

渤海湾盆地辽河西部凹陷古近纪变形特征及成因

于福生^{1,2},董月霞³,童亨茂^{1,2},熊连桥²,龙 娴²(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 冀东油田分公司 勘探开发研究院,河北 唐山 063004)

摘要:辽河西部凹陷位于渤海湾盆地东北部,其古近纪构造演化与成因机制研究不仅对油气勘探具有指导作用,同时对深入分析渤海湾盆地和郑庐断裂带的成因演化也具有启示意义。通过三维地震资料系统解释和编图、同沉积断裂系统与沉积厚度关系分析、断层活动强度统计等方面研究,认为辽河西部凹陷在古近纪经历了早期伸展和晚期走滑两期变形叠加过程。早期伸展变形发生在始新世,包括初始断陷期(E_s^4)和强烈断陷期(E_s^3)两个阶段,形成北东向主干断层及东断西超的半地堑世组合,控制北东向沉积中心的展布;晚期走滑变形发生在渐新世东营期,使先存北东走向基底断层发生右旋走滑位移,并诱导盖层形成近东西向新生正断层组合,从而形成南部张扭沉降、北部压扭隆升的构造格局。 E_s^{1-2} 期是从伸展变形向走滑变形发展的过渡时期,构造活动微弱。区域构造应力场分析和沙箱实验证明,始新世北东向伸展断裂系统受太平洋板块俯冲产生的北西-南东向弧后拉张作用控制,而渐新世走滑断裂系统则受郑庐断裂右旋走滑作用控制,动因来源于印度-澳大利亚板块向欧亚板块俯冲作用产生的远程效应。

关键词:伸展构造;走滑构造;砂箱模型;构造变形;辽河西部凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Characteristics and origins of structural deformation in the Paleogene in the Western Sag of Liaohe Depression, Bohai Bay Basin

Yu Fusheng^{1,2}, Dong Yuexia³, Tong Hengmao^{1,2}, Xiong Lianqiao², Long Xian²

(1. State Key Lab of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. College of Earth Sciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei 063004, China)

Abstract: Research on structural evolution and dynamic processes in the Western Sag of Liaohe Depression is significant to not only oil and gas exploration, but also analysis of the evolution of Bohai Bay Basin and Tanlu Fault. According to seismic interpretation, analysis of the relationship between fault system, deposition thickness and the characteristics of fault intensity, it was concluded that the Western Sag of Liaohe Depression underwent two-phase deformation superimposition in the Paleogene. The early Eocene extensional phase including an initial fault depression stage (E_s^4) and a strong fault depression stage (E_s^3) resulted in the NE-SW-trending major normal faults and half-graben filled by the fourth and the third member of Shahejie Formation. The later Oligocene strike-slip phase during Dongying Formation caused the right-lateral strike-slip of the pre-existed basement faults and the formation of new normal fault arrays in NEE-SWW orientation. A structure style with transtension subsidence in the south part and transpression erosion in the north part formed during this stages owing to strike-slip displacement. The transition from extensional deformation to strike-slip deformation occurred during E_s^{1-2} . Regional field analyses and sand box simulation results show that the Eocene extensional fault system was controlled by back-arc extension stress, which was triggered by subduction roll-back of the oceanic Pacific Plate from the Asian Continent. And the Oligocene strike-slip fault system was controlled by dextral displacement of Tanlu Fault, caused by the collision of Indian-Australian Plate with the Eurasian Plate.

Key words: extensional structure, strike-slip structure, sand-box model, structural deformation, Western Sag of Liaohe Depression, Bohai Bay Basin

收稿日期:2014-06-20;修订日期:2014-10-20。

第一作者简介:于福生(1969—),男,博士、副教授,构造地质。E-mail: fushengyu@cup.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05006-006-02-001);国家自然科学基金项目(41472116)。

辽河西部凹陷呈北东向展布在渤海湾盆地的东北部,属于辽河拗陷内的次级负向构造单元,是渤海湾盆地典型的富油气凹陷之一。笔者等人^[1]依据古近系分布特征和东营组沉积后的构造形态特征,将西部凹陷划分出九个次级构造单元(图1)。由于郯庐断裂带的西侧分支从该凹陷内穿过^[2-6],造成凹陷内部新生代构造表现出伸展构造与走滑构造叠加、张扭构造与压扭构造分段相间的复杂变形格局,导致不同研究者对西部凹陷古近纪构造演化阶段的划分及变形的性质认识不一,大致存在3种观点:①沙河街期为伸展断陷变形期,东营期为右旋走滑叠加伸展变形期^[2-7];②沙四、沙三期为断陷期,沙一、沙二期为断-拗转换期,东营期为右旋走滑期^[8-12];③沙四、沙三期为断陷期,沙一、沙二期为断-拗转换期,东营期为拗陷期,区域应力场方向没有发生改变^[13]。产生分歧的原因在于对东营期变形的力学性质及其与郯庐断裂带间的关系分

析不够透彻,缺乏古断裂对沉积的控制作用研究,更缺乏物理模拟验证工作。本文在对辽河西部凹陷三维地震资料系统解释基础上,通过构造变形样式的差异、同沉积断裂系统对沉积中心的控制作用等方面研究,对西部凹陷古近纪构造变形特征及成因进行了分析,并运用构造物理模拟手段对成因机制进行了模拟验证。

1 古近纪凹陷结构特征

三维地震剖面解释和编图成果揭示辽河西部凹陷在剖面上总体表现为东断西超的半地堑结构(图2),整体受凹陷东侧北东走向的台安-大洼主边界断层控制,但由于主干边界断层的产状、位移量沿走向的变化以及构造演化过程的叠加改造,凹陷结构沿轴向具有明显的变化,形成平面上南、北分块的构造格局。根据凹陷内断裂性质和沉积充填特征差异可划分出北段、

