



论文

辽河西部凹陷新生代构造变形及“郯庐断裂带”的表现

漆家福^{①②*}, 李晓光^③, 于福生^②, 于天才^③

① 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

② 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249;

③ 中国石油辽河油田地质研究院, 盘锦 124010

* E-mail: qjiafu@cup.edu.cn

收稿日期: 2012-05-08; 接受日期: 2012-10-15; 网络版发表日期: 2013-07-22

油气资源与探测国家重点实验室课题(编号: PRPDX2008-03)、国家自然科学基金重大项目(批准号: 90914006)和国家科技重大专项课题(编号: 2009ZX05009-001)资助

摘要 本文通过三维地震资料解释和构造制图分析了辽河西部凹陷断裂系统的构造几何学和运动学特征, 论证了郯庐断裂在辽河西部凹陷的表现型式. 研究表明如下几点: (1) 辽河西部凹陷新生代构造可以划分为伸展构造和右旋走滑构造两种构造变形系统. 伸展构造由一系列 NNE-NE 向的正断层构成, 主要在古近纪发育, 并控制了古近系的充填, 使辽河西部凹陷古近系表现为发育在 NNE-NE 向的台安-大洼断层(F1)上盘、具有“东断西超”结构特征的一个复式半地堑断陷; 右旋走滑构造包括 2~3 条 NNE-NE 向基底右旋走滑断层(F2, F3 和 F4)及其伴生构造, 主要在渐新世以后发育, 走滑相关的断层可以切割到新近系-第四系. (2) 受基底走滑断层位置和走向变化的影响, 辽河西部凹陷古近系复式半地堑断陷在中、北部与南部有明显不同的结构特征, 在凹陷南部主要表现为伸展-走滑变形特征, 仍保留“东断西超”的复式半地堑结构, 而在凹陷北部主要表现为收缩-走滑构造变形特征, 改造成为西侧受逆-走滑断层限制、东侧以反转正断层为边界的复杂“地堑”结构. (3) 郯庐断裂带从辽东湾海域东部向北分为两支, 其中东支向北纵贯辽河拗陷东部凹陷至沈阳附近与敦化-密山断裂连接, 西支从辽河西部凹陷中北部、大民屯凹陷穿过并与依兰-伊通断裂相连; 辽河西部凹陷的基底走滑断层属于“郯庐断裂带”西支渐新世以来发生右旋走滑位移的表现, 切割了控制古近纪沉积凹陷的伸展断层, 并诱导盆地盖层沿着基底走滑断裂带发育一系列近 EW 向的盖层正断层.

关键词伸展构造
走滑构造
新生代
郯庐断裂带
辽河西部凹陷

大量地质、地球物理资料表明, 郯庐断裂带是一条纵贯中国东部的区域性深断裂带, 而且有长期的、复杂的活动历史^[1-4]. 该断裂带从鲁中沂沭地堑向北延伸从莱州湾进入渤海海域, 向北沿着辽东湾东部

延伸到辽河拗陷北端的沈阳附近. 郯庐断裂带在渤海海域新生代盆地中表现为一系列高角度、近直立的基底走滑断层, 并导致新生代盆地盖层表现出明显的右旋走滑构造变形特征^[5,6]. 郯庐断裂带在辽河拗

中文引用格式: 漆家福, 李晓光, 于福生, 等. 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, 2013, 43: 1324-1337

英文引用格式: Qi J F, Li X G, Yu F S, et al. Cenozoic structural deformation and expression of the “Tan-Lu Fault Zone” in the West Sag of the Liaohai Depression, Bohaiwan basin province, China. Science China: Earth Sciences, 2013, doi: 10.1007/s11430-013-4617-2

陷中分成两支, 分别与东北地区的依兰-伊通断裂带和敦化-密山断裂带相连^[7,8]. 从深部地球物理探测资料表明郯庐断裂带的主破裂带位于辽河拗陷东部凹陷^[9], 石油勘探资料也显示辽河东部凹陷的构造变形明显较西部凹陷复杂^[10]. 近年来辽河西部凹陷的三维地震资料表明凹陷内部存在 2~3 条 NNE-NE 向基底走滑断层, 据此可以判断郯庐断裂带从辽东湾北端开始分支^[11], 其中西支从辽河西部凹陷、大民屯凹陷穿过, 向北与依兰-伊通断裂带相连, 而东支则沿着辽河东部凹陷向北延伸在沈阳附近与敦化-密山断裂带相连. 本文依据三维地震资料解释结果描述郯庐断裂带新生代右旋走滑构造变形在辽河西部凹陷的表现型式, 并讨论郯庐断裂带走滑构造变形与辽河西部凹陷控凹伸展断裂系统的关系.

1 辽河西部凹陷新生代盆地结构

辽河拗陷位于下辽河平原, 属于渤海湾新生代盆地的组成部分, 古近系表现受伸展断裂系统控制

的断陷结构、新近系-第四系呈毯状覆盖在古近系断陷及分隔断陷的凸起之上使之成为统一的沉积盆地. 按照古近系分布, 辽河拗陷划分为西部凹陷、东部凹陷、大民屯凹陷和沈北凹陷等 4 个由 NNE-NE 向伸展断层控制的断陷, 在剖面上表现为由“两堑夹一垒”结构特征(图 1).

地震资料揭示出辽河西部凹陷在剖面上总体表现为东断西超(翘)的半地堑, 位于凹陷东侧 NNE-NE 向的台安-大洼断层是控制古近系充填的主边界断层(图 1), 其上盘半地堑中充填的古近系向西逐渐减薄, 表现为楔状层序, 而且发生与主边界断层形态相关的褶皱变形(图 2). 但是由于主干边界断层的产状、位移量沿走向的变化以及凹陷演化过程中受郯庐断裂带走滑作用的改造, 辽河西部凹陷的剖面结构沿着凹陷轴向有明显的变化, 凹陷南部表现为典型的复式半地堑断陷特征, 中部和北部的剖面结构与南区相比还存在以下几方面的重要差异(图 3). 其一, 辽西凹陷中部和北部的主边界断层(台安大洼断层, F1)被陡倾斜(倾向相反)的冷家-陈家走滑断层切割,

