

# 渤海海域中郯庐深断裂带的结构模型 及新生代运动学

漆家福<sup>1</sup> 周心怀<sup>2</sup> 王谦身<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国海洋石油公司渤海分公司, 天津 300452; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要:** 郯庐深断裂带自安徽庐江—山东郯城、沂水、安丘一线向北延伸进入渤海海域被新生代盆地沉积层和海水覆盖。根据区域重、磁力异常图解释的渤海海域的郯庐深断裂带位于莱州湾—渤海东部—辽东湾东部一线, 总体走向 NNE, 对应于渤海海域 NNE 向地幔隆起带的东部斜坡。渤海海域新生代盆地与地幔隆起呈镜像反映, 构成古近纪断陷的边界断层包括 NE 向、NNE 向、NEE 向、NW 向和 NW 向等多个方向, 且多表现出铲式正断层的几何学、运动学特征。渤海海域新生代盆地在莱州湾—渤海东部—辽东湾东部发育有由 2~4 条走向 NNE 向、陡倾斜的基底走滑断层及相关构造变形组成的右旋走滑构造带, 位置与区域重磁资料解释的郯庐深断裂带大致相当。综合深层地壳结构和新生代盆地构造特征有理由认为, 渤海海域中新生代盆地中的走向 NNE 向、陡倾斜的基底走滑断层构造带的与深层至少切割莫霍面的深断裂带构成了一条地壳尺度垂向的强变形构造带。渤海海域的郯庐深断裂带在新生代时期郯庐断裂带并非只发生右旋走滑运动, 在区域裂陷作用中控制古近纪断陷的伸展断层可能利用了深断裂带在浅层地壳的部分断层面, 并且因为伸展位移在中地壳层中发生拆离滑脱, 而深断裂带的右旋走滑位移才使浅层断层与深层断层保持紧密联系。

**关键词:** 深断裂; 伸展构造; 走滑构造; 渤海海域; 郯庐断裂带

**中图分类号:** P542+.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2010)05-1231-12

自从 20 世纪 50 年代原地质部航测大队通过航磁测量发现郯城—庐江断裂带(简称郯庐断裂带)以来, 国内外许多学者对这一断裂带的几何结构、构造演化和形成机制进行了深入的研究<sup>[1-10]</sup>。大量研究成果表明, 郯庐断裂带的延伸长度不只限于安徽庐江—山东郯城, 在鲁中地区的地面露头上表现为控制临沂—沂水和莒县—安丘两个平行的 NNE 向中生代地堑的边界断层, 继续向北进入莱州湾、渤海海域, 被新生代盆地沉积层和海水覆盖。关于安徽、山东境内的郯庐断裂带的结构和中、新生代演化已有大量论述<sup>[11-12]</sup>, 而且主要结论渐趋一致, 即: (1) 郯庐

断裂带是一条至少切穿地壳(切割莫霍面)的深断裂带; (2) 郯庐断裂带在中生代有大规模的左旋走滑位移, 也有正断层位移和逆冲断层位移, 不同时期的运动性质有明显变化, 同一时期不同区段的运动性质也有差异; (3) 郯庐断裂带形成和演化与印支运动期间华南—华北陆块的碰撞以及中、新生代时期西太平洋板块体系的演化有密切关系, 前中生代的区域构造背景为郯庐断裂带的形成奠定了基础。但是, 关于郯庐断裂带在莱州湾—渤海—辽东湾海域的延伸以及新生代运动性质仍然存在不同的认识<sup>[13-29]</sup>。本文根据区域重磁异常和油气勘探资料来讨论渤海海

收稿日期: 2010-05-12; 改回日期: 2010-09-07

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX05009-001)和国家自然科学基金面上项目(40772085)资助

作者简介: 漆家福, 男, 1957 年生, 教授, 长期从事盆地构造分析教学和科研工作; E-mail: qijiafu@cup.edu.cn。

域郯庐断裂带的结构模型及新生代运动学特征。

### 1 区域重磁异常资料显示的渤海海域郯庐断裂带深部结构

在航磁 $\Delta T$ 异常图上(图1),渤海海域东侧有一系列NNE-NE向长轴型呈串珠状排列的正磁异常带,被认为是郯庐断裂带在渤海海域的延伸<sup>[3]</sup>。该磁异常带东西两侧的区域磁异常特征有明显差异,东侧的胶辽—南黄海以负磁场异常区域更大,异常长轴以NE向为主,西侧以正磁异常分布区域更明显,异常长轴以NNE向和NW向为主。

在布格重力异常图上,莱州湾—渤海东部—辽

东湾东部表现为NNE向延伸的重力梯度带。在滤波尺度为125 km的深层剩余重力异常图(图2)中,莱州湾—渤海东部—辽东湾东部有一条贯穿全区的重力梯度带,其区域位置与磁异常特征推测的渤海海域郯庐断裂带一致,断裂带以东的广大地区为走向近EW向、NE-NEE向的线性正异常区;以西为NNE向的线性正异常区,且异常幅度明显小于东部地区。在滤波尺度为20 km的浅层剩余重力异常图(图3)中,莱州湾—渤海东部—辽东湾东部的NNE向梯度带依然清晰可见,且该带以东地区的重力异常以NE向延伸占优势;以西地区则表现为NNE和NW向延伸交织的基本特征。综合区域重磁异常

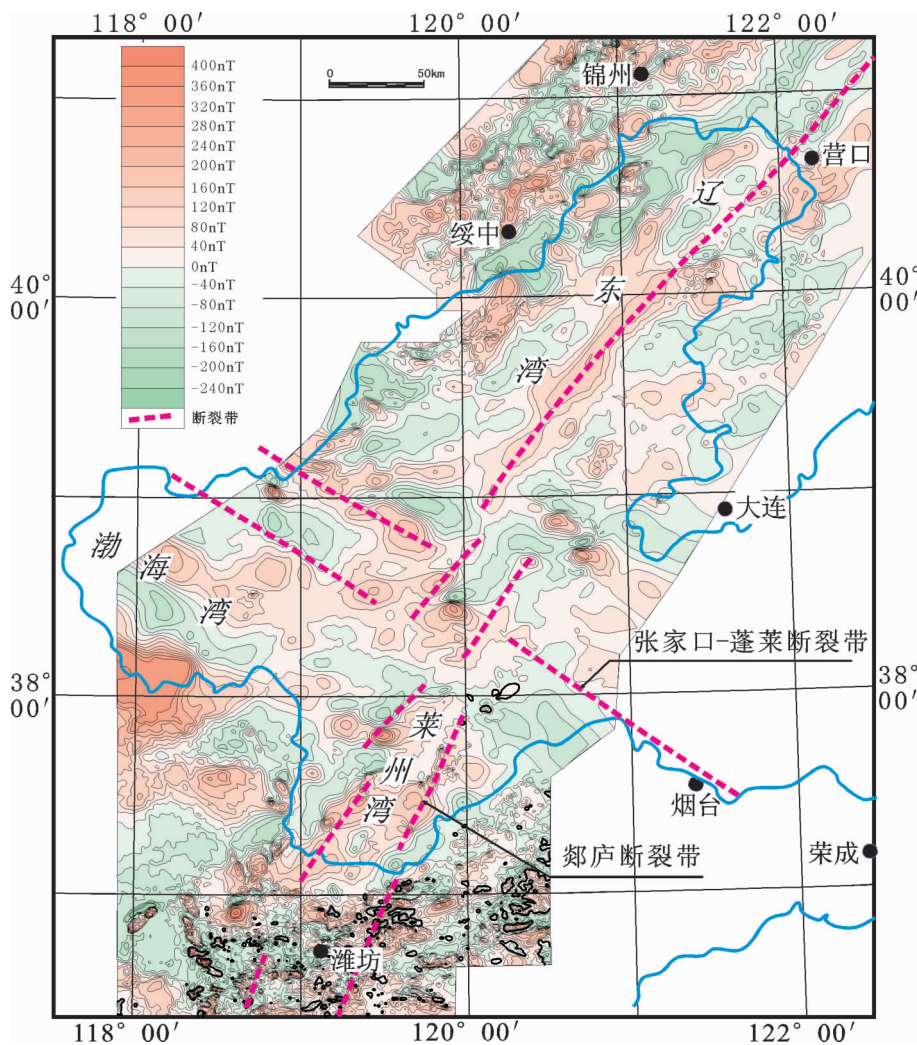


图1 渤海海域航磁异常分布图  
(据渤海油田资料简编)