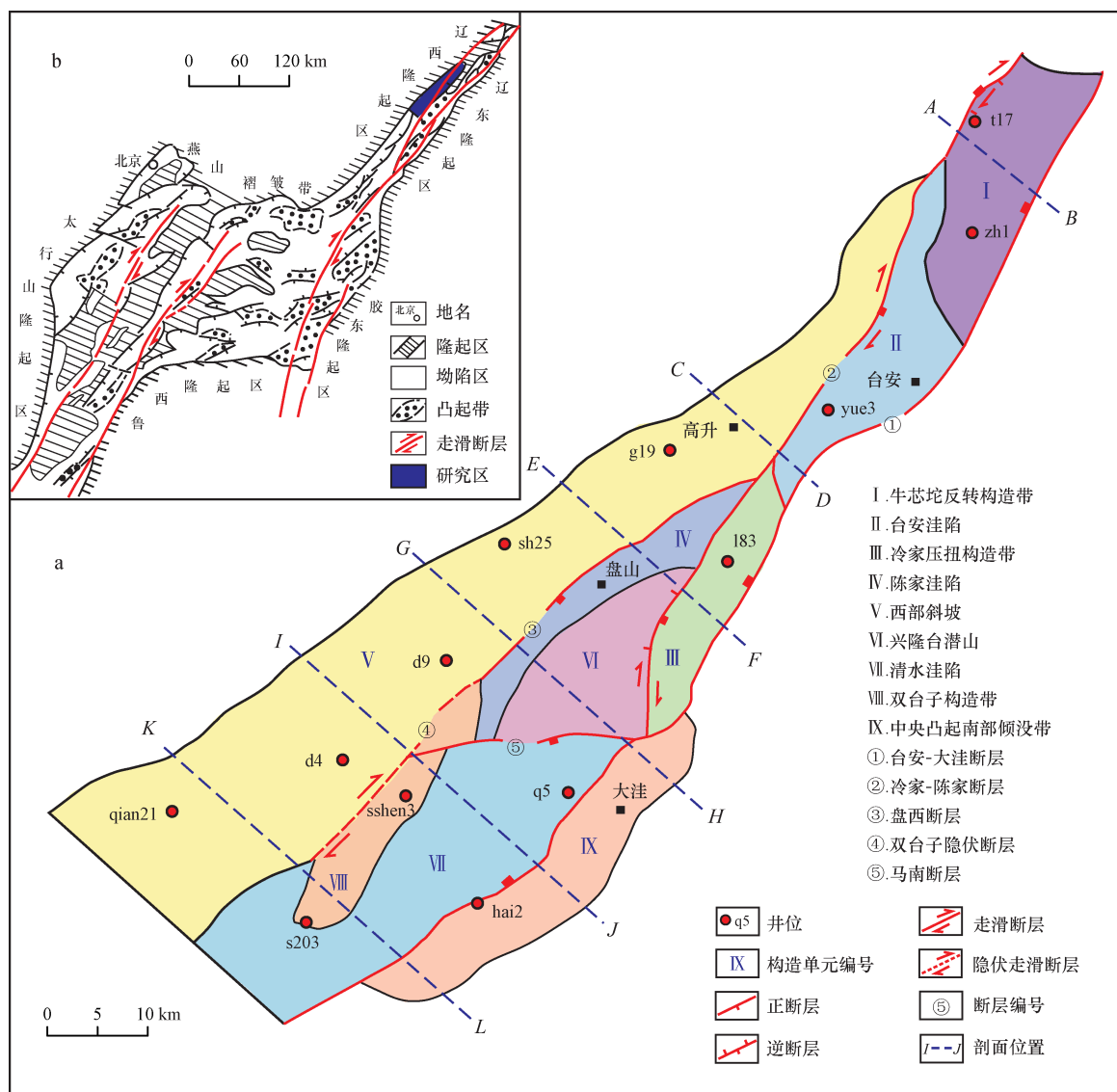


图1 辽河西部凹陷构造单元(a)和渤海湾盆地构造纲要(b)^[3]

Fig. 1 Sketch map of structural units in the Western Sag of Liaohe Depression (a) and the structural framework of Bohai Bay Basin (b)^[3]