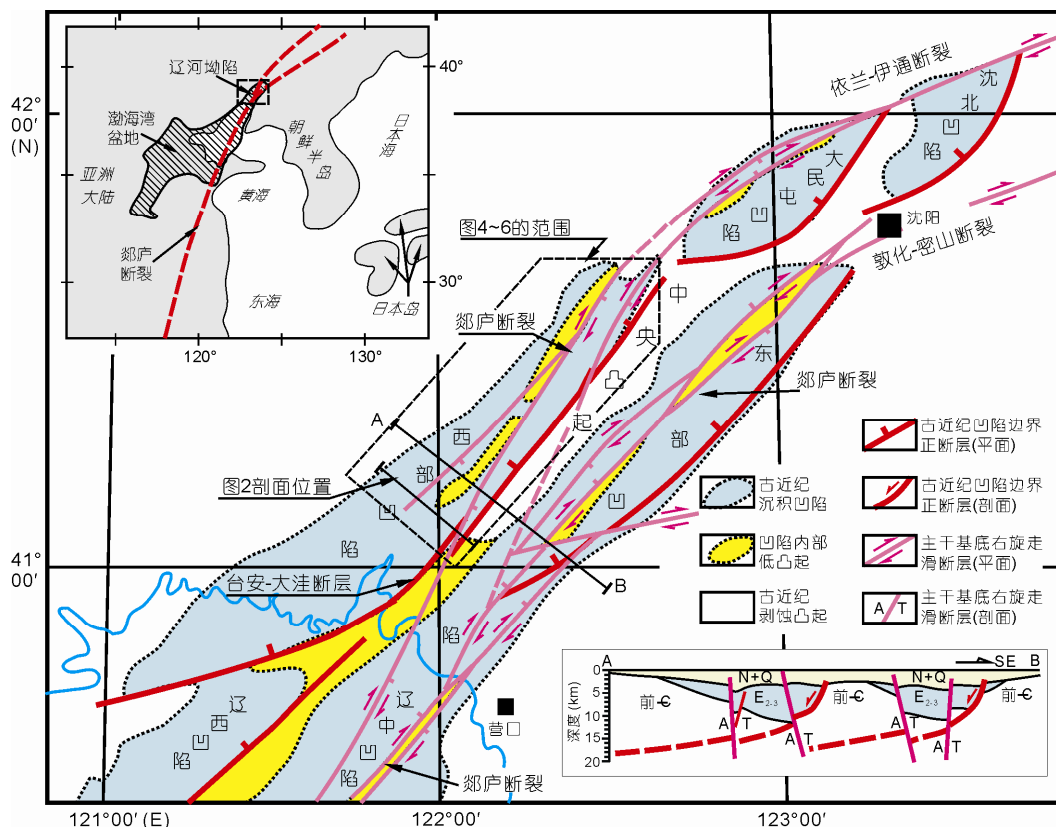


图 1 辽河拗陷构造位置图

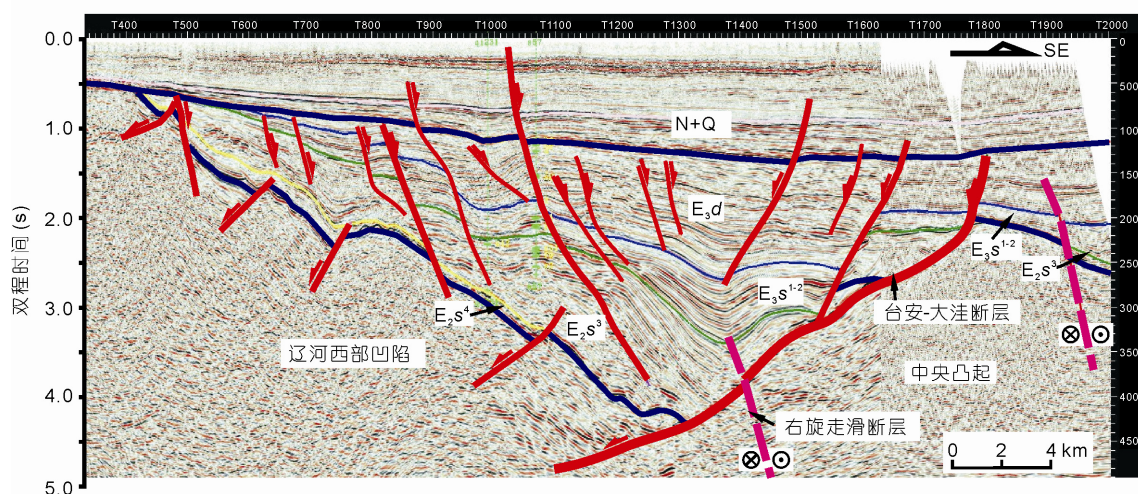


图2 地震剖面解释的辽河西部凹陷南部剖面结构特征

据辽河油田地震剖面解释, 位置见图 1. N+Q, 新近系和第四系; E_3d , 渐新统东营组; E_3s^{1-2} , 渐新统沙河街组一、二段, E_3s^3 , 沙河街组三段; E_2s^4 , 沙河街组四段

在剖面上, 冷家-陈家断层和台安大洼断层所夹持的三角形区域内形成一异地体, 其岩性组合与其下盘明显不协调, 断层垂向位移也无法平衡(图 3 中剖面①~③)。其二, 辽西凹陷南部半地堑断陷的斜坡带以发育与主边界断层同向倾斜的次级基底断层为主, 构成“多米诺”式正断层组, 但是在中部、北部半地堑断陷的斜坡带同时发育有同向和反向次级基底断层, 构成共轭正断层组。其三, 半地堑断陷向中部的斜坡-深陷过渡带发育有一条隐伏的基底走滑断层, 使盖层形成窄的小型地堑构造, 剖面上断层组合成负花状构造样式。其四, 辽河西部凹陷北段控制古近系半地堑断陷的主边界断层及断陷斜坡都受基底卷入的逆冲走滑断层强烈改造, 半地堑断陷的原始形态不清, 断陷东侧以逆冲走滑断层为界, 西部斜坡也被逆冲走滑断层破坏表现为强烈剥蚀(图 3 中剖面④和⑤)。

2 辽河西部凹陷新生代断裂系统

断裂构造是辽河西部凹陷新生代构造变形的主要型式。考虑卷入断裂变形的地层层序及断裂活动的时间, 可以将辽河西部凹陷新生代断裂划分为始新世(沙河街组四段、三段沉积时期)活动的断层、渐新世(沙河街组二段、一段和东营组沉积时期)活动的断层和新近纪-第四纪活动的断层。这三个时期活动的断层在断层产状、断层活动性质等方面明显存在差

异。始新世活动的断层以走向 NNE-NE 向正断层为主, 包括位于辽河西部凹陷东部边界的台安-大洼断层以及大量位于凹陷内部、与台安-大洼断层大致平行的同向(与主边界断层倾向一致)次级断层或反向(与主边界断层倾向相反)次级断层(图 4)。这些次级正断层几乎均匀分布在凹陷的不同构造部位, 断层位于明显小于主边界断层, 向下切割凹陷基底、向上终止在沙三段顶面或在沙三段内部尖灭, 并在沙四段、沙三段沉积期具有同生断层特征。渐新世, 位于辽河西部凹陷东部边界的台安-大洼断层仍然有明显活动, 但是凹陷内部的活动断层以 NEE 向、近 EW 向走向的正断层为主(图 5)。它们在剖面上与主边界断层反向倾斜, 在平面上其与主边界断层有明显的夹角。渐新世活动的断层向下多在沙三段尖灭或滑脱, 很少切割到凹陷基底中, 向上切割到东营组顶部, 部分断层可以切割到新近系底部, 属于主边界断层上盘的盖层正断层。从断层与切割地层的厚度关系分析, 盖层正断层主要在东营组沉积期表现为同生正断层特征。新近纪-第四纪活动的断层切割了新近系-第四系, 但是多数断层并不明显表现出同沉积断层特征, 包括从凹陷基底一直切割到新近系或第四系中的 NNE-NE 向断层和向下延伸在东营组尖灭的近 EW 向断层两类(图 6)。其中, NNE-NE 向断层数量少, 单条断层延伸较长, 在剖面上倾角较陡, 不同区段在剖面上表现出的切割新近系-第四系的垂向位移

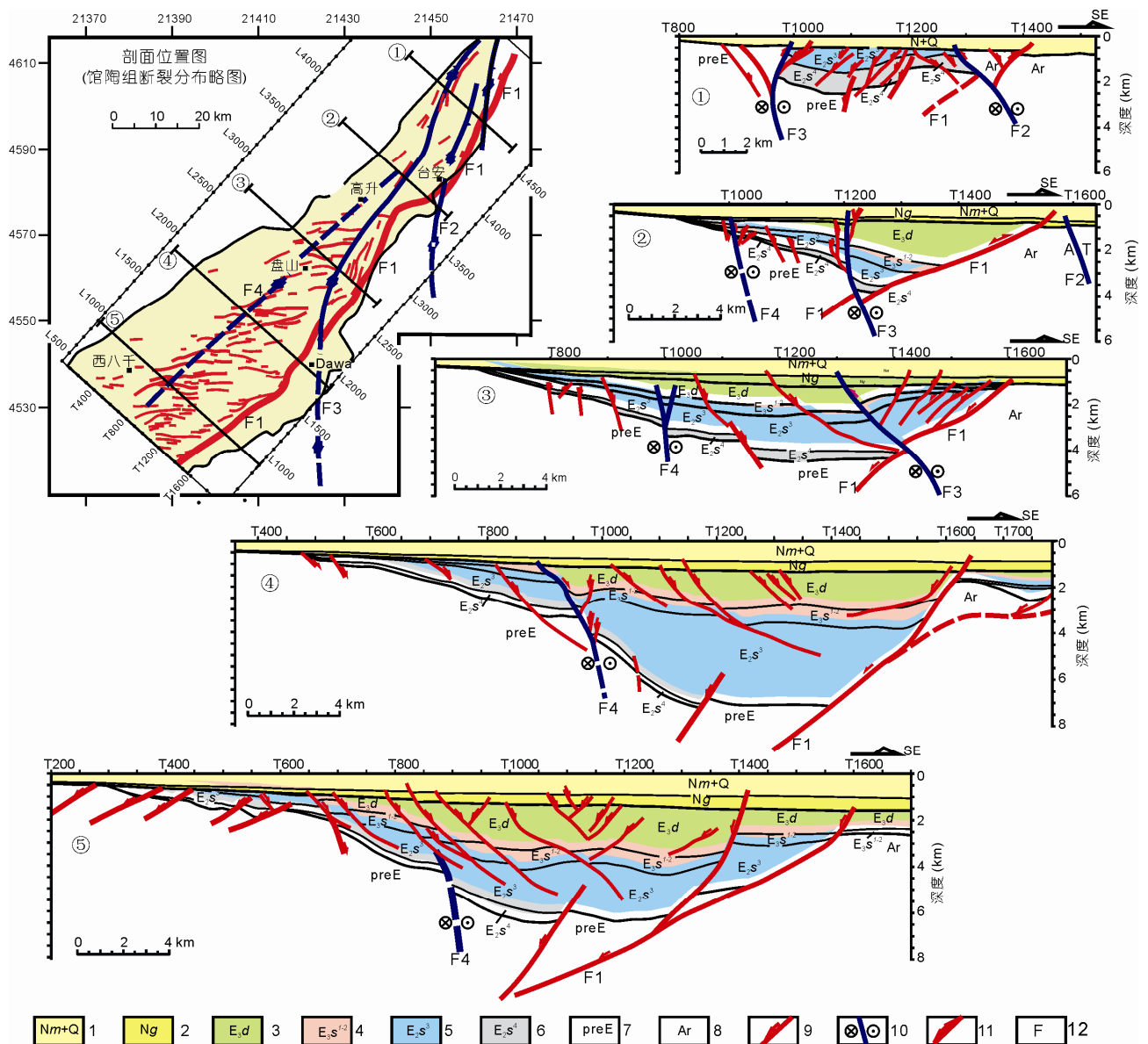


图3 辽河西部凹陷联合剖面图

1-明化镇组和第四系; 2-馆陶组; 3-东营组; 4-沙河街组一段和二; 5-沙河街组三段; 6-沙河街组四段; 7-前古近系盆地基底岩层, 沉积岩、中浅变质岩; 8-太古界花岗片麻岩、深变质岩系; 9-正断层, 粗线表示主干基底断层; 10-右旋走滑断层, 带×圆圈表示断盘离观察者而去, 带点圆圈表示断盘向观察者而来; 11-剖面上显示的逆冲断层或反转正断层, 抑或有右旋走滑位移分量; 12-主干断层, F1: 台安-大洼断层, 主干伸展断层; F2: 牛心坨东断层, 主干走滑断层; F3: 冷家-陈家断层, 主干走滑断层; F4: 盘山西-高升西断层, 隐伏基底走滑断层