Fig.1 Distribution of aeromagnetic anomaly in Bohai Sea area  
(compiled from data of the Bohai Petroleum Company)



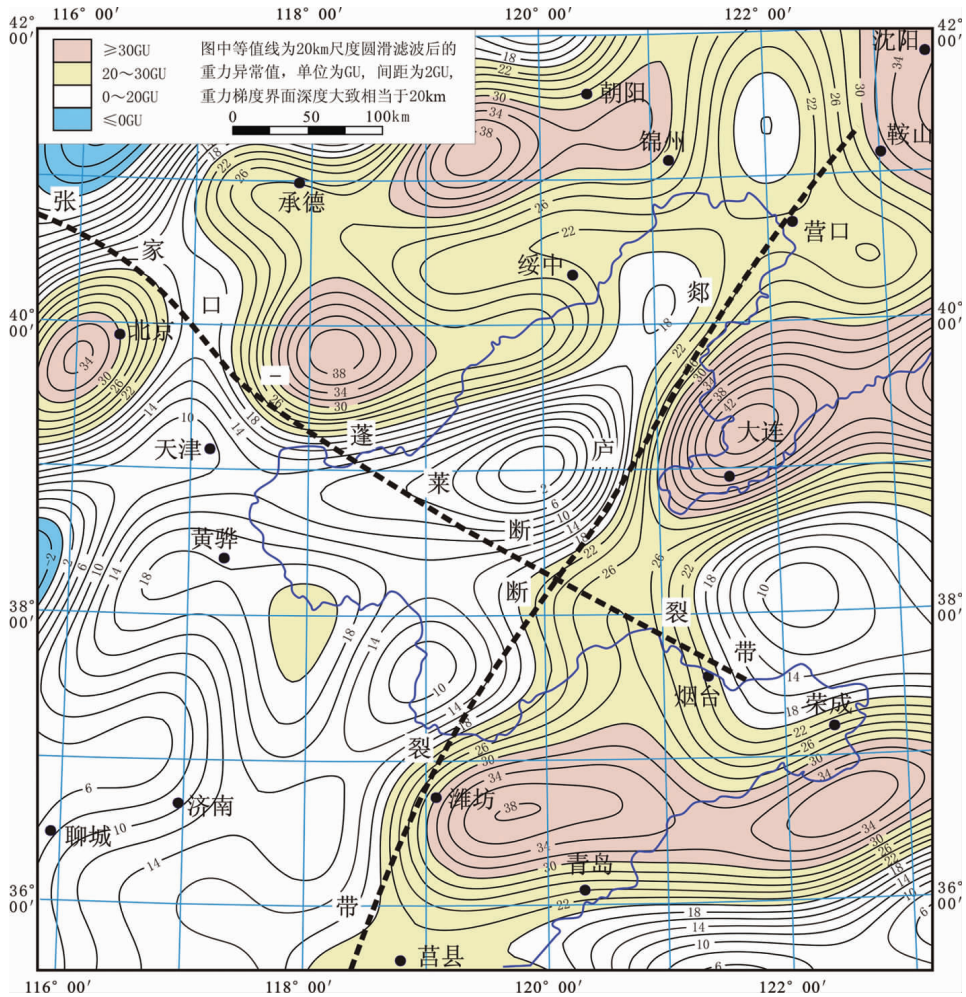


图 2 渤海海域 125 km 尺度滤波剩余重力异常分布图

Fig.2 Distribution of residual gravity anomalies filtered at the 125 km scale in Bohai Sea area

特征以及前人研究成果<sup>[13-16]</sup>,基本可以确认渤海海域中的郯庐深断裂带是沿着莱州湾—渤海东部—辽东湾东部一线延伸的。在区域地球物理异常体走向、幅度和特征等方面资料表明,郯庐深断裂带东西两侧的区域地壳结构有一定的差异。

对比深、浅层剩余重力异常图(图 2~3)可以看出,渤海海域的郯庐断裂带的深、浅层位置有一定的差异,并且明显具有分段特征。重力异常解释的地壳深层的郯庐断裂带在整个渤海海域东部的线性延伸相对较好、走向相对稳定,而地壳浅层的郯庐断裂带在平面上则表现为平行、斜列、分叉的多条断裂组成。在莱州湾地区段根据剩余重力异常解释的郯庐断裂带深、浅层位置有一定的差异,深层相对较窄,连续性较好,浅层明显变宽,可能由大致平行的 2~3

条断裂组成。从莱州湾向北至渤海东部,郯庐断裂带深浅层结构差异明显,渤南海地区浅层地壳中 NNE 向延伸的郯庐断裂带似乎被 NWW 向延伸的张家口—蓬莱断裂切错,渤海东部浅层地壳中多条左阶斜列的 NE 向断层收敛成 NNE 向延伸的断裂带,而深层的郯庐断裂带总体上为 NNE 向延伸。在辽东湾地区根据剩余重力异常解释的深浅层郯庐断裂带位置基本一致,位于辽东湾东部边缘,断裂带相对较窄。继续向北,郯庐断裂带主破裂带应该从辽河拗陷东部凹陷通过。在横穿下辽河平原的深地震测深剖面 and 综合地质地球物理资料建立的地学断面中,辽河拗陷深部的莫霍面总体上与新生代盆地基底呈镜像反映,但是辽河拗陷东部凹陷对应的地壳内部反射不清晰,被认为是郯庐断裂带中新生代长期活