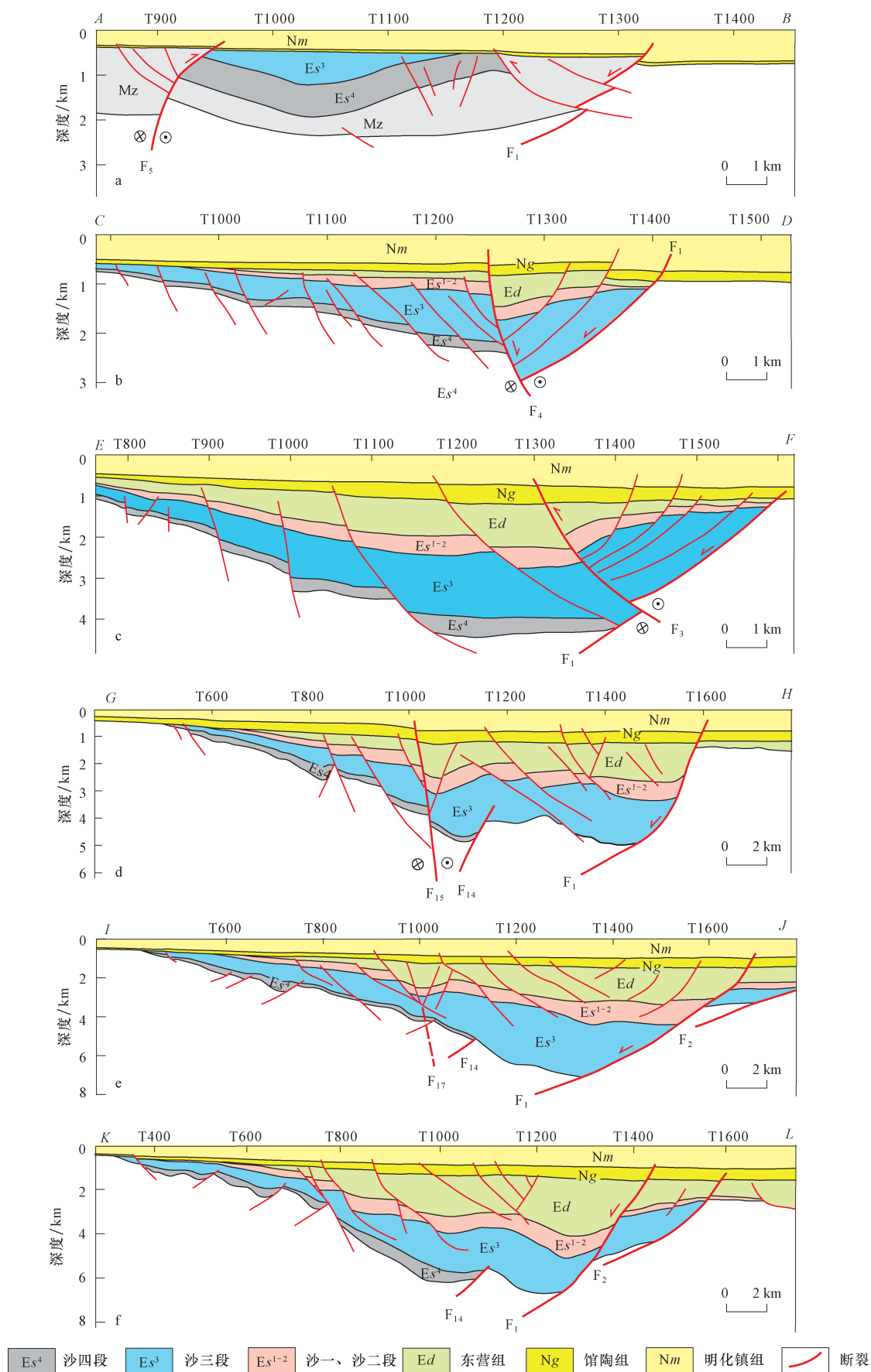


图 2 辽河西部凹陷联合地震剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 2 Seismic profiles of the Western Sag of Liaohe Depression(see Fig. 1 for profile location)

F₁. 台安-大洼断层; F₂. 大洼分支断层; F₃. 冷家压扭性断层; F₄. 陈家张(扭)性断层; F₅. 牛芯坨西压扭性断层;

F₁₄ - 双台子断层; F₁₅ - 盘西断层; F₁₇ - 双台子隐伏断层

中北段、中段、中南段、南段5个区域。北段仅包括牛芯坨反转构造带一个构造单元(图1),凹陷西侧边界为牛芯坨压扭性逆断层(F_5),发育非典型的正花状构造(图2A—B剖面);凹陷东侧台安—大洼断层(F_1)发生反转,凹陷内部仅残存沙四段(Es^4)和沙三段(Es^3),缺失沙一、沙二段(Es^{1-2})和东营组,凹陷结构表现为残存的向斜构造。中北段包含台安洼陷和西部斜坡高升以北区域(图1),始新世沙四段(Es^4)和沙三段(Es^3)沉积时期为东断西超的半地堑结构(图2C—D剖面),在西部斜坡带上发育与台安—大洼断层(F_1)反向倾斜的“多米诺”式断层组合。始新世东营组沉积时期,走滑活动强烈,形成的陈家张扭性断层(F_4)切割台安—大洼断层(F_1),并控制东营组沉积,形成窄条状洼陷槽,沉积厚度约为1 600 m。中段包含冷家压扭构造带、陈家洼陷、西部斜坡、兴隆台潜山等四个构造单元(图1)。与中北段显著差异是东营组沉积时期走滑活动形成的断层表现为压扭性断层,即冷家压扭性断(F_3),切割台安—大洼断层(F_1),使东营组沉积厚度向两侧减薄,超覆在下伏地层之上(图2E—F剖面)。中南段包含中央凸起南部倾没带、清水洼陷、双台子构造带、西部斜坡及陈家洼陷和兴隆台潜山南部区域。沙四段(Es^4)和沙三段(Es^3)沉积时期为东断西超的半地堑结构(图2G—H剖面、I—J剖面),斜坡带上的次级断层与台安—大洼断层组成同向“多米诺”式断层组合。但是,控制沙四段(Es^4)沉积的边界断层不是台安—大洼断层(F_1),而是双台子断层(F_{14}),沙四段(Es^4)沉积厚度和分布范围明显小于沙三段(Es^3)。东营组沉积时期,受走滑活动影响,在斜坡—深陷过渡带发育一条右旋走滑断层,即盘西断层(F_{15})—双台子隐伏断层(F_{17}),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。南段主要为清水洼陷和西部斜坡区域,属于典型的复式半地堑断陷特征,基底走滑断层不发育。台安—大洼断层(F_1)是沙三段—东营组的控陷断层,大洼分支断层(F_2)是断陷边界断层(图2K—L剖面)。

2 古近纪两期构造变形特征

2.1 两期断裂系统的划分

辽河西部凹陷古近纪变形主要表现为断裂构造,新编制的同沉积断裂系统(图3)和构造演化剖面(图4)显示辽河西部凹陷古近纪断裂构造可划分为始新世和渐新世两期。始新世断裂发育在沙四段(Es^4)和沙三段(Es^3)沉积时期,形成的断裂构造在剖面上向下切割至前古近系基底,向上终止在沙三段下部,少量断层

虽然延伸至东营组,但断距明显减小,属于晚期继承性活动断层;次级断层与主边界断层在剖面上组成同向或反向的“多米诺”组合,在平面上呈北北东—北东向平行带状展布(图3a,b);断裂性质均为正断层,整体构成伸展断裂系统。渐新世断裂主要发育在东营组沉积时期,形成的断层大部分向上延伸终止在馆陶组(Ng)区域性不整合面之下,向下滑脱在东营组下部或沙三段泥岩层内;斜坡上的次级断层与主边界断层倾向相反,平面走向呈北东东向,与主边界断层呈大角度相交(图3d);断层性质除正断层外,还发育压扭性和张扭性走滑断层,整体构成走滑断裂系统。沙一、沙二段沉积时期活动的断层数量较少,属于伸展断陷活动向走滑活动转换的过度时期,构造强度较弱。

2.2 伸展断裂系统活动特征

始新世伸展断裂系统主要表现为北北东—北东走向的正断层,包括台安—大洼断层(F_1)、陈家断层(F_4)、双台子断层(F_{14})、盘西断层(F_{15})、西八千断层(F_{16})、高19井断层(F_{13})、大洼分支断层(F_2)等8条主干断层及规模较小的次级断层(图3a,b)。根据断层的发育数量、主干断层的发育规模和活动强度可划分为沙四期初始断陷、沙三期强烈断陷两个演化阶段,其主要差异在于:①沙四期形成的断层数量和规模明显小于沙三期形成的断层;②沙四段在凹陷南部和中南部的东侧边界断层为双台子断层(F_{14}),在凹陷中北部和北部东侧边界断层为台安—大洼断层(F_1),西侧边界断层为陈家断层(F_4 ,虚线部分表示推测),而沙三段在凹陷南部和中南部的东侧边界断层为大洼分支断层(F_2),在凹陷中部、中北部和北部东侧边界断层为台安—大洼断层(F_1)(图3a,b);③沙四期的边界断层对沉积充填的控制作用不强烈,沉积中心分布零散,北厚、南薄特征明显,最大厚度1 400 m(图5);沙三期的边界断层对沉积充填的控制作用十分强烈,沉积中心分布集中在主控边界断层下盘,南厚北薄特征明显,最大厚度3 600 m;④平衡演化剖面(图4)和原始沉积厚度(图5)显示西部斜坡区沙四段厚度和其它地区大体相仿,而沙三段的厚度明显小于清水洼陷、陈家洼陷和台安洼陷的厚度,说明西部斜坡区及西部凹陷的构造格局主要形成在沙三期强烈断陷阶段,整体受台安—大洼断层控制。⑤伸展量和沉降量差异较大,沙四期伸展量为2%~5%,北强南弱;沙三期伸展量为7%~22%,南强北弱。