特征有明显变化, 可以是正断层、逆断层和反转断层等。近 EW 向断层数量多, 单条断层延伸很短, 在剖面上表现出的切割新近系-第四系的垂向位移主要是正断层, 在平面上有沿着 NNE-NE 向基底断层斜列呈带分布趋势。辽河西部凹陷北部也可以观测到近 EW 向的盖层断层羽列在 NNE-NE 向基底断层旁侧,

或被基底断层切错。

综合分析断层在地震剖面上表现出的垂向位移性质及在平面构造图上的组合和分布特征, 辽河西部凹陷无论是基底卷入断层还是盖层断层, 多数断层表现为正断层性质, 但也有一些 NNE-NE 向基底断层明显表现出右旋走滑断层活动特征, 并沿着断

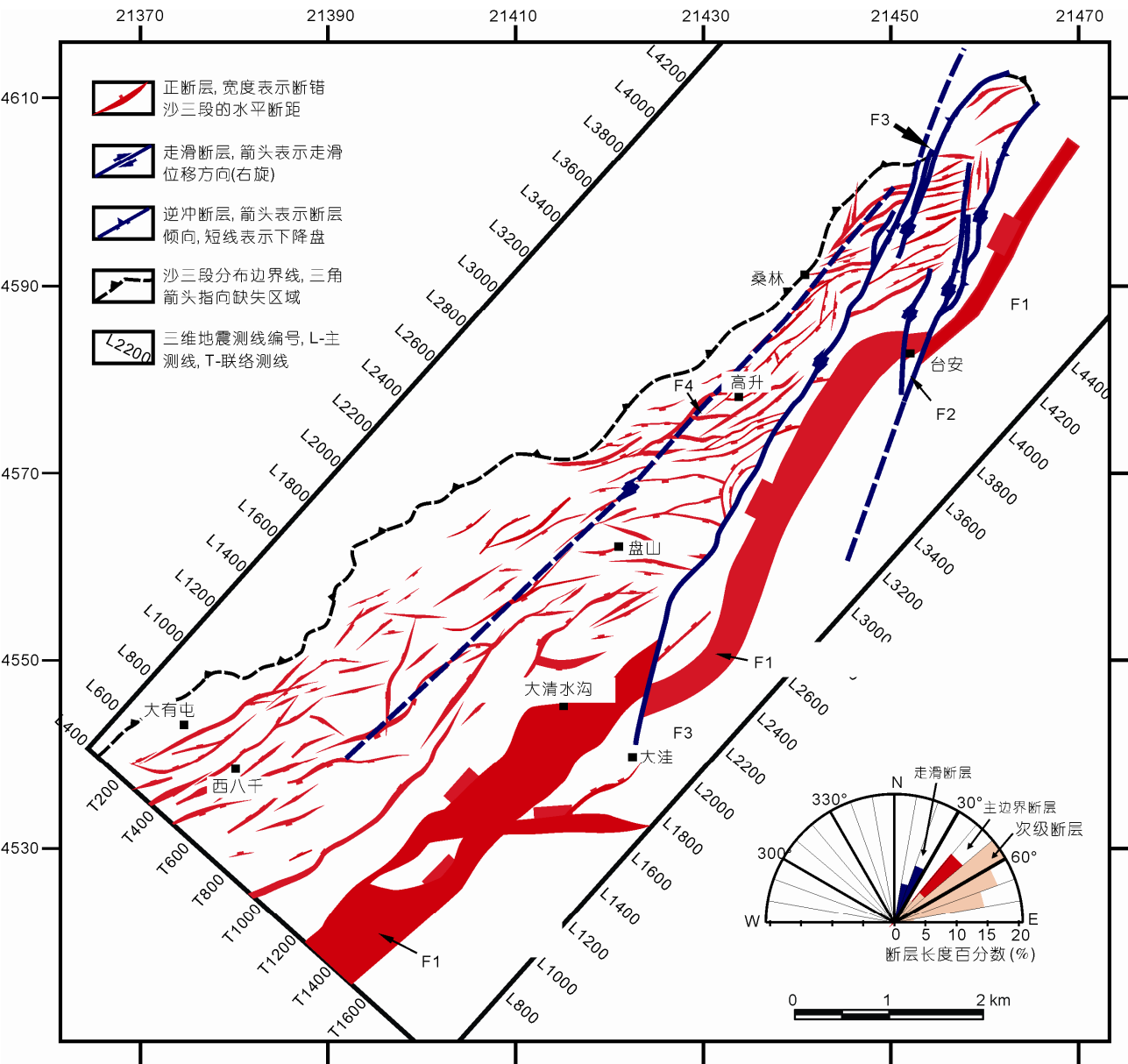


图 4 辽河西部凹陷古近系下部(以沙三段底面为例)断裂分布图

根据辽河油田西部凹陷连片三维地震数据体解释结果简编. F1: 台安-大洼断层, 主干伸展断层; F2: 牛心坨东断层, 主干走滑断层; F3: 冷家-陈家断层, 主干走滑断层; F4: 盘山西-高升西断层, 隐伏基底走滑断层

层走向发生收缩走滑和伸展走滑的变化. 从运动学上的联系上看, 始新世活动的基底正断层与渐新世活动的盖层正断层的走向有明显的差异, 可能反映出区域伸展方向发生变化, 而渐新世、新近纪-第四纪活动的一些近 EW 向盖层正断层沿着 NNE-NE 向基底断层斜列, 反映出 NNE-NE 向基底断层发生右旋走滑活动. 因此, 依据断裂及相关变形表现出的构造

样式、构造组合特征可以将辽河西部凹陷的断裂划分为 NNE-NE 向伸展断裂和 NNE 向右旋走滑断裂两大断裂系统. 其中, 始新世活动的断层属于伸展断裂系统, 新近纪-第四纪活动的断层属于右旋走滑断裂系统, 渐新世活动的断层则是伸展断裂系统和走滑断层系统叠加的结果. 始新世 NNE-NE 向伸展断裂系统的主干断层是 NNE-NE 向的台安-大洼断层(图 4 中