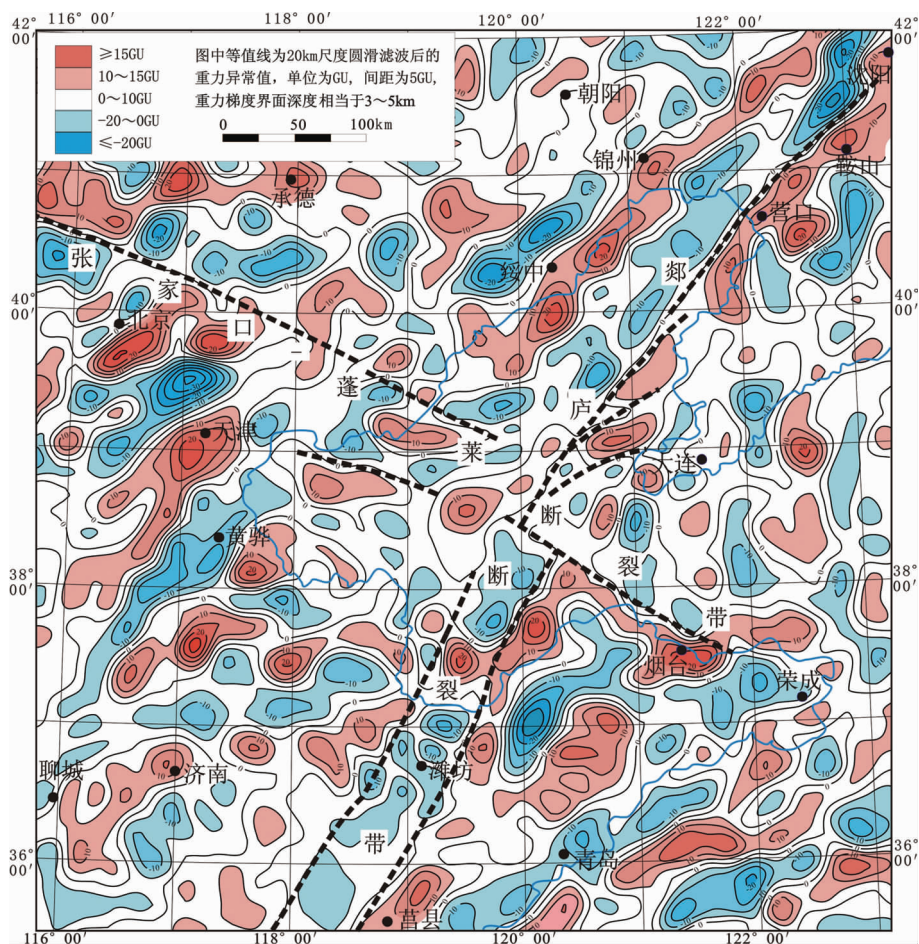


图3 渤海海域 20 km 尺度滤波剩余重力异常分布图

Fig.3 Distribution of residual gravity anomalies filtered at the 20 km scale in Bohai Sea area

动造成的地壳结构上的不连续<sup>[2,17]</sup>。

## 2 新生代盆地构造图显示的渤海海域郟庐断裂带结构

渤海海域是渤海湾新生代裂陷盆地的一部分,盆地内部发育大量断裂,包括基底断层和盖层断层。从渤海海域古近系底面构造图(图4)可以看出,渤海海域新生代盆地基底断裂包括NNE向、NE向、NW向、近SN向和近EW向等走向的多组断层。其中,NNE向、NE向、NW向基底断层构成裂陷盆地内部地堑、半地堑的边界断层,在古近纪表现为同沉积正断层特征。但是,亦有一些陡倾或近直立的NNE向、NW向、近SN向和近EW向基底断层,在剖面上与分支断层组合为典型的花状构造样式,在平面上则呈线性延伸,具有走滑断层特征。在渤海海域新生代盆地东部边缘自莱州湾至辽东湾东部发育

有一系列NNE向、近SN向走滑断层构成的走滑断裂带<sup>[18-23]</sup>,它们可能是渤海海域郟庐断裂带在新生代盆地中的直接表现,其东西两侧的裂陷盆地构造特征有显著差异,东侧发育一系列由NE走向、向SE倾斜的铲式正断层控制斜列的半地堑系,西侧在辽东湾地区发育由NNE走向、向NW向倾斜的铲式正断层控制斜列的半地堑系,在渤南地区和济阳拗陷发育由NW走向、向SW倾斜的铲式正断层控制斜列的半地堑系,在渤中地区则显示由多组断层控制的复杂地堑、半地堑构造<sup>[18-25]</sup>。NW向、近EW向走滑断层主要分布在渤海西北部和东南部边缘,在新生代盆地基底的连续性相对较差。

渤海海域新生代盆地中的盖层断层大致可以分为两类:一类主要发育在古近系盖层中,直接或间接与基底伸展断层连锁在一起;另一类主要发育在新近系—第四系盖层中,主要沿着基底断裂带发育。从



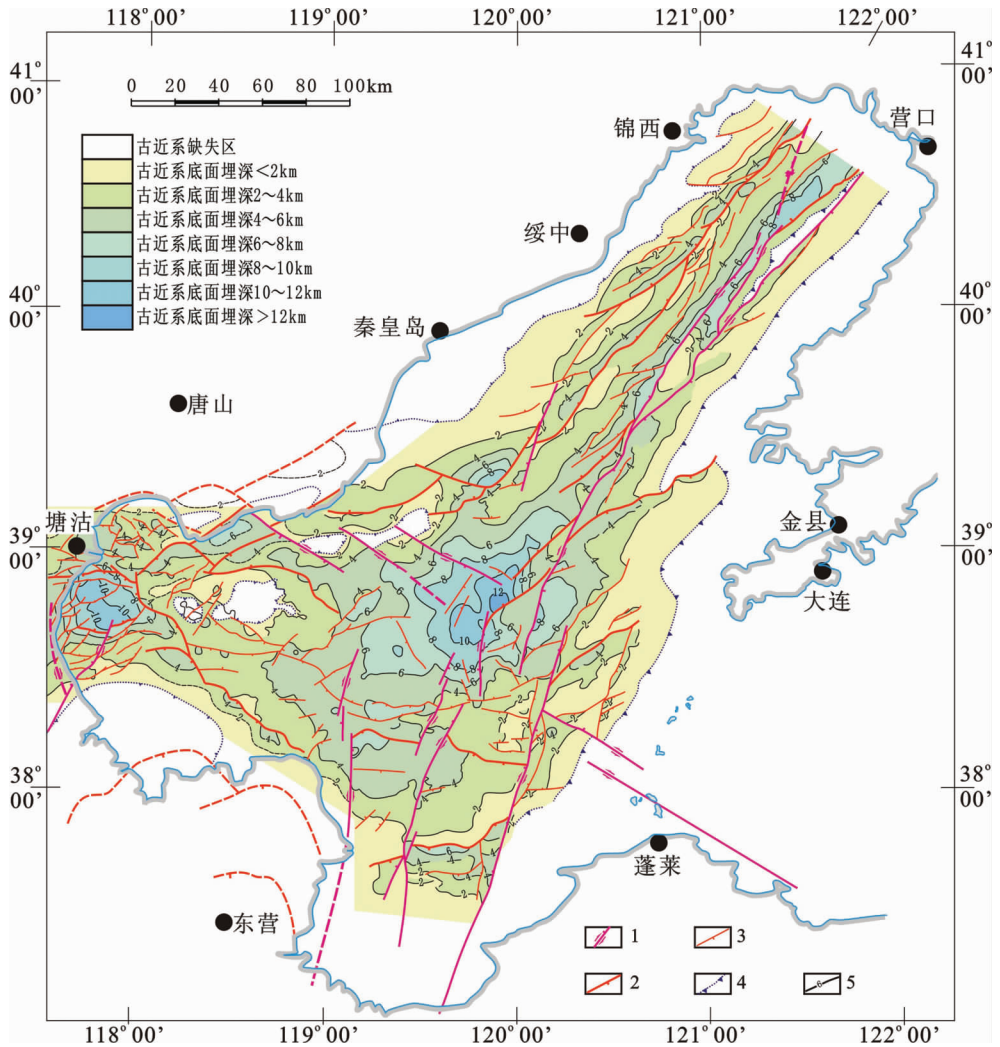


图 4 渤海海域古近系底面主要基底断裂分布图

(根据中海油天津分公司编制的渤海海域古近系底面构造图简化)

1—基底主干走滑正断层;2—基底主干伸展断层;3—基底次级伸展断层;4—古近系尖灭线;5—古近系底面深度,单位 km

Fig.4 Distribution of major basement faults in the Paleogene subface of Bohai Sea area (simplified after Tianjin Branch Company of CNOOC.)