2.3 走滑断裂系统活动特征

新编制的沙一、沙二期和东营组同沉积断裂系统(图3c,d)说明走滑断裂系统主要发育在东营期,由

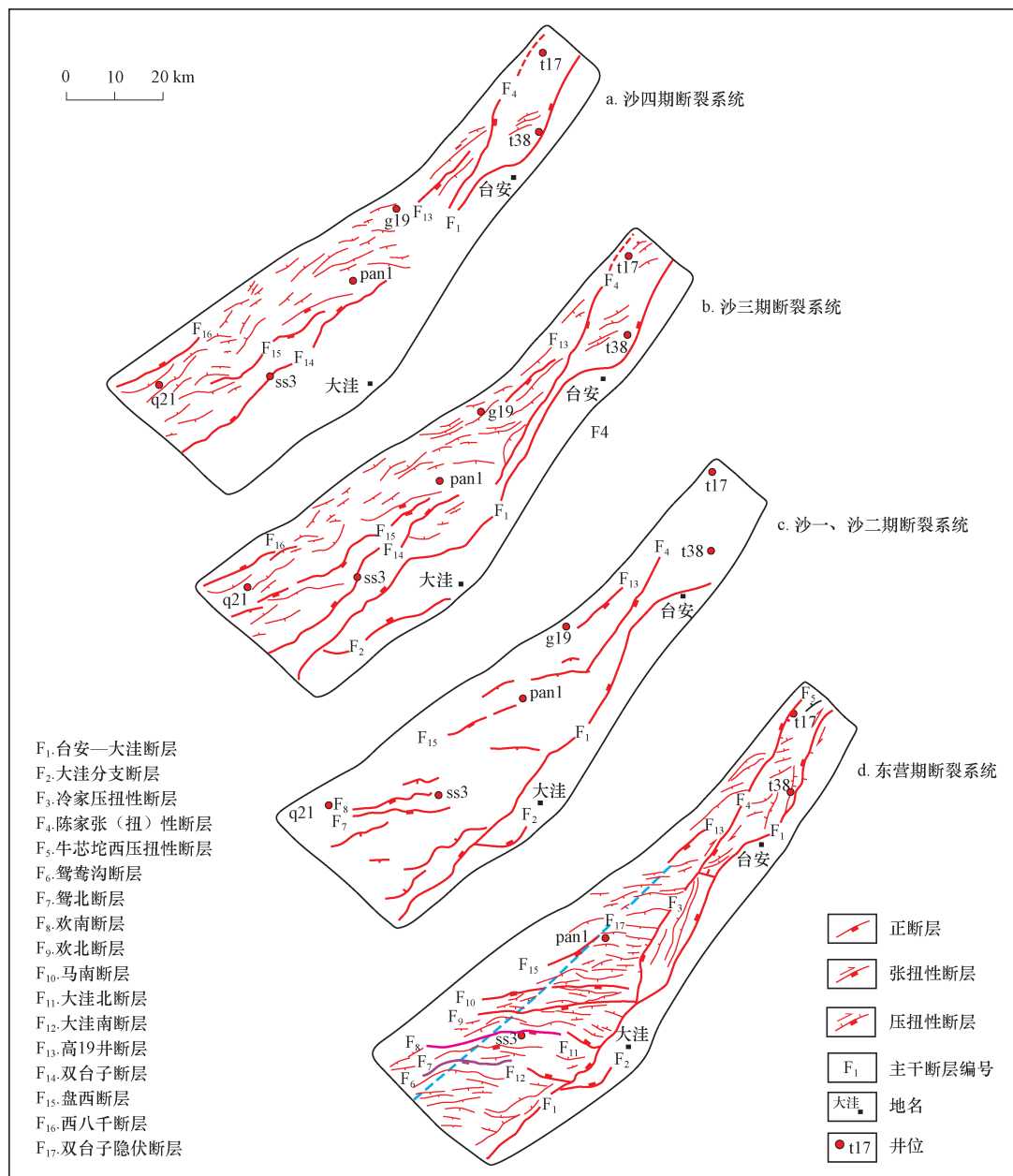


图3 辽河西部凹陷新生代不同时期古断裂系统

Fig. 3 Evolution maps of faults in different periods of the Western Sag of Liaohe Depression

北东东走向张性正断层和北北东—北东走向的基底走滑断层构成,两者在平面上的交接关系显示右旋走滑特点。

北东东走向张性正断层在平面上组成“雁列式”组合和“帚状”(或“梳状”)组合。“雁列式”组合在凹陷中央形成盆地尺度的雁列断层构造带,在剖面上表现为非常显著的、节节南掉的阶梯状断层组合,主要断层有马南断层(F₁₀)、欢北断层(F₉)、欢南断层(F₈)、鸳北断层(F₇)、鸳鸯沟断层(F₆)(图3d)、大洼北断层(F₁₁)、大洼南断层(F₁₂),其中的鸳鸯沟断层(F₆)对东营组沉积具有控制作用,形成的近东西向沉积中心厚度约为1 900 m。“帚状”(或“梳状”)组合分布在凹陷东侧和北侧的基底走滑断层上盘,形成大洼—海外河“帚状”构造段、冷家“帚状”构造段、陈家“帚状”构造

段,同一“帚状”构造段内的次级断层的倾向相同,不同“帚状”构造段次级断层的倾向相反,其中大洼—海外河“帚状”构造段内的大洼南断层(F₁₁)、大洼北断层(F₁₂)对东营组沉积具有控制作用,形成的近东西向沉积中心厚度为1 800~2 200 m,叠加在沙三期北东向沉积中心之上。