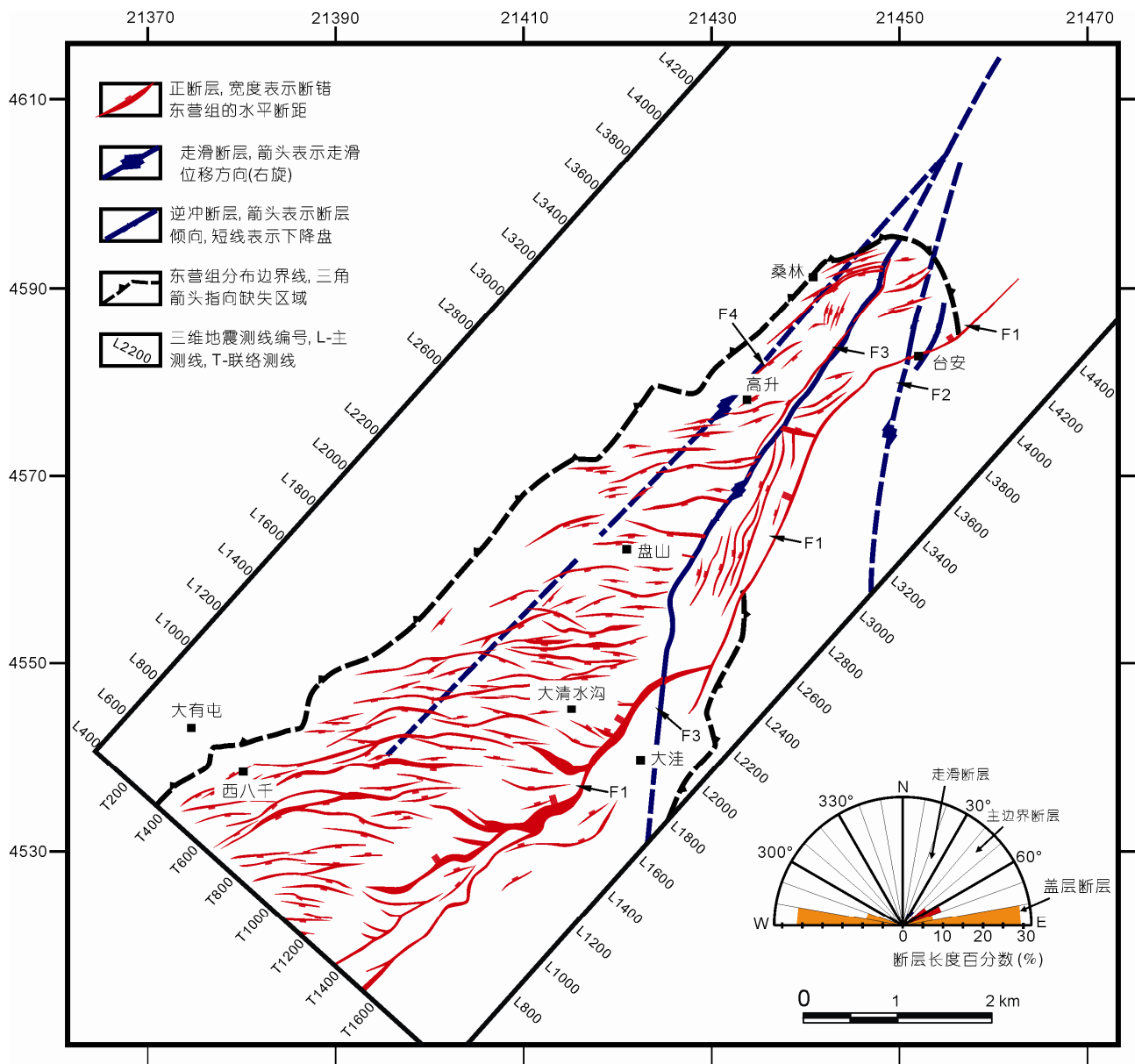


图 5 辽河西部凹陷古近系上部(以东营组底面为例)断裂分布图

根据辽河油田西部凹陷连片三维地震数据体解释结果简编. F1: 台安-大洼断层, 主干伸展断层; F2: 牛心坨东断层, 主干走滑断层; F3: 冷家-陈家断层, 主干走滑断层; F4: 盘山西-高升西断层, 隐伏基底走滑断层

的 F1), 也包括凹陷该断层上盘断块发育的一系列 NNE-NE 向次级基底正断层, 反映辽河西部凹陷在始新世受 NWW-SEE 向区域引张作用影响地壳发生伸展变形, 发育了一系列控制着沙四段、沙三段沉积充填的 NNE-NE 向同生正断层. 新近纪-第四纪 NNE 向右旋走滑断裂系统的主干断层是 NNE 向基底右旋走滑断层(图 6 中的 F2, F3 和 F4 等), 也包括由于 NNE

向基底断层右旋走滑位移诱导产生的近 EW 向盖层正断层. 图 6 中所示的切割新近明化镇组底面的断层基本上都属于走滑断裂系统, 反映在新近纪-第四纪后裂陷阶段沿着 NNE 向基底断裂带发生了区域性的右旋走滑变形. 渐新世活动的断层实际上是伸展断裂系统和右旋走滑断裂系统的叠加变形的结果, 即沿着 NNE 向基底断裂带的右旋剪切作用与 NWW-

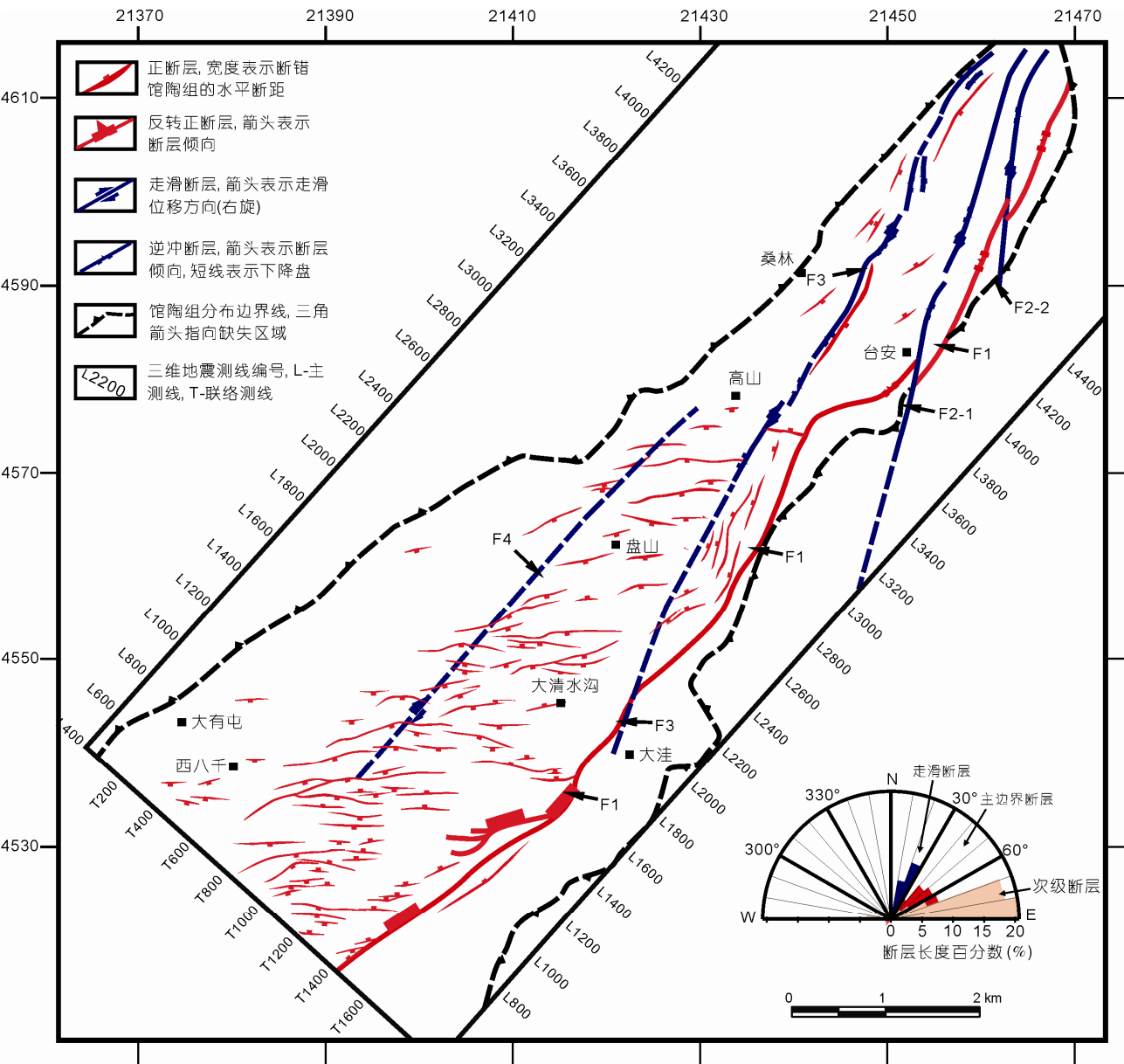


图 6 辽河西部凹陷新近系(以明化镇组底部为例)断裂分布图

根据辽河油田西部凹陷连片三维地震数据体解释结果简编。F1: 台安-大洼断层, 主干伸展断层; F2: 牛心坨东断层, 主干走滑断层; F3: 冷家-陈家断层, 主干走滑断层; F4: 盘山西-高升西断层, 隐伏基底走滑断层

SEE 向引张作用的叠加导致盆地盖层发生 NW-SE 向或 NNW-SSE 向的伸展变形, 发育 NEE 向同生盖层正断层, 并对沙一、二段和东营组的沉积相和沉积厚度分布有一定影响。

从变形特征上看, 伸展断裂系统是面状展布的正断层和横向的变换断层、变换带的变形组合, 而走滑断裂系统是线性延伸的主干走滑断层和分布在主

干走滑位移带附近的各种伴生构造要素。因此, 可以认为伸展断裂系统和走滑断裂系统是由不同的构造动力驱动而产生的两种不同运动学特征的构造变形。它们在构造变形的时空分布上有所不同, 但是在构造演化的某一时刻、某一断层并非非此即彼, 部分断层、特别是一些主干基底断层可能同时属于不同断裂系统的构造要素^[12]。从图 2 所示的剖面结构上看, 渐

新世时期 NNE-NE 向基底断层活动引起的差异沉降仍然是控制凹陷沉积充填的主要因素. 而这一时期辽西凹陷内部新生的大量 NEE 向盖层正断层表明 NNE-NE 向基底断层实际上具有右旋走滑正断层性质, 使辽河西部凹陷总体上表现为 NNW-SEE 向伸展变形. 图 6 中所示的 F2, F3 和 F4 等 NNE 向基底右旋走滑断层活动在新近纪-第四纪表现得最为明显, 但是这些基底断层在渐新世就已开始表现为右旋走滑活动, 只是它是叠加上区域伸展变形之上而使得一些构造要素发育的并不充分. 新近纪-第四纪时期辽西凹陷内部具有铲式形态或缓倾斜的 NNE-NE 向基底正断层没有活动, 而若干切割了新近系的陡倾斜 NNE 向基底断层表现为右旋走滑活动. 沿着这些陡倾的 NNE 向基底断层还发育了大量近 EW 向盖层正断层, 其中部分新近纪-第四纪活动的近 EW 向盖层正断层继承了渐新世活动的盖层正断层的基本特征, 但是由于它们密集斜列成带分布、单条断层的位移较小, 对新近纪-第四纪的沉积充填并没有明显的控制.