1— Major strike-slip basement fault; 2—Major extensional basement fault; 3— Secondary extension basement fault; 4— Paleogene pinch-out; 5—Depth of Paleogene subface (km)

渤海海域明化镇组上段底面构造图(图5)可以看出,渤海海域新近系中发育的盖层断层包括NNE向、NE向和近EW向3组,其中NNE向、NE向盖层断层多是基底断层向上的分支断层,而大量近EW向盖层断层分布在NNE向基底走滑断裂带两侧及上覆盖层中。

### 3 渤海海域郯庐断裂带剖面结构模型

在下辽河平原横穿郯庐断裂带的地壳探测成果

也表明郯庐断裂带在深层地壳中的主破裂带位于辽东湾—下辽河NNE向地幔隆起带的东侧边缘,与下辽河坳陷东部凹陷的位置一致<sup>[23]</sup>,但是难以判断盆地构造中哪条基底断层与深部断裂直接联系。盆地中的基底断层、特别是控制古近纪断陷的主边界断层多表现为铲式正断层的几何学、运动学特征,它们向深层延伸可能在中地壳层中拆离滑脱。分析深层地球物理资料解释结果与新生代盆地构造图特征,可以得出关于渤海海域郯庐断裂带结构特征的

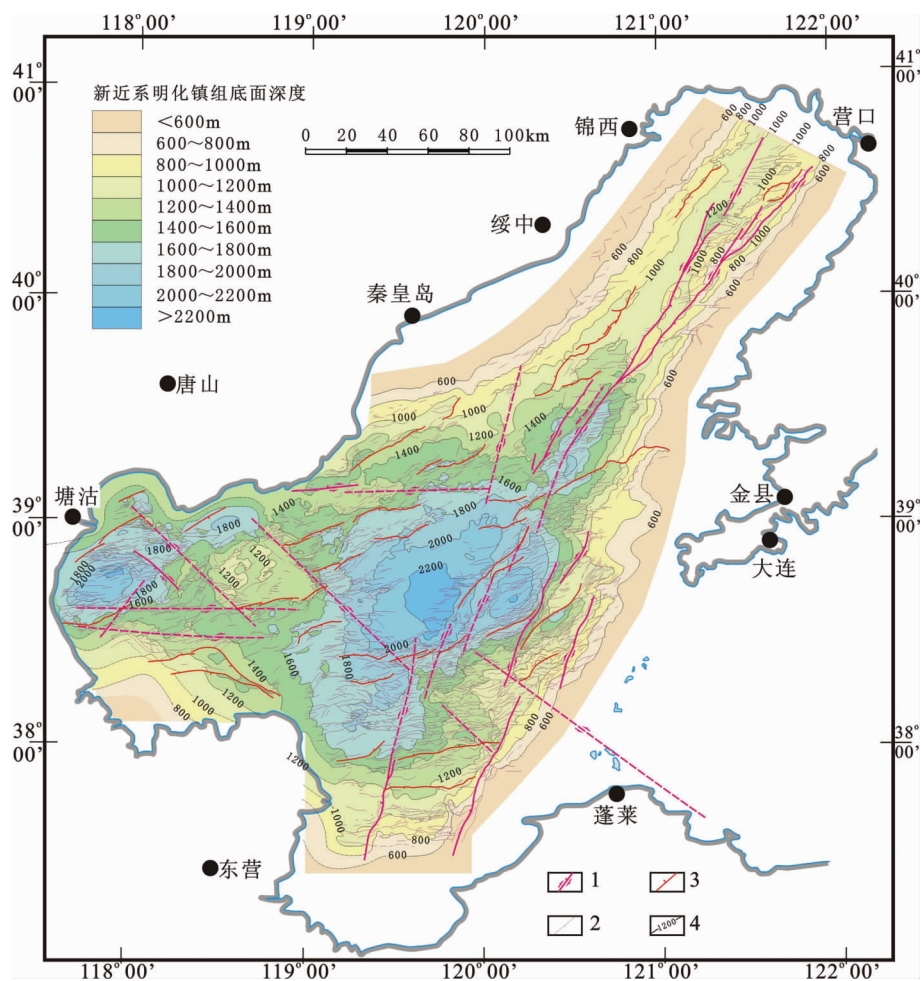


图5 渤海海域新近系明化镇组主要盖层断裂分布图

(根据中海油天津分公司编制的渤海海域明化镇组构造图简化)

- 1—主干走滑断层,虚线为推测的走滑断层;2—主干正断层(包括主要盖层正断层);3—次级盖层正断层;  
4—古近系明化镇组底面深度,单位:m

Fig.5 Distribution of major faults in the capping bed of Minghuazhen Formation  
(simplified after Tianjin Branch Company of CNOOC)

- 1— Major strike-slip fault, dashed line showing inferred strike-slip fault; 2— Major normal faults (including major normal faults in covering bed); 3— Secondary normal fault in capping bed; 4— Depth of the subsurface of Minghuazhen Formation (m)

两点认识:第一,渤海海域中的郯庐断裂带的大致位置应该是沿莱州湾—渤海东部—辽东湾东部边缘呈NNE向延伸,对应于新生代盆地的潍北凹陷、莱北凹陷、渤东凸起、辽东凸起等构造单元;第二,NNE向的“郯庐深断裂带”是一条垂向的区域地壳构造单元,新生代盆地中部分走向NE-NNE向、陡倾斜的断裂向地壳深层延伸可能会归并到深层断裂带中,但是并不一定意味着浅层断裂与深层断裂直接连接在一起。

在渤海海域新生代盆地中广泛分布大量不同方

向的基底断层。在结构上,将盆地构造层中某些断层厘定为郯庐深断裂带的断层是十分困难的,也是不科学的,但是可以确认一些断层在几何学、运动学上与郯庐断裂带的深层断裂有更密切的关系<sup>[18-20]</sup>。一条深断裂带在平面上沿走向可以发育不同形式的横向、斜向构造变换其位移和位态,在剖面上也可以发育近水平的分层性构造来调节深层断裂与浅层断裂之间的变形。图6是综合深、浅层各种地球物理资料解释建立的郯庐断裂带在辽东湾、渤海东部、莱州湾的结构模型。这一模型表达的基本概念是渤海海域

的郯庐深断裂带是一条 NNE 向地壳尺度的垂向强变形带。

### 4 渤海海域郯庐断裂带新生代运动学特征

郯庐断裂带具有多期次、不同性质的复杂活动

历史。关于渤海海域郯庐断裂带新生代运动学特征前人已有大量的讨论<sup>[16-41]</sup>。多数学者认为渤海海域新生代盆地构造显示出郯庐断裂带具有右旋走滑运动学特征,而争论的焦点是右旋走滑运动发生的时间,而没有发生右旋走滑运动时的运动形式的探讨。一种观点认为渤海海域、特别是辽东湾、渤东、莱州

