俯冲边界力的影响(即对地幔热活动的时间、地点、方向的控制)。从某种意义上说，将

渤海湾新生代盆地视为“弧后裂陷盆地”也是可以接受的。

(2)始新世－渐新世，软流圈物质强烈上升沿深断裂带形成北北东向深部隆起带，并在软流圈热底辟作用及热物质侧向流动产生的拖力作用下使岩石圈发生裂陷伸展。上地幔的局部溶融产生玄武岩岩浆沿深断裂侵入地壳、喷溢出地表，地壳在引张伸展过程中发生断裂和均衡下沉形成裂陷盆地。由于岩石圈的引张强度呈分层性特点，不同层次的伸展形式和伸展量可不同，具有分层拆离组合伸展的特征。相对韧性层起着拆离滑脱和调节伸展应变的作用。总体上是下部岩石圈以韧性伸展为主，且伸展量较大，分配比较均匀；上部岩石圈以脆性伸展为主，伸展量相对较小，集中分配在主断层带上。又因为深部热活动具脉动性及具成层结构的岩石圈在垂向上传递应变时具有波动性，伸展作用有幕式特点。

(3)晚第三纪－第四纪，岩石圈的热松弛及重力均衡调整使裂陷盆地整体下沉，由断陷转化为拗陷。这一期间岩浆活动显著减弱，标志着深部热活动衰减，裂陷盆地的整体下降与岩石圈的冷却下沉有关。由于裂陷阶段下部岩石圈的伸展区域及深部热异常区域大于上部岩石圈的伸展区域(即断陷盆地的范围)，使岩石圈热松弛引起的拗陷区域范围更大些，并超越盆地边界断层形成剖面上的“牛头式”(steer's head)的几何特征。

4　几个有关构造动力学问题的讨论

以下对几个有关问题作进一步讨论。

(1)渐新世时期沿盆地区一些北北东-北东向深断裂带叠加了走滑作用，晚第三纪－第四纪时期走滑作用仍有表现。产生走滑作用的原因主要是板块边界力传递到板内的区域应力场作用的结果，而不应归于“主动机制”的裂陷作用。渤海湾盆地区存在的 3 条北北东向右旋走滑断层带，新生代的构造活动强度有自东向西递减的趋势，这可能意味着主要受亚洲大陆东部边缘与太平洋板块西缘的板块边界演化的影响。深部热隆起沿轴向扩张亦对盆地区某些地段的右旋走滑剪切活动作出贡献，但不是其主要力源。深部资料表明，以渤中为中心分布有 3 条地幔隆起带及软流圈隆起带(即下辽河－辽东湾方向、渤海湾－歧口方向、莱洲湾－潍北方向)。如果深部热活动沿深部隆起倾伏方向产生的轴向扩展是产生走滑活动的主要力源，在莱洲湾－潍北地区的“郯庐深断裂”(在这一地区深断裂亦位于新生代裂陷盆地东侧)及黄骅盆地中的深断裂应出现相应的左旋走滑现象。而事实正好相反，在淮北及沂沭地区沿郯庐深断裂带新生代亦有大量右旋走滑构造出现并略兼挤压性质。甚至整个华北地区新生代时期北北东-北东向构造均兼有相同的右旋走滑活动特点，相应的区域性北西西-北西向构造则有左旋走滑活动的特点，这说明走滑作用是区域应力场的反应。它是盆地区“主动裂陷”的内应力相对减弱，传递到裂陷区的板块边界力作用相对增强的表现。

(2)具韧性或脆韧过渡性质的壳内低速层，在盆地区及周围山区均有分布，它们是裂陷作用前地幔热异常活动的产物。高的地温梯度可以使岩石圈的引张强度呈现韧脆分层性，是壳内韧性层形成的原因之一。壳内低速层在山区的厚度大于盆地区(下辽河盆地区甚至没有明显的壳内低速层)，正说明裂陷作用使盆地区的壳内韧性层伸展减薄。

(3)盆地区的一些伸展断层具铲式正断层的几何形态。铲式正断层的形成机制，与地壳物质的力学性质自浅层向深层由脆性向韧性变化的总趋势及围压自浅而深逐渐加大等因素

有关。盆地区的部分断层可能是继承前新生代断层(如印支-燕山期的一些逆断层)重新活动,但只有那些在产状和分布部位上能适应新生代力学体制的"老"断层才能继续以新的方式活动,大部分断层应该是新生的。而新生断层在裂陷盆地的演化过程中也部分被废弃、部分成为长期活动的主干断层,其中应力场方向及地壳伸展量等决定着断层系统的演化。如盆地发育早期产生很多基底断层,当某些基底断层演化成为主干断层后其他的一些断层则相继夭折不再活动。

(4)造成浅层地壳断块的旋转伸展变形,可能受控于深部地幔韧性伸展的单向式蠕动及壳幔间和壳内层间的单向式滑移。深部构造亦并非对称的,软流圈物质的不对称式扩展蠕动,拖曳上地壳发生不对称式伸展。岩石圈各层次都可能存在一些低角度剪切面。从某种意义上讲,上层地壳的伸展断层可看作是深层岩石圈中拆离滑脱面的反向或同向调节断层,它们之间的关系犹如浅层地壳中反向或同向调节断层与主断层之间的关系一样。