3 辽河西部凹陷的“郯庐断裂带”

早在 1971 年辽河油田就在西部凹陷钻探发现了 NNE 向的冷家堡逆冲断层, 但是对这一断层的解释及其成因分析一直有不同的认识^[13,14]. 现在的三维地震资料能够清楚地刻画这些陡倾的 NNE-NE 向基底断层在剖面上可以一直可以从基底切割到新近系, 不同区段可以表现为“正断层”、“逆断层”或“上逆下正”的反转断层等不同型式的位移特征. 同一条基底断层沿断层走向在不同剖面上表现出的倾斜的变化及不同型式的视位移现象是走滑断层特有的“丝带效应”(断层倾斜发生变化)和“海豚效应”(断层垂直地层断距发生变化)的表现^[15], 表明这些基底断层实际上可能具有“走滑位移”特征. 在凹陷中南部, 大部分 NNE-NE 向基底断层向上只切割到沙河街组, 但是在渐新统东营组、新近系馆陶组和明化镇组中沿着某些 NNE-NE 向基底断层发育有大量近 EW 向盖层断层(图 7), 暗示这些 NNE-NE 向基底断层后期可能发生了右旋走滑运动.

从图 6 和 7 所示的断层平面组合特征看, 辽河西部凹陷至少有 3 条 NNE-NE 向的基底断层具有右旋走滑位移特征(图 6 和图 7 中的 F2, F3 和 F4). 其中, 一条自辽河西部凹陷北段的台安附近向北延伸进入

辽河西部凹陷, 大致沿凹陷北部的牛心坨洼陷东部边缘分布(F2, 牛心坨东断层); 一条自辽河西部凹陷中南段的冷家附近斜向切入辽西凹陷(F3, 冷家-陈家断层); 一条大致沿着辽河西部凹陷的深洼带西部边缘延伸(F4, 盘山西-高升西断层). 这三条基底走滑断层的共同点是在平面上呈线性延伸, 在剖面上主断层面呈高角度向东倾斜或呈反铲式高角度倾斜, 并与分支断层、地层牵引褶皱等伴生构造现象一起在剖面上构造“花状构造”样式. 在横穿辽河西部凹陷东部边缘的地震剖面上(图 2), 可以观测到牛心坨东断层(F2)、冷家-陈家断层(F3)高角度向东倾斜的主断层面切割了总体上呈铲式正断层特征的凹陷主边界断层(F1, 台安-大洼断层), 并表现为逆冲断层位移. 盘山西-高升西断层在地震剖面上表现为切割盆地基底的一个断层破裂带, 主断层面难以确定, 在盆地盖层中则是 2~4 条陡倾断层相向交织在一起, 单条断层在剖面上以正断层位移为主, 断裂变形带总体上向深部变窄, 在盖层中构成漏斗状的小型地堑构造. 地堑内部的沙河街组明显向下挠曲, 东营组、馆陶组厚度明显增大. 在东营组、明化镇组构造图上(图 5 和 6), 盘山西-高升西断层(F4)并没有象牛心坨东断层(F2)和冷家-陈家断层(F3)那样线性连续延伸的断层, 而是发育左阶斜列的正断层组. 正断层组中的单条断层近 EW 向走向、延伸短, 总体上则沿着 NE 向构成窄而长的小型地堑. 这些现象表明盘山西-高升西断层应该是一条隐伏的基底走滑断层, 具有右旋走滑正断层位移特征.

辽河西部凹陷中的上述三条 NNE-NE 向基底走滑断层总体上向南撒开、向北收敛. 其中, 冷家-陈家断层不仅规模大、延伸长, 而且走滑运动学标志最终清楚. 图 8 是根据三维地震资料解释结果测量数据编制的冷家-陈家断层主断层面倾角和两盘地层垂直落差沿断层走向的变化图. 断层南段(冷家段)在剖面上表现为高角度向东倾斜, 显示出逆冲断层位移; 断层中段(陈家段)在剖面上表现为高角度向西倾斜, 显示正断层位移; 断层北段(张 2 井段)表现为高角度向西倾斜, 显示逆冲断层位移. 在平面上, 冷家段、张 2 井段为 NNE 向或近 SN 向延伸, 陈家段为 NE 向延伸. 前者在剖面上表现为逆冲断层位移, 后者表现为正断层位移, 实际上则是基底右旋走滑位移的结果. 辽河西部凹陷的一些陡倾的基底断层构成了斜切凹陷中北部的基底走滑剪切带, 其主位移带走向在凹陷

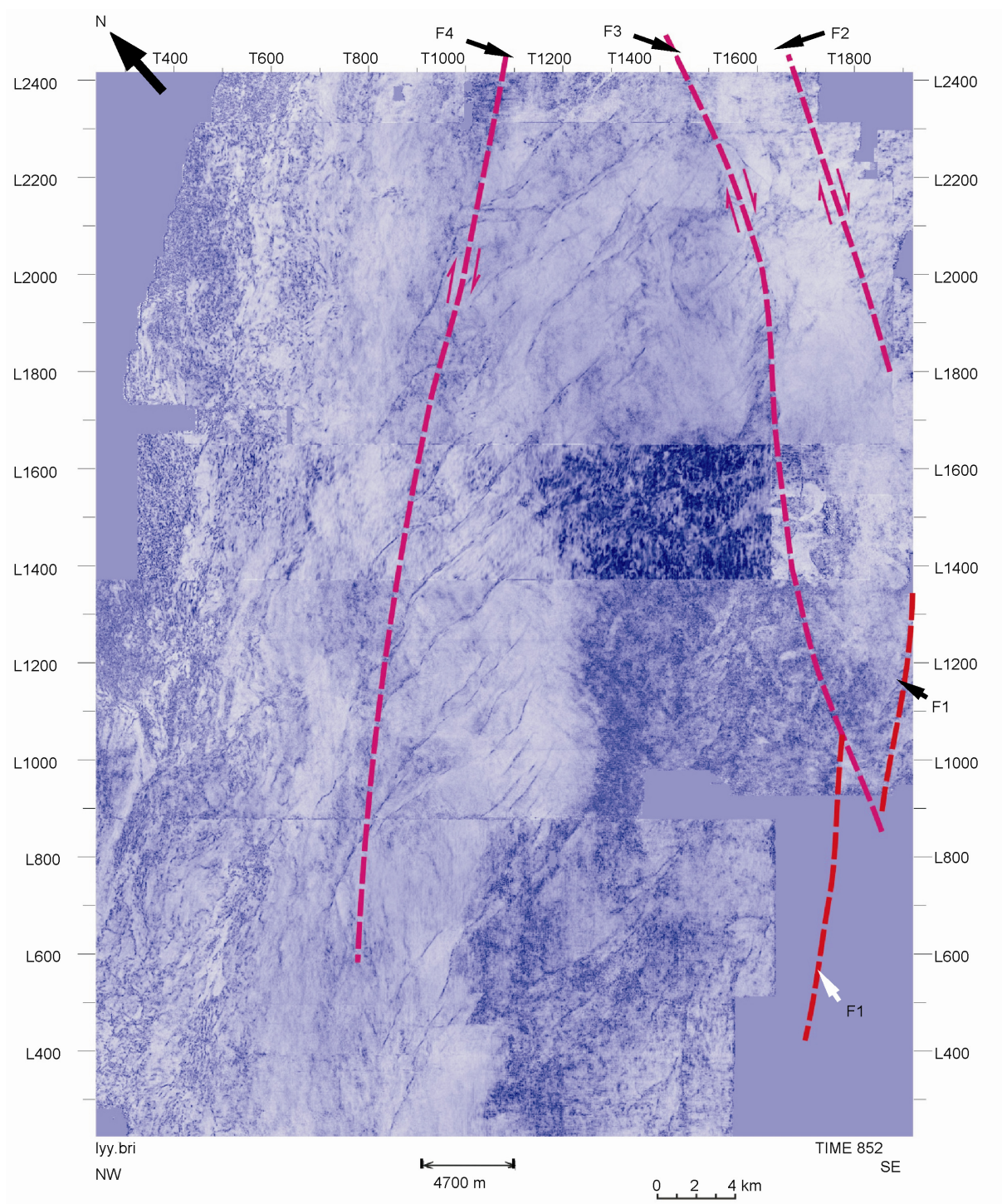


图 7 辽河西部凹陷中南部三维地震资料相干切片(850 ms)