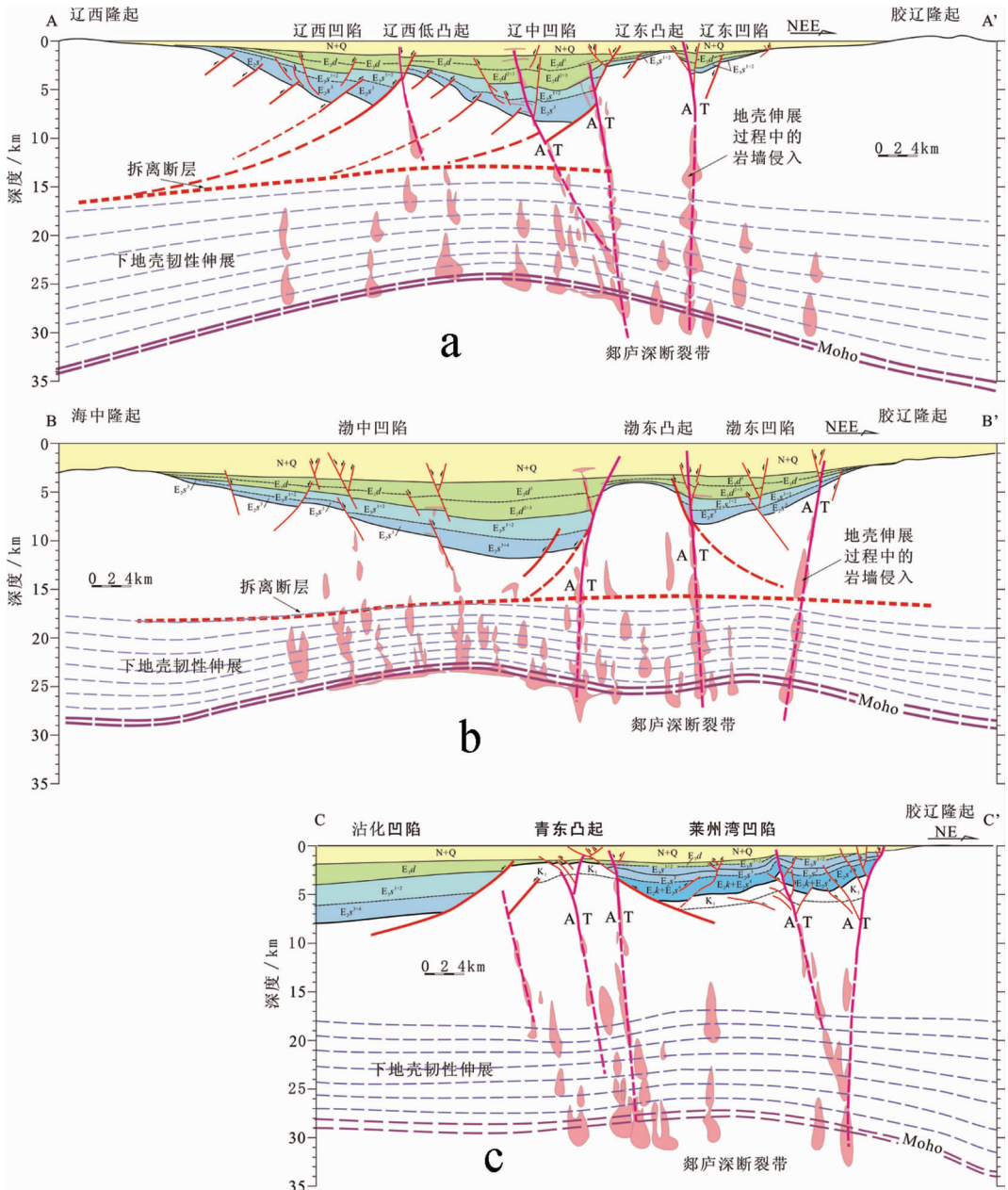


图 6 渤海海域郯庐断裂带几何结构模型

a—辽东湾段;b—渤中—渤东段;c—莱州湾段

Fig.6 Structural models of Tan-Lu fault zone in Bohai Sea area  
a-Liaodong Bay section; b-Bozhong-Bodong section; c-Laizhou Bay section



湾一带的新生代盆地的形成与郯庐断裂带右旋走滑运动相关<sup>[24-27]</sup>,至少在始新世以来郯庐断裂带就是以右旋走滑运动为主。另一种观点认为渤海海域郯庐断裂带的右旋走滑运动只是新构造运动的表现形式<sup>[28-31]</sup>,或者说新近纪以后<sup>[32]</sup>郯庐断裂带表现出右旋走滑运动特征。也有学者认为郯庐断裂带的右旋走滑运动发生在渐新世以来,并控制了渤海中部的强烈沉降<sup>[33]</sup>。还有学者认为古新世—早始新世郯庐断裂带发生过左旋走滑运动<sup>[34]</sup>。漆家福等<sup>[18,19]</sup>认为渤海湾新生代盆地构造变形受两种动力系统控制,导致发育两个相对独立的构造变形系统。第一种动力来源于岩石圈底部、由地幔热底辟引起的地壳引张作用,导致地壳发生伸展构造变形,控制了古近纪断陷的形成和演化;第二种动力是板块边界相互作用传递到板内的侧向作用力,由于作用力方向为NE向或NEE向,与NNE向郯庐深断裂斜向相交,导致郯庐深断裂发生右旋走滑运动,并引起盆地内部沿深断裂发育走滑构造变形。

岩石圈或地壳的变形同时会受多个动力系统控制,也正是多个动力系统的相互影响使区域应力场

表现出不同的特征。渤海湾盆地古近纪发育大量正断层,标志存在广泛的引张作用。引张作用可能来源于岩石圈的热作用,也可能由板块向蠕散引起。前者能更好地解释引张作用可以在不连续的陆块中传递。渤海海域地区在新生代不同时期都同时受来源于岩石圈底部的热(底辟、膨胀)动力系统和西太平洋边缘板块构造运动引起的NE-NEE向侧向挤压动力系统。这两个动力系统的相对强弱变化导致郯庐断裂带应该具有不同的运动学形式。图7表示了渤海湾海域两种不同来源的作用力叠加对郯庐断裂带运动学的影响。古近纪裂陷阶段,由于岩石圈底部发生强烈的热膨胀、热底辟作用引起的垂直于地幔隆起轴向的引张力可能抵消来源于侧向的挤压力,地壳处于引张应力场状态(图7-a,其中: $\sigma_1$ 为垂直方向, $\sigma_2$ 为水平方向, $\sigma_3$ 为水平方向,且最小主应力 $\sigma_3$ 为张应力),渤海海域中的郯庐断裂带应该以伸展变形或走滑-伸展变形为主。新近纪—第四纪后裂陷阶段,由于岩石圈发生冷却或热作用减弱使NE向或NEE向水平挤压作用相对强烈,地壳处于扭动(图7-b,其中: $\sigma_1$ 为水平方向, $\sigma_2$ 为垂直平