(5)裂陷作用、沉降-沉积中心的转移可能受多种因素支配,其中深部作用是主要的控制因素。地幔热异常中心部位热输出量较大,但热扩散引起的水平张应力却相对较小,热异常周围地区的热水平传导扩散引起的水平张应力则相对较大,因而浅层地壳的裂陷作用可能是从区域性的地幔热异常周缘地区开始的。另一方面地幔热异常带直接影响伸展作用的拆离滑脱深度,即热异常值低则拆离面深度相对较大。而拆离面深部愈大断陷伸展期的沉降幅度也愈大。相反,热异常值高的地区其热沉降幅度也相对大一些。渤中地区是新生代地幔物质上涌中心,新生代沉积中心有各自盆地集中向渤中迁移的现象,这可能是受深部热活动控制的。

(收稿日期:1994年7月30日)

参 考 文 献

1 朱夏.中国东部板块内部盆地形成机制的初步探讨.石油实验地质,1979,1(1)

2 王鸿祯等.中国东部及邻区中、新生代盆地发育及大陆边缘区的构造发展.地质学报,1983,57(1)

3 马杏垣等.中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造.地质学报,1983,57(1)

4 陈发景.中国东部第三纪含油气盆地的性质、演化和形成机制.中国中新生代盆地构造与演化,北京:科学出版社,1983,78～83

5 刘国栋.华北平原新生代裂谷系的深部过程.现代地壳运动(1)-大陆裂谷与深部过程,北京:地震出版社,1985,17～25

6 漆家福等.渤海湾盆地新生代构造样式.首届石油勘探新进展国际学术讨论会论文集,地质出版社,1994

7 杨桥等.黄骅盆地新生代构造特征.应用基础与工程科学学报,1993,1(1)

8 漆家福,陈发景.辽东湾-下辽河裂陷盆地的构造样式.石油与天然气地质,1992,13(3)

9 漆家福等.渤海湾盆地新生代构造演化.石油大学学报(自然科学版),1994

10 漆家福等.辽东湾-下辽河盆地新生代构造运动学及其演化特征.现代地质——中国地质大学研究生院学报,1994,8(1)

11 Mckenzie D P. Some remarks on the development of sedimentary basin. *Earth Planet Science Letters*, 1978, 40(1): 25～32

12 Wernicke B. Low-angle normal faults in the Basin and Range province: nappe tectonics in an extending orogen. *Nature*, 1981, 291: 645～648

13 Lister G S., theridge E A. and Symonds P A. Detachment models for the formation of passive continental margins.

Tectonics, 1991, 10(5): 1036～1064

14 Ramerg J B. and Morgan P. Physical charateristics and evolutionary trends of continental rifts. In: Proceedings of the 27th International Geological Congress. *Tectonics*, 1984, 7: 165～216 VNU Sciences Press.

15 Molnar P. and Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental colision. *Science*, 1975, 189: 419～426

16 Kusznir N J. and Park R G. The extensional strength of the continental lithosphere: its dependence on geothermal gradient, and crustal composition and thickeness. In: Coward M P., Dewey J F. and Hancock P L. eds., Continental Extensional Tectonics, *Geological Sociaty Special Publication*, 1987, (28): 35～52

17 White N. and Mckenzie D. Formation of the "steers head" geometry of sedimentary basin by differential streching of the crust and mantle. *Geology*, 1988, 16(3): 205～253

18 徐杰等. 华北平原新生代裂谷盆地的演化及运动学特征. 现代地壳运动(1)-大陆裂谷与深部过程, 北京: 地震出版社, 1985, 26～40

19 国家地震局监测司编. 中国大陆深部构造的研究与进展. 北京: 地震出版社, 1988

20 漆家福. 林县盆地新生代伸展构造. 现代地壳运动(1)-大陆裂谷与深部过程, 北京: 地震出版社, 1985, 107～117

21 陈强. 铲式断层的构造力学分析. 地质学报, 1987, 61(2)

22 Jackson J A. and Mckenzie P P. The geometric evolution of normal fault systems. *Journal of Strutural Geology*, 1983, 5(5): 47～482

23 Ivins E R., Dixin T H. and Golombek N P. Extentional reactivation of abandoned thrust: a bound on shallowing in the brittle regime. *Journal of Structural Geology*, 1990, 12(3): 303～314

24 Etheridge M A. On the reactivation of extentional fault systems. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* A317, 1986: 179～194

25 Morley C K. Extention, detachment and sedimentation in continental rifts (with particular reference to East Africa). *Tectonics*, 1989, 8(6): 1175～1192

EXTENSIONAL PATTERN AND DYNAMIC PROCESS OF THE CENOZOIC RIFTING BASIN IN THE BOHAI BAY

Qi Jiafu　Zhang Yiwei　Lu Kezheng　Yang Qiao

(*Petroleum University, Beijing*)

Abstract

The Bohai Bay Basin is a Cenozoic rifting one. Based on a synthetic study of the lithospheric structure and basinal tectonic characteristics of the basinal area, the extensional deformation of the continental lithosphere can be interpreted as a double or muliple layered extensional pattern, which is dominated by simple shear extensional deformation in the upper part and pure shear extensional deformation in the lower part. Thermal action within the mantle is a major factor which controls the dynamic process of rifting extension in the basinal area, as shown by the "event" sequences of the tectonic evolution process in the basinal area. Nevertheless, the strike-slip of the deep fault is driven by regional stress field formed by plate boundary effort transferring to the basinal area.