三维地震数据体由辽河油田提供. F1: 台安-大洼断层, 主干伸展断层; F2: 牛心坨东断层, 主干走滑断层; F3: 冷家-陈家断层, 主干走滑断层; F4: 盘山西-高升西断层, 隐伏基底走滑断层

中部为 NNE 向, 在凹陷北部转为近 SN 向. 可以认为, 中部成为斜张变形区、北部形成斜压变形区. 凹陷南部, 基底右旋走滑断层走向的变化导致辽河西部凹陷南 NNE 向基底断层多发生正走滑位移, 并诱导沉积盖

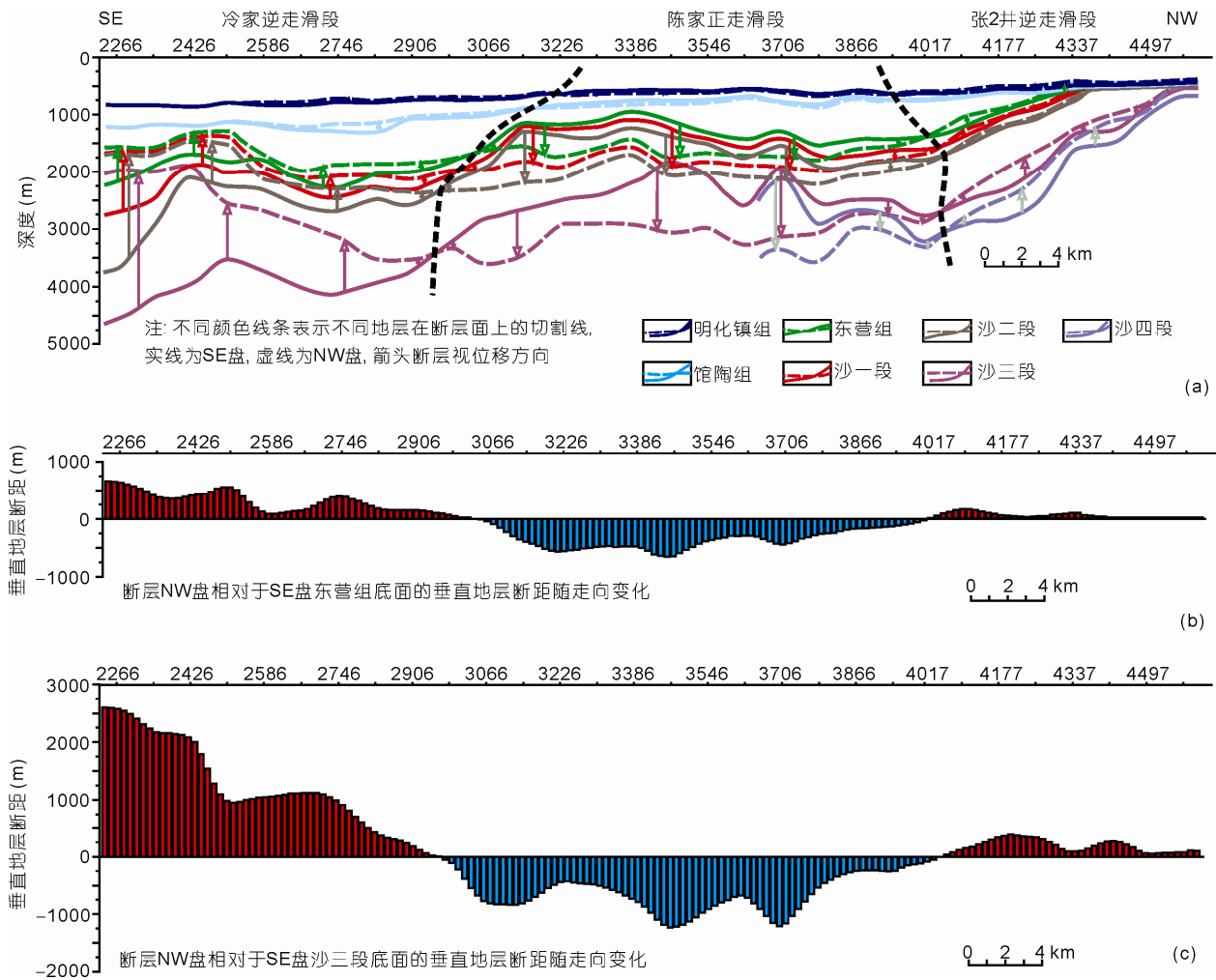


图 8 冷家-陈家断层落差沿走向变化图

(a) 断层面的地层切割线在垂直面上的投影; (b) 断层面上东营组底面垂直地层断距沿断层走滑的变化; (c) 断层面上沙三段底面垂直地层断距沿断层走滑的变化

层发育沿 NNE-NE 向基底断层发育近 EW 向的盖层同沉积正断层, 对东营组沉积厚度有明显影响; 而凹陷北部, 近 SN 向基底断层主要发生逆走滑位移, 且基底逆走滑断层可以一直切割到新近系甚至第四系, 或在剖面上表现出上逆下正的“正反转断层”位移特征。

区域地球物理资料表明, 郯庐深断裂带沿着辽东湾东部呈 NNE-NE 向延伸, 向北可以一直沿着辽河东部凹陷追踪到沈阳附近^[7,8,16]。横穿辽河拗陷南部的深部地震反射剖面揭示“郯庐深断裂带”的主破裂带在辽河拗陷东部凹陷^[9]。因此, 从宏观上看, 郯庐断裂带在辽河拗陷东部凹陷北端的沈阳附近与东

北地区的依兰-伊通断裂和敦化-密山断裂相连。油气勘探的地震资料解释和构造变形分析表明辽河拗陷存在伸展构造与走滑构造两个相对独立的新生代构造变形系统。其中, 辽河东部凹陷的走滑构造变形相对强烈, 但在大民屯凹陷和西部凹陷也有走滑构造变形痕迹。近些年来的三维地震资料进一步揭示出大民屯凹陷东、西边缘以及拗陷内部均发育有一系列 NE 向右旋走滑断层^[17,18]。因此, 可以认为辽河西部凹陷中的一系列具有右旋走滑特征的 NNE-NE 基底断层构成以冷家-陈家断层为主位移带的右旋走滑断裂带, 向南可能斜穿辽河拗陷中央凸起南延至辽东湾拗陷辽中凹陷东部边缘与沿辽东凸起延伸的郯庐

断裂主位移带连接在一起, 向北沿着大民屯凹陷向 NE 延伸与依兰-伊通断裂带相连, 应该属于广义上的“郯庐断裂带”的组成部分。

郯庐断裂带是一条至少切穿地壳而进入上地幔、或许切穿整个岩石圈的深断裂带^[9,10], 由许多不同尺度、发育在不同层次的断层(或破裂面、破裂带)构成。辽河西部凹陷中北段在构造变形性质、变形时间等方面, 与郯庐断裂带在渤海海域东部^[19-22]、辽河东部凹陷的构造活动表现相似, 显示渐新世以后一些 NE-NNE 向的盆地基底断层发生了右旋走滑位移。将辽河西部凹陷中北部的 NE-NNE 向的右旋走滑断裂理解为“郯庐断裂带”的组成部分是强调这些断裂与大致沿辽河东部凹陷延伸的郯庐断裂带的主破裂带在几何学、运动学上有内在联系。辽河西部凹陷中北段地区的基底走滑断层的产状总体上是向东陡倾, 向地壳深部可能直接或间接与连接在一起郯庐断裂带的主破裂带, 更重要的是它们在运动学上协调一致, 反映郯庐断裂带在新生代具有右旋走滑活动特征。

4 辽河西部凹陷新生代构造动力学模型

辽河西部凹陷属于渤海湾新生代裂陷盆地中的一个相对独立的构造单元。关于渤海湾新生代盆地的动力学过程, 许多学者进行过深入而有意义的讨论^[23-29], 多数学者多认为渤海湾新生代盆地属于地幔热活动驱动的板内裂陷盆地, 但是对导致板内地幔热活动的原因则有不同观点, 或是强调受西太平洋板块俯冲, 或是强调受印度-欧亚板块碰撞的远程效应影响, 或是两者的综合效应。在全球尺度上, 岩石圈底部的热作用与板块运动是统一的动力系统。但是对于裂陷盆地区域而言, 岩石圈底部的热底辟作用和板块运动引起的由板块边界传递到岩石圈内部挤压作用完全可以理解为两个不同的动力系统。一个作用在岩石圈底部边界上, 一个作用在岩石圈侧边界上。辽河西部凹陷发育大量的 NNE-NE 向基底正断层, 并以台安-大洼断层为主边界断层使古近系表现为东断西超的半地堑断陷结构, 盆地演化早期有大量的岩浆活动, 且充填的古近系沉积层明显受伸展断裂系统控制。这些现象表明古近纪伸展断陷的形成主要是受地幔热活动引起的底辟作用控制。渐新世-第四纪区域裂陷作用基本停止, 盆地区在热