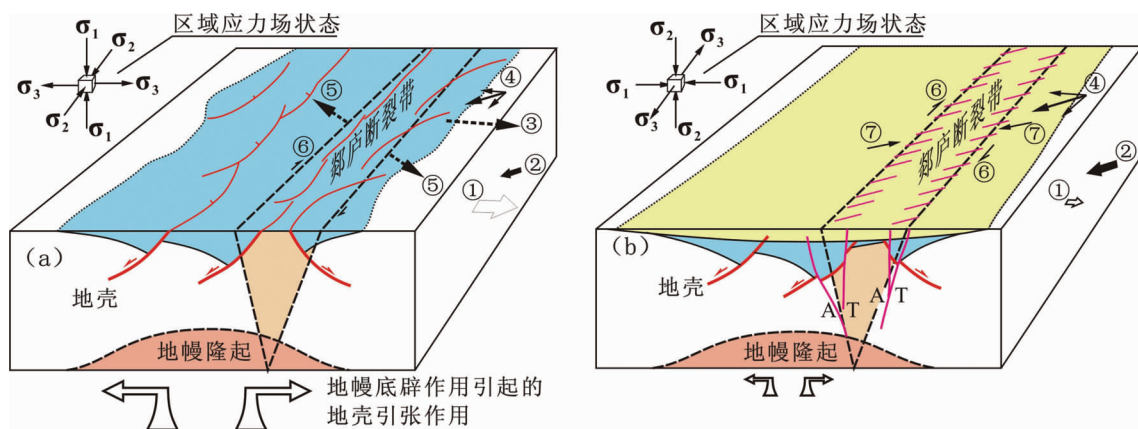


图7 渤海海域新生代动力学系统与郯庐断裂带运动学图解

①—地幔底辟引起的水平引张方向,垂直于地幔隆起脊线;②—区域挤压力方向,源于板块边缘板块相互作用(例如日本海的扩张、太平洋板块俯冲等)产生的区域应力场通过岩石圈传递到渤海地区;③—地幔底辟引起的伸展方向;④—水平方向区域挤压力沿着郯庐断裂带的分解;⑤—古近纪构造动力①和②叠加后郯庐断裂带的斜向伸展运动方向;⑥—新近纪—第四纪郯庐断裂带的右旋走滑运动;⑦—新近纪—第四纪构造动力①和②叠加后郯庐断裂带的斜向收缩方向;A/T—表示剖面上的右旋走滑运动,A表示断盘离观察者而去,T表示断盘向观察者而来

Fig.7 Scheme of Cenozoic dynamics system and kinematics of Tan-Lu fault zone in Bohai Sea area

①— Horizontal extension induced by mantle diapir, which is perpendicular to the axis of the mantle uplift; ②— Regional compression, originating from stress field induced by movement of plates (such as expansion of Japan Sea and subduction of Pacific plate) through the lithosphere to the Bohai Sea area; ③— Extension induced by mantle diapir; ④— Resolution of horizontal regional compressive force along Tan-Lu fault zone; ⑤— Oblique extension of Tan-Lu fault zone after superposition of ① and ② during Paleogene; ⑥— Right lateral strike-slip of Tan-Lu fault zone during Neogene - Quaternary; ⑦— Oblique contraction of Tan-Lu fault zone after superposition of ① and ② during Neogene-Quaternary; A/T— Right lateral strike-slip, A— Away from the viewer, T— Towards the viewer



方向,  $\sigma_3$  为水平方向, 最小主应力  $\sigma_3$  为可以是张应力或压应力)或挤压应力场状态, 渤海海域中的郯庐断裂带应该以右旋走滑变形或走滑-收缩变形为主。即使在古近纪裂陷阶段两种动力系统也是此强彼弱的, 因而在裂陷作用的间歇期渤海海域的郯庐断裂带可能也表现出走滑运动。另一方面, 郯庐断裂带不同区段由于走向变化也可以在同一时期表现除不同特征的构造变形。在新近纪时期, 郯庐断裂带附近一些 NNE 向、NE 向基底断层都表现出伸展-走滑断层或走滑-伸展断层位移特征, 并诱导发育大量近 EW 向盖层正断层, 而在莱北凹陷、辽东凸起北段的近 SN 向或 NNW 向基底断层表现出逆冲-走滑断层位移特征。郯庐深断裂带不同区段的结构特征、不同时期的运动学有所不同, 但是将它作为一条“垂向构造变形带”不仅有助于理解其内部各种构造要素在几何学和运动学上的联系, 也可以将它与控制古近纪裂陷盆地形成和演化的伸展构造系统区分开来。

## 5 结 论

综合分析, 关于渤海海域中郯庐深断裂带的结构和新生代运动学特征可归纳以下两点主要认识:

(1) 郯庐深断裂带在渤海海域位于莱州湾—渤海东部—辽东湾东部一线, 总体走向为 NNE, 深部对应于渤海海域 NNE 向地幔隆起带的东部斜坡, 浅层盆地中对应于渤海海域新生代盆地中在莱州湾—渤海东部—辽东湾东部发育的 NNE 向陡倾斜的基底走滑断层及相关构造变形组成的右旋走滑构造带。

(2) 郯庐深断裂带是一条地壳尺度或岩石圈尺度垂向的强变形带, 不同时期、不同区段的运动学特征有一定的差异。在古近纪地幔热底辟诱导的地壳引张作用下, 郯庐深断裂带不同区段表现出伸展、伸展-变换构造变形特征, 分隔不同的伸展构造单元, 控制断陷的伸展断层可能利用了郯庐深断裂带在浅层地壳的部分断层面, 并亦可能在中地壳层中发生拆离滑脱; 而新近纪 NE-NEE 向区域挤压应力场作用下, 郯庐深断裂带不同区段表现出右旋走滑、伸展-走滑、收缩-走滑构造变形特征, 并使浅层断层与深层断层保持更紧密的联系。

## 参考文献 (References):

[1] 徐嘉炜, 朱光. 中国东部郯庐断裂带构造模式讨论 [J]. 华北地质

矿产杂志, 1995, 10(2):121-134.

Xu Jiawei, Zhu Guang. Discussion on tectonic models for the Tan-lu fault zone, eastern China [J]. Jour. Geol & Min. Res. North China, 1995, 10(2):121-134 (in Chinese with English abstract).

[2] 国家地震局《深部物探成果》编写组. 中国地壳上地幔地球物理探测成果[M]. 北京:地震出版社, 1986.

Editorial Group of The Deep Geophysical Prospecting Achievements of the State Seismological Bureau. Lower Crust and Upper Mantle Geophysical Prospecting Achievement of Onshore China[M]. Beijing: Seismological Press, 1986 (in Chinese).

[3] 刘前志, 冯杏芝, 张洁, 等. 郯庐断裂带地球物理场特征、地质演化及对油气的控制[J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(增刊 2):1-11.

Liu Qianzhi, Feng Xinzhi, Zhang Jie, et al. Geophysical field characteristics, geological evolution and its dominating on oil and gas of Tanlu fault zone [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1997, 32 (supp.2):1-11 (in Chinese).

[4] 乔秀夫, 张安棣. 华北块体、胶辽块体与郯庐断裂 [J]. 中国地质, 2002, 29(4):337-244.

Qiao Xiufu, Zhang Andi. North China block, Jiao-Liao-Korea block and Tanlu fault[J]. Geology in China, 2002, 29(4):337-244 (in Chinese with English abstract).

[5] 汤加富, 李怀坤, 姜清. 郯庐断裂带南段研究进展与断裂性质讨论[J]. 地质通报, 2003, 22(6):426-436.

Tang Jiafu, Li Huaikun, Lou Qin. Progress in the study of the southern segment of the Tanlu fault and a discussion of the nature of the fault[J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(6):426-436 (in Chinese with English abstract).

[6] 王小凤, 李中坚, 陈柏林, 等. 郯庐断裂带 [J]. 北京:地质出版社, 2000:1-200.

Wang Xiaofeng, Li Zhongjian, Chen Bailin, et al. Tan-Lu Fault Zone [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2000:1-200 (in Chinese with English abstract).

[7] 万天丰. 郯庐断裂带的延伸与切割深度 [J]. 现代地质, 1996, 10 (4):518-525.

Wan Tianfeng. Length and penetration depth of Tancheng Lujiang fault zone in eastern asia [J]. Geoscience, 1996, 10 (4):518-525 (in Chinese with English abstract).

[8] 朱光, 刘国生, 牛漫兰, 等. 郯庐断裂带的平移运动与成因 [J]. 地质通报, 2003, 22(3):200-207.

Zhu Guang, Liu Guosheng, Niu Manlan, et al. Transcurrent movement and genesis of the Tan-Lu fault zone [J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22 (3):200-207 (in Chinese with English abstract).