北北东—北东走向基底走滑断层有显形走滑断层和隐形走滑断层,走向与凹陷的轴线方位基本一致。显形走滑断层主要为凹陷东部的台安—大洼断层(F₁)、冷家压扭性断层(F₃)、陈家张扭性断层(F₄)、牛芯坨西压扭性断层(F₅)。其中,台安—大洼断层在北部表现为压扭性特点,在南部表现为张扭性特点,并持续至明化镇组;冷家压扭性断层—陈家张扭性断层—牛芯坨西压扭性断层在走向上因地层垂向断距发生明

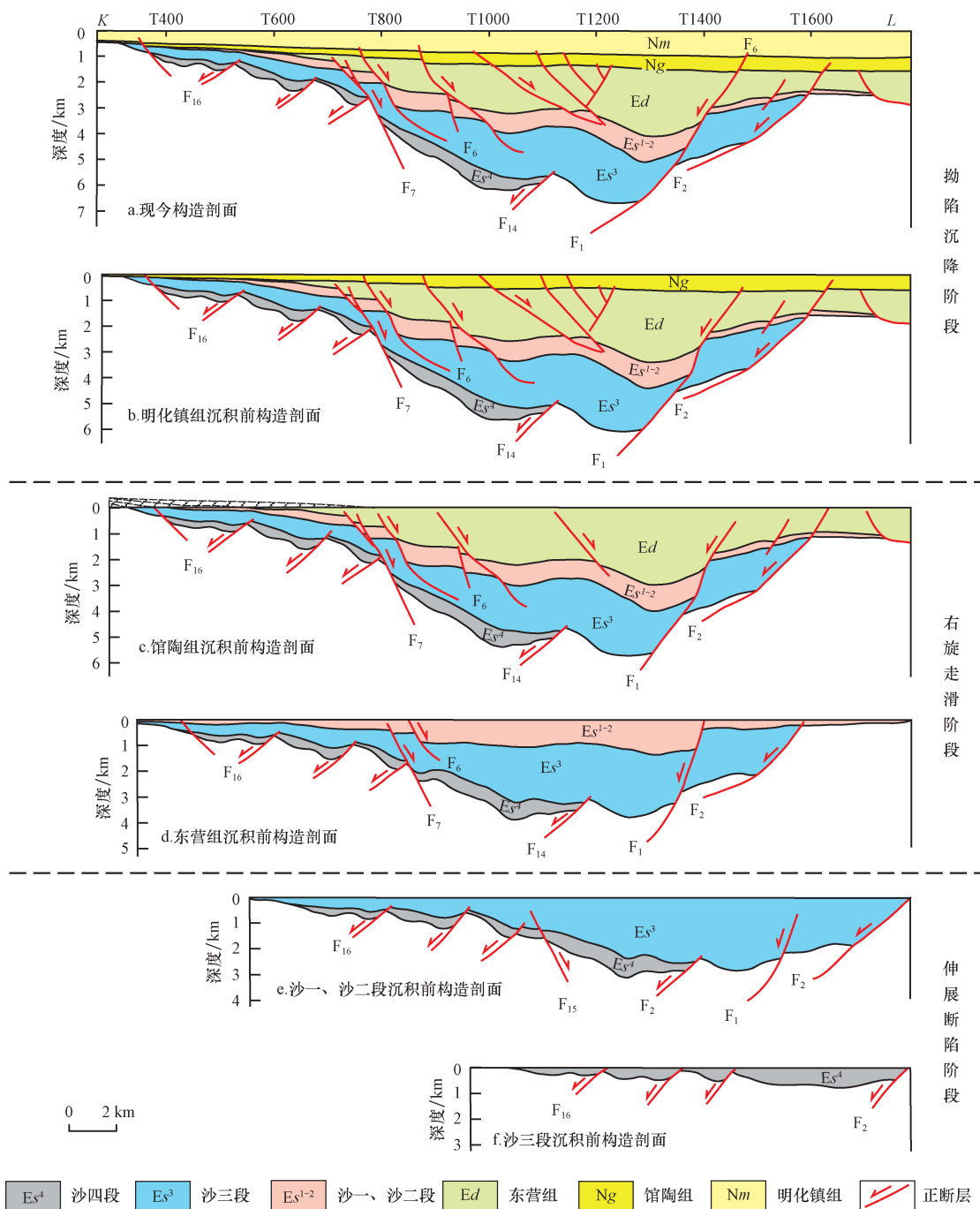


图4 辽河西部凹陷构造演化剖面

Fig. 4 Structural evolution profiles of the Western Sag of Liaohe Depression

F₁: 台安-大洼断层; F₂: 大洼分支断层; F₆: 鸳鸯沟断层; F₇: 鸳北断层; F₁₄: 双台子断层; F₁₅: 盘西断层; F₁₆: 西八千断层

显变化而表现出“海豚效应”^[6],使沙三段至东营组在牛芯坨隆起构造带遭受强烈剥蚀,剥蚀厚度达1 600 m^[14],而在台安洼陷接受巨厚沉积,厚度为1 600 m。隐形走滑断层主要为双西隐伏走滑断层,控制雁列式正断层的发育,通过构造物理模拟方法推算得出的东营期右旋走滑位移量约为10.5 km^[9]。

3 古近纪变形成因机制

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,其成因机制与渤海湾及邻庐断裂的演化关系密切。前人关于渤海湾盆地新生代的运动学模式和动力学机制进行过深入的研究工作,可总结出3种观点:①北西-南东向伸展模式,强调伸展作用,认为渤海湾盆地始新世形成的北东走向断陷是地幔或软流圈上涌造成的主动裂陷作用,渐新世北东-北北东向走滑构造带是叠加在伸展构造系统之上而保持自身相对独立与统一的断裂体系,只对伸展构造系统起到改造作用^[15-19];②走滑拉分模式,强调走滑作用,认为渤海湾盆地是在早期伸展构造背景上叠加了

后期走滑拉分作用而形成的伸展-拉分型复合盆地,属于被动裂陷盆地,北北东向右行平移正断层的拉分活动是盆地形成的主要因素^[20],动因来自于太平洋板块俯冲和印度-欧亚板块碰撞产生的综合效应^[20-24];③近南北向伸展模式,强调南北向伸展作用,认为近东西向断层是渤海湾盆地主要控陷断层,动力作用来自于太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲产生的“板片窗”效应^[25-26]。上述3种观点分歧的焦点是:渤海湾盆地是伸展型盆地,还是走滑拉分型盆地?是软流圈热底辟形成的主动裂陷作用,还是因板块的俯冲挤压或俯冲后撤形成的裂陷作用?