地幔冷却过程中发生沉降, 充填的新近系-第四系总体上表现为拗陷结构。但是, 从辽河西部凹陷的断裂构造特征看, 新生代盆地发育过程中, 区域应力场有显著的变化。始新世发育大量 NNE-NE 向基底正断层, 表明这一时期的构造动力学环境是 NW-SEE 向或 NW-SE 向的区域引张应力场。渐新世(主要是东营组沉积期)凹陷内部除部分 NNE-NE 向基底正断层继承性活动外, 还发育有高角度的 NNE-NE 向基底右旋走滑断层和大量近 EW 向盖层正断层, 反映这一时期的构造动力学环境是 NW-SE 向或 NNW-SSE 向的斜向引张应力场。新近纪-第四纪虽然并不发育控制沉积作用的活动断层, 但是沿着凹陷内部的一些 NNE-NE 向基底断层发育有斜列的近 EW 向盖层正断层, 并且凹陷中北部一些高角度的 NNE-NE 向基底表现出强烈的右旋走滑断层变形特征, 反映这一时期的构造动力学环境是沿着 NNE 向基底断裂带的剪切作用, 或凹陷中南部表现为 NNW-SSE 向的斜向引张、凹陷中北部表现为 NNE-SSW 向的斜向挤压的应力场。

图 9 所示的动力学模型可以合理地解释辽河西部凹陷的新生代构造变形和构造演化特征, 包含两种动力学过程。其一, 地幔热活动、上地幔上隆和软流圈在岩石圈底部的侧向流动导致地壳引张破裂, 形成伸展构造变形; 其二, 受 NE-SW 向区域挤压影响一些 NNE 向深断裂(特别是郯庐断裂带)发生右旋剪切作用, 使盆地发生右旋走滑变形。这两种动力学过程可能是同时发生的, 但是由于强弱变化而导致在不同时期显示以不同的动力作用方式为主。始新世时期辽河西部凹陷总体上受地幔热底辟活动驱动地壳发生伸展构造变形, 形成大量 NNE-NE 向基底正断层, 并控制古近系的充填。渐新世开始, 随着地幔热底辟活动逐渐渐弱, 在 NE-SW 向区域挤压作用下郯庐深断裂带发生右旋走滑位移, 并使辽河西部凹陷在水平剪切作用下至少发育了 3 条 NNE 向的基底右旋走滑断层, 形成一系列与基底走滑断裂位移相关的构造变形。

构造应力驱动地壳变形应该是由深及浅的。由于岩石圈不同深度的流变学特征存在差异, 深层地壳及上地幔在在岩石圈底部地幔底辟作用诱发的区域引张作用下以韧性伸展为主, 浅层地壳以脆性破裂为主, 从而岩石圈或地壳内部发育近低角度或近

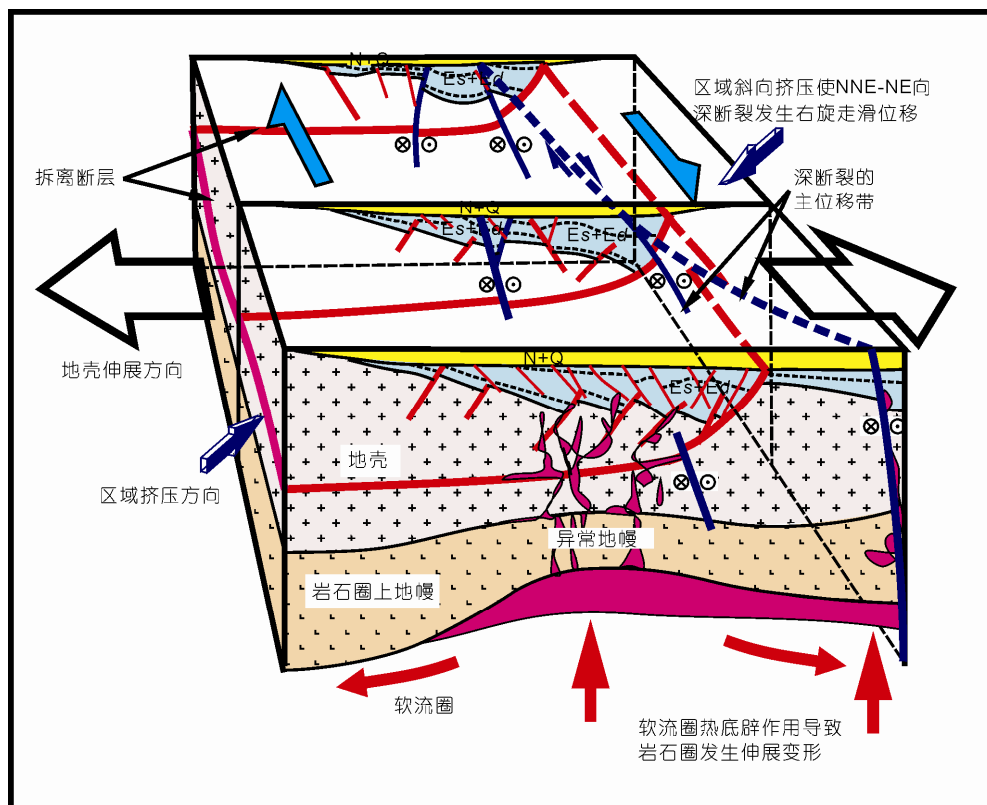


图 9 辽河西部凹陷新生代构造动力学模式图

水平的拆离断层. 地壳浅层的脆性破裂形成的正断层、走滑正断层向深部延伸与拆离断层连锁或“软连接”在一起, 构成控制古近纪盆地发育的伸展断层系统. 另一方面, 板块边界上由于板块相对运动产生的构造动力可以传递到板块内部, 与地幔热活动形成的地壳引张的构造动力叠加在一起, 使地壳应力场复杂化. 但是, 板块相对运动产生的构造动力在“刚性”板块部分传递, 而且只有挤压力能够传递到足够的区域. 因此, 地壳易于更易受到板块边界动力产生的区域挤压构造应力场的作用, 而且当地幔热活动相对减弱时, 区域挤压应力场的影响更加明显. 受西太平洋边缘太平洋板块与亚洲大陆板块运动的影响, 渐新世以来中国东部形成以 NEE-SWW 向或 NE-SW 向为主导的区域挤压构造应力场, 在这样的应力场作用下, NNE-NE 向的郯庐断裂带等深断裂以右旋走滑位移为主, 并诱导深断裂带附近的一些 NNE 向基底断层发生右旋走滑剪切位移, 发育 NNE-NE 向的右旋走滑构造变形带^[11,30-33].

图 10 示意表示了辽河西部凹陷 NNE-NE 向基底断层发生右旋走滑位移形成的构造变形. 渐新世及新近纪-第四纪, 随着地幔热底辟作用的渐弱, NE-SW 向区域挤压作用的相对增强, 辽河西部凹陷的一些 NNE-NE 向基底断裂发生右旋走滑位移. 但是由于断裂走向发生变化, 或许还受到基底断裂带结构的影响, 在辽河西部凹陷中北部在是始新世伸展构造基础上叠加了收缩-右旋走滑构造变形, 在南部叠加了伸展-右旋走滑构造变形(图 10(b)).

5 结论

通过对辽河西部凹陷新生代盆地结构、断裂系统的几何学和运动学特征分析, 本文得出如下几点结论.