[9] 朱光, 刘国生, 牛漫兰, 等. 郯庐断裂带晚第三纪以来的浅部挤压活动与深部过程[J]. 地震地质, 2002, 24(2):265-277.

Zhu Guang, Liu Guosheng, Niu Manlan, et al. Post-Eogene compressive activities on the Tan-Lu fault zone and their deep processes [J]. Seismology and Geology, 2002, 24 (2):265-277 (in Chinese with English abstract).

[10] Yin An, Nie Sh Y. An indentation model for the north and south

- China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia[J]. *Tectonics*, 1993, 12 (4):801-813.
- [11] Glider S A, Leloup P H, Courtillot V, et al. Tectonic evolution of Tancheng-Lujiang (Tan-Lu) fault via Middle Triassic to Early Cenozoic paleomagnetic[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(B7):15365-15390.
- [12] Grimmer J C, Jonckheere R, Enkelmann E, et al. Cretaceous - Cenozoic history of the southern Tan-Lu fault zone: apatite fission-track and structural constraints from the Dabie Shan (eastern China) [J]. *Tectonophysics*, 2002, 359:225-253.
- [13] 李嘉琪. 郯庐断裂带在渤海海域的地球物理场特征[C]//构造地质学论丛. 北京:地质出版社, 1984, (3):219-237.
- Li Jiaqi. Geophysical field characteristics of Tanlu fault zone in Offshore Bohai [C]//Structural Geology Review. Beijing: Geological Publishing House, 1984(3):219-237 (in Chinese with English abstract).
- [14] 刘光夏, 赵文俊, 张先. 郯庐断裂带渤海段的深部构造特征—地壳厚度和居里面的研究结果 [J]. *长春科技大学学报*, 1996, 26 (4):388-391.
- Liu Guangxia, Zhao Wenjun, Zhang Xian. The deep structure characteristics of the Tanlu fault zone, Bohai segment— a case study of the crustal thickness and curie depth [J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1996, 26 (4):388-391 (in Chinese with English abstract).
- [15] 晁洪太, 王志才, 刘西林. 郯庐断裂带下辽河—莱州湾段与潍坊—嘉山段地震构造和地震活动特征对比 [J]. *华北地震科学*, 1999, 17(2):36-41.
- Chao Hongtai, Wang Zhicai, Liu Xilin. Seismic tectonics and activity correlation between Xialiaohé - Laizhouwan segment and Weifang—jiashan segment [J]. *North China Earthquake Sciences*, 1999, 17(2):36-41 (in Chinese).
- [16] 周斌, 张英凯, 李继训. 渤海及邻区地震地质、地球物理场和地震活动特征[J]. *西北地震学报*, 2000, 22(9):333-337.
- Zhou Bin, Zhang Yingkai, Li Jixun. Characteristics of geology, geophysical field and seismic activity of Bohai and its vicinity[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2000, 22 (9):333-337 (in Chinese).
- [17] 漆家福, 陈发景. 下辽河—辽东湾新生代裂陷盆地构造解析[M]. 北京:地质出版社, 1995:152.
- Qi Jiafu, Chen Fajing. Structural Analysis for Liaodongwan - Xialiaohé Cenozoic Rifting Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995:152 (in Chinese).
- [18] 漆家福, 邓荣敬, 周心怀, 等. 渤海海域新生代盆地中的郯庐断裂带构造[J]. *中国科学(D 辑)*, 2008, 38(增刊):19-29.
- Qi Jiafu, Deng Rongjing, Zhou Xinhui, et al. Structural characteristics of the Tanlu Fault Zone in Cenozoic basins of offshore Bohai [J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 38(supp.): 19-29 (in Chinese and English).
- [19] 季佑仙. 中国近海盆地平移断层特征及地震解释[J]. *中国海上油气(地质)*, 2002, 16(5):355-357.
- Ji Youxian. Characteristics and seismic interpretation of strike-slip faults in China offshore basins [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2002, 16(5):355-357(in Chinese with English abstract).
- [20] 葛建党. 郯庐断裂带在渤中凹陷的构造特征与油气成藏的关系 [J]. *海洋石油*, 2001, (1):14-20.
- Ge Jiandang. The tectonic character of Tanlu Fault (TLF) and the relation between TLF and hydrocarbon accumulation in Bozhong sag [J]. *Offshore Oil*, 2001, (1):14-20 (in Chinese with English abstract).
- [21] 郭太现, 刘春成, 吕洪志, 等. 蓬莱 19-3 油田地质特征[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(2):26-28.
- Guo Taixian, Liu Chuncheng, Lv Hongzhi, et al. Geological characteristics and hydrocarbon accumulation pattern of Penglai 19-3 oil field [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(2):26-28 (in Chinese with English abstract).
- [22] 高祥林. 渤海中部郯庐断裂带的近期活动与渤海新近纪新生断裂[J]. *地质科学*, 2006, 41(2): 355-364.
- Gao Xianglin. Recent activities of the Tan-Lu fault zone in the central Bohai sea and newly generated faults during Neogene in Bohai [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2006, 41 (2):355-364 (in Chinese with English abstract).
- [23] J. Brendan O'Reilly, Ge Hongxing, Karl L G. et al. Fault geometry and kinematics in the Peng Lai 19-3 Field, Bohai Bay, People's Republic of China[J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84 (9):1472.
- [24] 卢造勋. 夏怀宽. 内蒙古东乌珠穆沁旗至辽宁东沟地质断面[M]. 北京:地震出版社, 1992.
- Lu Zaoxun, Xia Huaikuan. Geological Profile from Wuzhumuqin, Inner Mongolia to Donggou, Liaoning [M]. Beijing: Seismological Press, 1992(in Chinese).
- [25] 蔡东升, 罗毓辉, 姚长华. 渤海莱州湾走滑拉分凹陷的构造研究及其石油勘探意义[J]. *石油学报*, 2001, 22(1):19-25.
- Cai Dongsheng, Luo Yuhui, Yao Changhua, et al. Strike-slip and pull-apart structure study and its significance to petroleum exploration on Laizhouwan Sag, Bohai area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(1):19-25 (in Chinese with English abstract).
- [26] 于俊峰, 夏斌, 许静. 对渤海湾盆地张扭、压扭性构造的一点认识[J]. *天然气地球科学*, 2006, 17(4):473-476.
- Yu Junfeng, Xia Bin, Xu Jing. An understanding of tense - shearing and compresso - shearing structures in Bohai Bay basin[J]. *Natural Gas Geosciences*, 2006, 17 (4):473-476.(in Chinese with English abstract).
- [27] Hsiao L Y, Graham S A, Tilander N. 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[J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88 (1):71-97.
- [28] 张功成, 朱伟林, 邵 垒. 渤海海域及邻区拉分构造与油气勘探领域[J]. *石油学报*, 2001, 22(2):14-18.
- Zang Gongcheng, Zhu Weilin, Shao Lei, et al. Pull-apart tectonic and hydrocarbon prospecting in Bohai Bay and its nearby area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(2):14-18 (in Chinese with English abstract).