辽河西部凹陷和渤海湾盆地其他凹陷始新世发育的北东向控陷断层均表现为深切基底的正滑断层,在剖面上组成地堑式、半地堑式结构,主控边界断层呈上陡下缓的铲式形态,没有走滑分量,说明北东向控陷断层是在北西-南东向伸展作用下形成的。渤海湾盆地及邻区大地构造背景研究成果、天然地震层析研究成果和火山岩研究成果表明,这种北西-南东向伸展作用与太平洋板块俯冲后撤作用有关。中国东部及邻区在新生代进入以太平洋板块向欧亚大陆岩石圈板块俯冲碰撞阶段,由此引起的岩石圈和软流圈的相互作用而导致的陆内伸展扩张是中国东部的构造热事件,并形成了渤海湾盆地、南黄海盆地和东海盆地等一系列大型伸展盆地^[27]。天然地震层析研究成果^[28]、长波大地电磁测深成果^[29]和数值模拟结果^[30]都一致证实太平洋板块在沙三期(42 Ma)向北西西方向俯冲在中国大陆板块670 km深的上、下地幔界面处,因太平洋板块的俯冲后撤速度大于中国大陆板块向南东方向的仰冲速度,导致弧后陆内扩张作用,从而导致深部软流圈地幔上涌对流,形成了渐新世来源于软流圈地幔的碱性橄榄玄武岩和渤海湾盆地内的大型伸展断裂,如太行山前断裂、沧东断裂、郯庐断裂等规模较大的北东向正断层,它们控制沙四段和沙三段的沉积。

辽河西部凹陷渐新世东营期发育的北北东-北东走向的走滑断层是郯庐断裂北段延伸部分,与其诱导的北东东走向正断层构成独立的右旋走滑断裂系统,其控制的东营组北东东向和北北东向沉积中心叠加在沙三段北东向沉积中心之上。产生郯庐断裂右旋走滑的挤压应力方向应该是北北东-南南西方向,而太平洋板块在此时的俯冲挤压方向为北西西向,只能使郯庐断裂发生左旋走滑,所以用太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲产生的效应很难解释郯庐断裂的右旋走滑活动。而此时印度-澳大利亚板块向欧亚大陆板块碰撞的方向右北东向转为北北东向,容易使北北东-北东走向的郯庐断裂发生右旋位移,所以其可能是东营期

右旋走滑活动是主要动因^[23]。由于先存基底正断层的走向和倾角的变化及先期基底断裂带结构的差异,发育在西部凹陷的走滑断层沿走向表现出“海豚效应”,在辽河西部凹陷中段和北段的始新世伸展构造基础上叠加了右旋压扭构造变形,而在中南段和南段区域的始新世伸展构造基础上叠加了右旋张扭构造变形。

根据渤海湾盆地区域构造演化背景和辽河西部凹陷古近纪两期构造变形特征建立的成因模式图显示,始新世沙四期-沙三期形成的伸展断裂系统受软流圈热底辟作用控制,动力来源于太平洋板块俯冲后撤产生的弧后拉张作用;渐新世东营期形成的右旋走滑断裂系统受印度-澳大利亚板块碰撞产生的斜向挤压作用控制(图5)。

4 构造物理模拟

为了验证郯庐断裂右旋走滑活动在辽河西部凹陷产生的构造变形差异而设计的沙箱实验模型(图6)。模型底部左侧设计为弧形断块,厚5 mm,曲率半径40 cm,北端连接驱动马达,受马达牵引相对于右侧的基底断块发生右旋走滑运动。底部刚性的模板之上铺盖粒径为0.2~0.3 mm的干沙层,相当于基底断裂上覆的盖层。马达转速300转/分钟,每隔0.5 cm位移进行照相。

基底右旋位移5 cm后的平面图像和剖面切片图像解释结果显示基底右旋走滑在北部盖层产生压扭性断层,在南部盖层产生正断层和张扭性断层。模型中的基底主走滑位移带与基底“断块”位移矢量方向并不完全平行,基底上覆沙层在北部处于斜压状态,导致沙层产生右旋压扭变形,构成正花状构造样式。基底上覆沙层在南部处于斜张状态,导致沙层产生右旋张扭变形,构成负花状构造样式。而中间的过渡区段则仅发育走滑断层。

上述物理模拟实验说明,辽河西部凹陷北段和南段新生代构造变形的差异应该是穿过辽河西部凹陷的郯庐断裂带主位移带走向变化引起的。从盆地中表现的右旋走滑构造带的分布看,郯庐断裂带深层断裂在辽东湾北段分支为两条,西支的总体走向是近南北向,但是与一些北北东向基底断裂交切后则在辽河西部凹陷东部构成弧形的基底走滑主位移带,致使在区域右旋走滑作用下辽河西部凹陷北段出现压扭性断层,南段出现右旋张扭性断层。