(1) 辽河西部凹陷古近纪是一个受 NNE-NE 向基底伸展断层控制的“东断西超”的复式半地堑断陷, 但是渐新世以后受 NNE-NE 向基底走滑断层活动的影响, 导致凹陷中北部与南部有明显不同的结构特

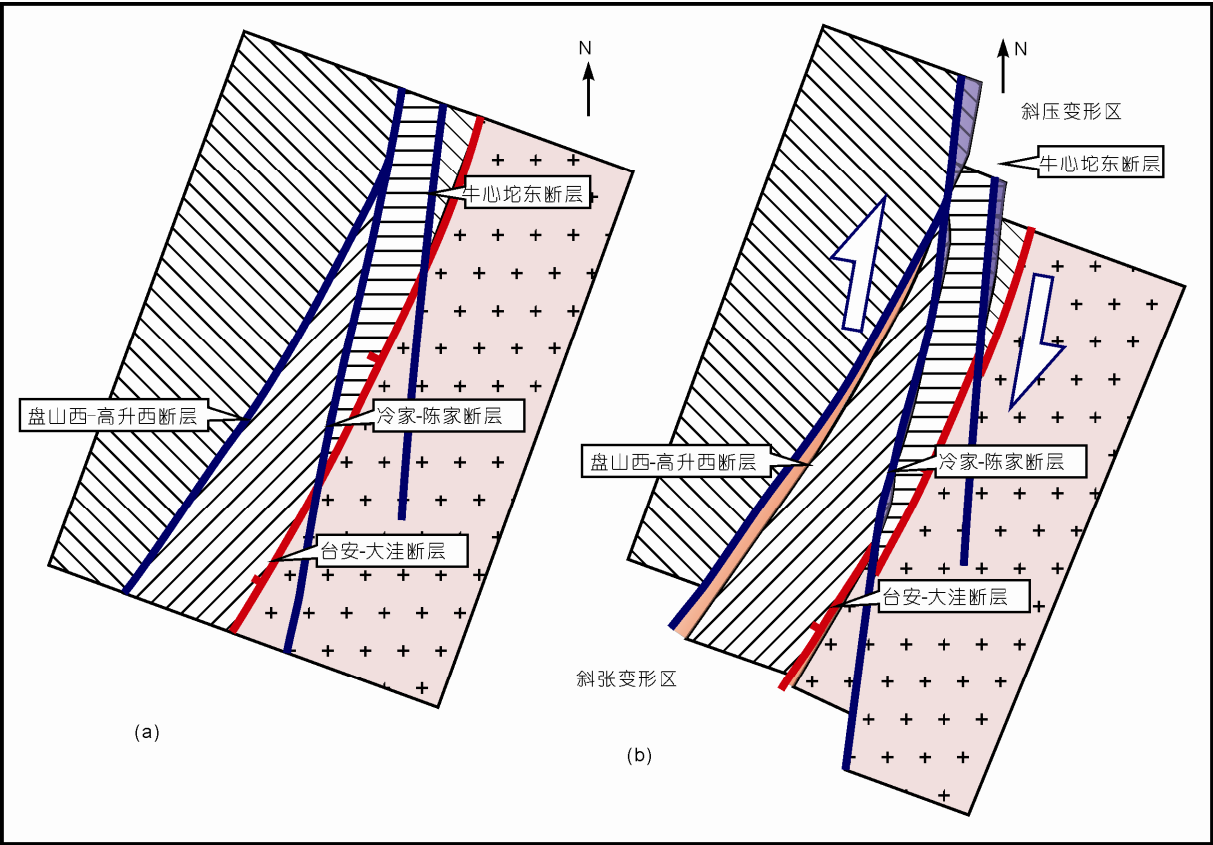


图 10 辽河西部凹陷 NNE-NE 向基底右旋走滑断层变形模式

(a) 未变形前的模型, 断层走向发生变化; (b) 走滑变形后的模型, 由于断层走向变化, 断层两盘的走滑位移导致局部发生斜压(面积重叠区域)和斜张变形(面积损失区域)

征, 前者表现为西侧受逆走滑断层限制、东侧以反转正断层为边界的复杂“地堑”结构, 后者仍保留“东断西超”的复式半地堑结构。

(2) 辽河西部凹陷存在 2~3 条 NNE-NE 向基底右旋走滑断层(带)。受主干基底走滑断层走向变化影响, 主干断层及其伴生构造在凹陷南部主要表现为伸展-走滑变形特征, 而在凹陷北部主要表现为收缩-走滑构造变形特征。

(3) 辽河西部凹陷 NNE-NE 向右旋走滑构造变

形可以视为宏观的“郯庐断裂带”的一部分, 是郯庐断裂带新生代右旋走滑活动在辽河西部凹陷的表现。郯庐断裂带从辽东湾海域东部向北分为两支, 其中东支向北纵贯辽河拗陷东部凹陷至沈阳附近与敦化-密山断裂连接, 西支从辽河西部凹陷中-北部、大民屯凹陷穿过并与依兰-伊通断裂相连, 它们在渐新世以后发生了右旋走滑位移, 切割了控制古近纪沉积凹陷的 NE-NNE 向伸展断层, 并诱导盆地盖层沿着基底走滑断裂带发育一系列近 EW 向的正断层。

致谢 尹宏伟教授阅读了手稿并与作者就论文涉及的构造问题进行了有益的讨论, 辽河油田提供了论文研究的三维地震资料, 审稿专家在审阅初稿后对论文提出了宝贵的修改意见。在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 徐嘉炜, 朱光. 中国东部郯庐断裂带构造模式讨论. 华北地质矿产杂志, 1995, 10: 121-134
- 2 乔秀夫, 张安棣. 华北块体、胶辽块体与郯庐断裂. 中国地质, 2002, 29: 337-244

- 3 张岳桥, 董树文. 郯庐断裂带中生代构造演化史: 进展与新认识. 地质通报, 2008, 27: 1371–1390
- 4 汤加富, 李怀坤, 娄清. 郯庐断裂带南段研究进展与断裂性质讨论. 地质通报, 2003, 22: 426–436
- 5 李嘉琪. 郯庐断裂带在渤海海域的地球物理场特征. 构造地质论丛, 3. 北京: 地质出版社, 1984. 219–237
- 6 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. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(增刊): 19–29
- 7 周伏洪. 关于郯庐断裂和东北南部主要断裂的关系. 地震地质, 1985, 7: 1–9
- 8 李东涛, 胡晋伟, 李景弘, 等. 郯庐断裂带在辽北地区三叠纪左行韧性剪切带的发现及变形特征. 地质与资源, 2008, 17: 254–259
- 9 卢造勋, 夏怀宽. 内蒙古东乌珠穆沁旗至辽宁东沟地学断面. 北京: 地震出版社, 1992. 27–40
- 10 吴振林, 路九华. 辽河断陷内郯庐断裂的位置及其对油区的控制. 石油学报, 1983, 4: 17–22
- 11 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. 长春科技大学学报, 1996, 26: 388–391
- 12 漆家福. 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, 2004, 1: 15–21
- 13 吴振林. 冷家堡逆断层的发现及其地质意义. 石油与天然气地质, 1981, 2: 195–197
- 14 罗群. 辽河盆地冷家地区陈家逆断层特征与油气分布. 新疆石油地质, 2000, 21: 110–113
- 15 Harding T P. Identification of wrench fault using subsurface structural data: Criteria and pitfalls. AAPG Bull, 1990, 74: 1590–1609
- 16 Huang W, Gao W, Ding G. Neogene volcanism and Holocene earthquakes in the Tanglu fault zone, Eastern China. Tectonophysics, 1996, 260: 259–270
- 17 郑孟林, 吴铁生, 王桂梁, 等. 辽河拗陷断层的选择性反转特征. 石油地球物理勘探, 2004, 39: 228–231
- 18 张玮, 李明杰, 孙增玖, 等. 辽河油田大民屯凹陷东部陡坡带的构造演化特征. 现代地质, 2008, 22: 489–494
- 19 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. AAPG Bull, 2004, 88: 71–97
- 20 季佑仙. 中国近海盆地平移断层特征及地震解释. 中国海上油气(地质), 2002, 16: 355–357
- 21 漆家福, 周心怀, 王谦身. 渤海海域中郯庐断裂带的结构模型及新生代运动学. 中国地质, 2010, 37: 1231–1241
- 22 Reilly O, Brendan J, Ge H X, et al. Fault geometry and kinematics in the Peng Lai 19-3 Field, Bohai Bay, People's Republic of China. AAPG Bull, 2000, 84: 1472
- 23 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 等. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造. 地质学报, 1983, 57: 22–32
- 24 Ye H, Shedlock K, Hellinger S, et al. The North China basin: An example of a Cenozoic rifted intracratonic basin. Tectonics, 1985, 4: 153–169
- 25 漆家福, 张一伟, 陆克政, 等. 渤海湾新生代裂陷盆地的伸展构造及其动力学过程. 石油实验地质, 1995, 17: 316–323
- 26 周建勋, 周建生. 渤海湾盆地新生代构造变形机制: 物理模拟和讨论. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36: 507–519
- 27 李三忠, 周立宏, 刘建忠, 等. 华北板块东部新生代断裂构造特征与盆地成因. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24: 57–66
- 28 Ren J, Tamaki K, Li S, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. Tectonophysics, 2002, 344: 175–205
- 29 Liu M, Cui X, Liu F. Cenozoic rifting and volcanism in Eastern China: A mantle dynamic link to the Indo-Asian collision? Tectonophysics, 2004, 393: 29–42
- 30 Qi J F, Yang Q. Cenozoic structural deformation and dynamic processes of the Bohai Bay basin province, China. Mar Pet Geol, 2010, 27: 757–771
- 31 Itoh Y, Tsutsumi H, Yamamoto H, et al. Active right-lateral strike-slip fault zone along the southern margin of the Japan Sea. Tectonophysics, 2002, 351: 301–314
- 32 Schellart W P, Lister G S. The role of East Asian active margin in widespread and strike-slip deformation in East Asia. J Geol Soc, 2005, 162: 959–972
- 33 Yin A, Nie S Y. An indentation model for the north and south China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, Eastern Asia. Tectonics, 1993, 12: 801–813