- abstract).
- [29] 蔡东升, 罗毓晖, 武文来, 等. 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[J]. 中国海上油气(地质), 2001, 15(1):35-43.  
Cai Dongsheng, Luo Yuhui, Wu Wenlai, et al. Shallow tectonic deformation and its relationship to hydrocarbon enrichment in Bozhong depression and adjacent areas, Bohai Bay basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2001, 15 (1):35-43 (in Chinese with English abstract).
- [30] 杨占宝. 郯庐断裂带中新生代演化与含油气盆地形成分布综述[J]. 地质力学学报, 2006, 12(1):43-48.  
Yang Zhanbao. Meso-Cenozoic evolution of the Tanlu fault and formation and distribution of petroliferous basins [J]. Journal of Geomechanics, 2006, 12 (1):43-48 (in Chinese with English abstract).
- [31] 曾治平. 渤海新构造运动对渤海东部油气性质的影响[J]. 海洋地质动态, 2002, 18(9):1-5.  
Zeng Zhiping. Influence of Neotectonics on Petroleum Characteristics in the East of the Bohai Sea [J]. Marine Geology Letters, 2002, 18(9):1-5 (in Chinese).
- [32] 龚再升, 王国纯. 渤海新构造运动控制晚期油气成藏[J]. 石油学报, 2001, 22(2):1-8.  
Gong Zaisheng, Wang Guochun. Neotectonism and late hydrocarbon accumulation in Bohai Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(2):1-8 (in Chinese with English abstract).
- [33] 邓运华. 郯庐断裂带新构造运动对渤海东部油气聚集的控制作用[J]. 中国海上油气(地质), 2001, 15(5):301-305.  
Deng Yunhua. Control of the neotectonism along Tancheng-Lujiang fracture zone on hydrocarbon accumulation in the eastern Bohai sea[J]. China Offshore Oil and Gas( Geology), 2001, 15(5): 301-305 (in Chinese with English abstract).
- [34] 徐杰, 马宗晋, 邓起东, 等. 渤海中部渐新世以来强烈沉陷的区域构造条件[J]. 石油学报, 2004, 25(5):10-23.  
Xu Jie, Ma Zongjin, Deng Qidong, et al. Regional tectonic conditions for intensive subsidence of the middle Bohai Sea since Oligocene[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(5):10-23 (in Chinese with English abstract).
- [35] 韩文功, 季建清, 王金铎, 等. 郯庐断裂带古新世—早始新世左旋走滑活动的反射地震证据 [J]. 自然科学进展, 2005, 15(11): 1383-1388.  
Han Wengong, Ji Jianqing, Wang Jinzhe, et al. Left-lateral strike-slip movement of Tanlu fault zone in Paleocene-Eocene, evidence from reflection seismic data [J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(11):1383-1388 (in Chinese).
- [36] 池英柳, 赵文智. 渤海湾盆地新生代走滑构造与油气聚集[J]. 石油学报, 2000, 21(2):14-20.  
Chi Yinliu, Zhao Wenzhi. Strike-slip deformation during the Cenozoic and its influence on hydrocarbon accumulation in the Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21 (2):14-20 (in Chinese with English abstract).
- [37] 侯贵廷, 叶良新, 杜庆娥. 渤张断裂带的构造机制及其地质意义[J]. 地质科学, 1999, 34(3):375-380.  
Hou Guiting, Ye Liangxin, Du Qinge. Tectonic mechanism and geological significance of the Bozhang fault zone [J]. Scientia Geologica Sinica, 1999, 34 (3):375-380 (in Chinese with English abstract).
- [38] 吴时国, 余朝华, 邹东波, 等. 莱州湾地区郯庐断裂带的构造特征及其新生代演化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(6): 101-108.  
Wu Shiguo, Yu Zhaohua, Zou Dongbo, et al. Structural features and Cenozoic evolution of the Tanlu fault zone in the Laizhouwan bay, Bohai sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(6):101-108(in Chinese with English abstract).
- [39] 黄雄伟. 渤中坳陷新生代断裂构造特征与油气聚集[J]. 海洋地质动态, 1999, (12):1-4.  
Huang Xiongwei. Cenozoic structural characteristics of Bozhong depression and its hydrocarbon accumulation [J]. Northwestern Geology, 1999, 32(3):1-4 (in Chinese).
- [40] 王国纯. 郯庐断裂带与渤海海域反转构造及花状构造[J]. 中国海上油气(地质), 1998, 12(5):289-295.  
Wang Guochun. Relationship of Tanlu fault to the inversion and flower structures in Bohai Bay [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1998, 12 (5):289-295 (in Chinese with English abstract).
- [41] Schellart W P, Lister G S. The role of East Asian active margin in widespread and strike-slip deformation in East Asia [J]. Journal of the Geological Society, 2005, 162:959-972.
- [42] 范炳恒, 张华. 渤海附近郯庐断裂走滑的生物地层证据[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(3):283-286.  
Fan Bingheng, Zhang Hua. Biostratigraphic evidences for strike-slip distance of Tancheng-Lujiang fault near Bohai Sea [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29 (3):283-286 (in Chinese with English abstract).
- [43] 周士科, 李焱, 陈生泽, 等. 渤海湾盆地渤中 34 区走滑断裂特征[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(3):5-7.  
Zhou Shike, Li Yan, Chen Shengze, et al. Characteristics of strike-slip faults in Bozhong 34 Block, Bohai Bay basin [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2004, 26(3):5-7 (in Chinese).

## Structural model and Cenozoic kinematics of Tan–Lu deep fracture zone in Bohai Sea area

QI Jia–fu<sup>1</sup>, ZHOU Xin–huai<sup>2</sup>, WANG Qian–shen<sup>3</sup>

(1. State Key Lab of Petroleum Resources and Prospecting, China Petroleum University, Beijing 102249, China; 2. Tianjin Branch of CNOOC China Co., Ltd., Tianjin 300451, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The Tan–Lu DFZ (deep fracture zone) stretches from Lujiang (in Anhui) through Tancheng, Yishui and Anqiu (in Shandong) to Bohai Sea area where it is covered by Cenozoic basin sedimentary layer and sea water. Judging from the regional gravity–magnetic field map, Tan–Lu DFZ in the Bohai Sea area lies along the Laizhou Bay—eastern Bohai Sea—Liaodong Bay line, generally striking NNE, parallel to the eastern limb of the mantle rise in the Bohai Sea. The Cenozoic basin in the Bohai Sea resembles a mirror image of the mantle rise. The boundary faults of the Paleogene rifting sub–basins are developed in multiple directions, dominantly striking NE, NNE, NEE, NW, NWW, and mostly showing characteristics of listric normal faults in terms of geometry and kinematics. 2 to 4 steeply dipping NNE–trending basement strike–slip faults developed along the Laizhou Bay—eastern Bohai Sea—Liaodong Bay line constitute a right–lateral strike–slip structure with their associated structural deformation, and the location is approximately consistent with the Tan–Lu DFZ interpreted by the regional gravity–magnetic field map. In combination with the characteristics of deep crust structure and Cenozoic basin structure, the authors have reasons to believe that the structural model of Tan–Lu DFZ in Bohai Sea area is a vertical strong deformation zone at the crust scale, which is composed of the NNE–trending right–lateral strike–slip zone in Cenozoic basin and the deep faults cutting the Moho surface. However, the Tan–Lu DFZ is not a simply right–lateral strike–slip zone. Extensional faults controlling Paleogene fault sub–basin might have utilized the fault surface in shallow crust of the deep fracture zone, and could have been detached in middle crust layer during extensional displacement; nevertheless, the right–lateral strike–slip displacement of the deep fracture zone was likely to cause the connection between the shallow fault and the deep fault.

**Key words:** deep fracture zone; extensional structure; strike slip structure; Bohai Sea area; Tan–Lu deep fracture zone

---

**About the first author:** QI Jia–fu, male, born in 1957, professor, engages in teaching and research of basin structure; E–mail: qijiafu@cup.edu.cn.