5 讨论与结论

由于断层走向的变化,沿断层面的走滑位移可能

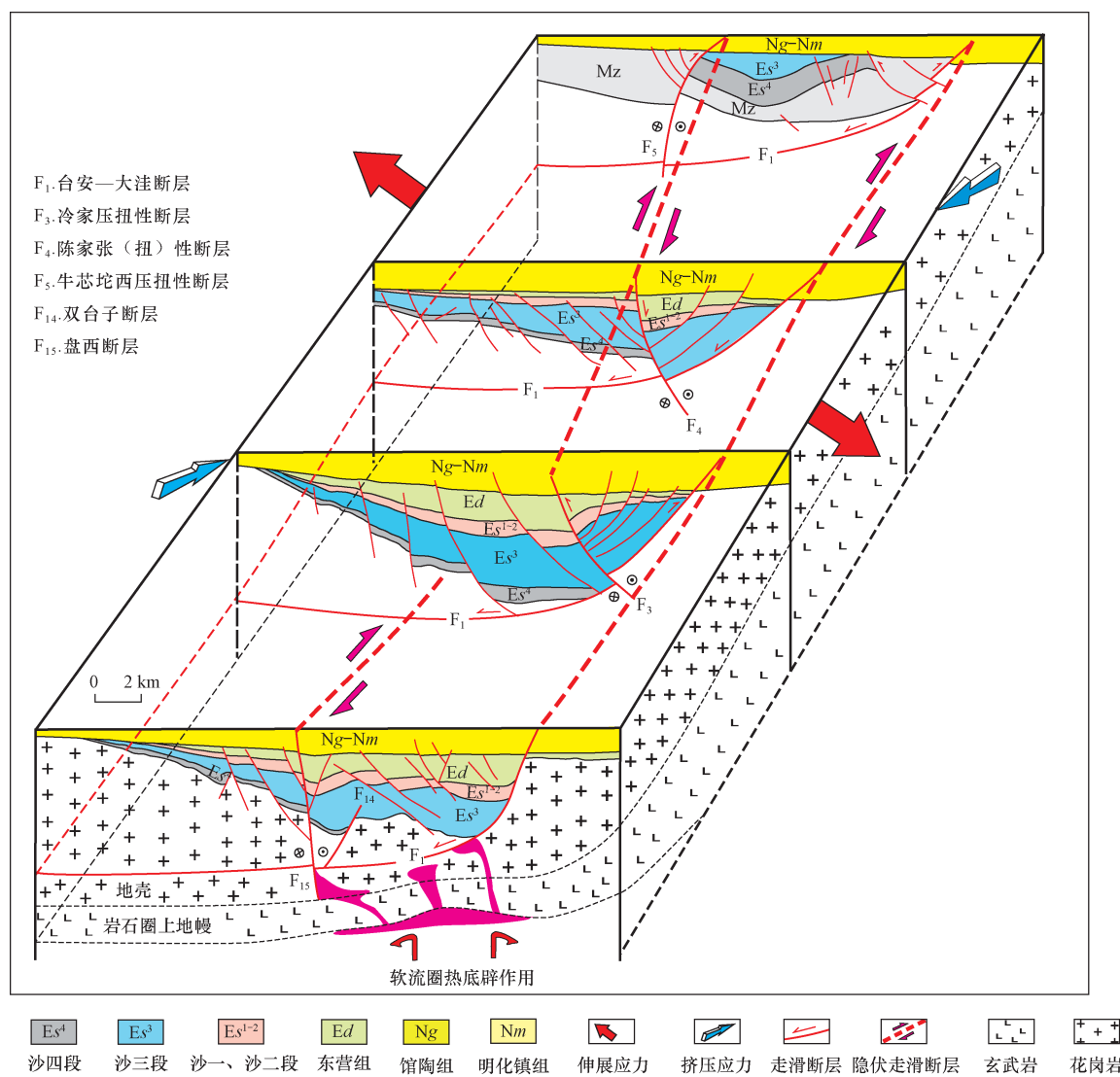


图5 辽河西部凹陷古近纪成因机制

Fig. 5 Paleogene dynamic model of the Western Sag of Liaohe Depression

导致局部区域形成斜压或斜张构造变形。在斜压变形区,走滑断层常常具有逆冲断层次位移分量,在剖面上显示逆冲断层特征,并可能诱导一系列与主干走滑断层斜交的逆冲断层甚至小型褶皱构造。在斜张变形区,走滑断层常常具有正断层次位移分量,在剖面上显示正断层特征,主干走滑断层之间的断块可能下降构成小型地堑构造,并发育一系列与主干走滑断层斜交的正断层,构成沿走滑断层带斜列分布的“帚状构造”。

辽河西部凹陷内至少有3条主干基底走滑断层,它们向南散开,向北收敛。其中,冷家—陈家断层向南延伸可能斜穿中央凸起至辽东湾与郯庐断裂主位移带连接在一起。由于主干基底走滑断层的走向在辽河西部凹陷总体上是自南向北由北东向转向为北北东向,基底断层的右旋走滑位移导致辽河西部凹陷北部形成斜压变形区、南部成为斜张变形区。南部的斜张变形同时受冷家—陈家断层和双台子隐伏走滑断层的右旋走滑位移影响,成为东营组沉积时期的拉分沉降区,并发育大

量近北东东向的正断层;北部的斜压变形区主要受冷家—陈家断层和台安—大洼断层的右旋走滑位移影响,发育若干逆冲走滑断层或使早期的正断层发生反转。

综合上述区域构造背景分析、构造变形特征分析和构造物理模拟实验结果分析,对辽河西部凹陷古近纪构造变形得出如下结论:

1) 辽河西部凹陷古近纪构造变形格局是始新世伸展构造变形和渐新世走滑构造变形叠加的结果。

2) 始新世伸展构造变形经历初始断陷期(Es^4)和强烈断陷期(Es^3)两个阶段,强烈断陷期形成的北东向主控边界断层和东断西超的半地堑结构控制的沉积中心呈北东向展布。

3) 渐新世走滑构造变形主要发生在东营期,形成北北东—北东向右旋走滑构造带,受基底走滑断层走向变化的影响,在南部形成伸展—走滑构造变形,新生的北东向正断层控制的沉积中心叠加在北东向沉积中心之上;在北部形成收缩—走滑构造变形,隆升剥蚀强烈。

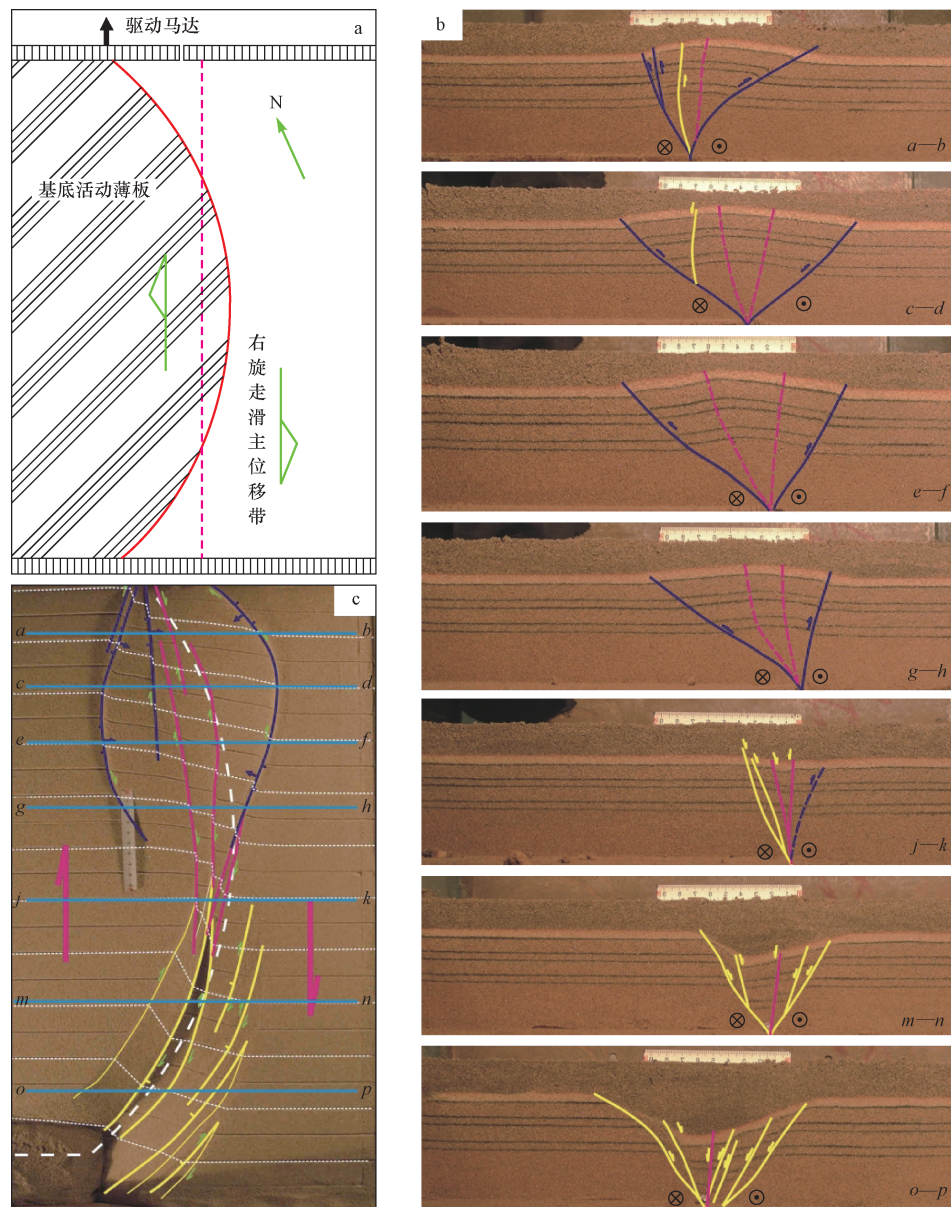


图6 辽河西部凹陷渐新世走滑变形沙箱实验模型

Fig. 6 Sand-box model of strike-slip deformation for the Oligocene in the Western Sag of Liaohe Depression

a. 沙箱实验模型; b. 平面变形结果; c. 剖面切片

4) 区域构造应力场分析和沙箱实验证明始新世北东向伸展断裂系统受太平洋板块俯冲后撤产生的北西—南东向弧后拉张作用控制,而渐新世走滑断裂系统受郯庐断裂右旋走滑作用控制,动因可能来源于印度—澳大利亚板块向欧亚板块俯冲作用产生的远程效应。

参 考 文 献

- [1] 李明刚,漆家福,童亨茂,等. 辽河西部凹陷新生代断裂构造特征与油气成藏[J]. 石油勘探与开发,2010,37(3):281-289.
Li Minggang, Qi Jiafu, Tong Hengmao, et al. Cenozoic fault structure and hydrocarbon accumulation in Western Sag, Liaohe Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(3): 281-289.
- [2] 漆家福,陈发景. 辽东湾—辽河裂陷盆地的构造样式[J]. 石油与天然气地质,1992,13(3):272-283.
Qi Jiafu, Chen Fajing. Structural style in Liaodongwan-Xialiaohe basin[J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(3): 272-283.
- [3] 漆家福,杨桥,陈发景,等. 辽东湾—辽河盆地新生代构造的运动学特征及其演化过程[J]. 现代地质,1994,8(1):34-42.
Qi Jiafu, Yang Qiao, Chen Fajing, et al. Kinematic characteristics and evolution of The Cenozoic tectonics in Liaodongwan-Xialiaohe Basin[J]. Geosciences, 1994, 8(1): 34-42.
- [4] 漆家福. 渤海湾新生代盆地的两种构造系统及其成因解释[J]. 中国地质,2004,31(1):15-22.
Qi Jiafu. Two tectonic systems in the Cenozoic Bohai Bay basin and their genetic interpretation[J]. Geology China, 2004, 31(1): 15-22.
- [5] 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,(增刊 I):19-29.
Qi Jiafu, Deng Rongjing, Zhou Xinhui, et al. Structural characteristics of the Tanlu Fault Zone in Cenozoic basins of off shore Bohai[J]. Science in China (Series D), 2008, 38(sup. I): 19-29.
- [6] 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[J]. 中国科学:地球科学,2013,43(8):1324-1337.
Qi Jiafu, Li Xiaoguang, Yu Fusheng, et al. Cenozoic Structural de-

- formation characteristics and the Tanlu Fault Zone style in Western Sag, Liaohe Depression[J]. Science in China (Series D), 2013, 43(8): 1324–1337.
- [7] Qi J F Yang Q. Cenozoic structural deformation and dynamic processes of Bohai Bay basin province[J]. China Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(4): 757–771.
- [8] 于福生, 吉珍娃, 杨雪, 等. 辽河盆地西部凹陷北部地区新生代断裂特征与圈闭类型[J]. 地球科学与环境学, 2007, 29(2): 149–153.
- Yu Fusheng, Ji Zhenwa, Yang Xue, et al. Cenozoic fault feature and Trap styles of Northern area in West depression of Liaohe Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(2): 149–153.
- [9] 童亨茂, 宓荣三, 于天才, 等. 渤海湾盆地辽河西部凹陷的走滑构造作用[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1017–10263.
- Tong Hengmao, Mi Rongsan, Yu Tiancai, et al. Characteristics and evolution of strike-slip tectonics of the Liaohe Western sag, Bohai bay basin[J]. Acta Geol Gica Sinica, 2008, 82(8): 1017–10263.
- [10] Tong H M, Yu F S, Geng C B. Characteristics and evolution of strike-slip tectonics of the Liaohe Western sag, Bohai bay basin [J]. Petroleum Science, 2008, 5(3): 213–223.
- [11] 马宝军, 漆家福, 于福生. 辽河盆地西部凹陷北段反转构造的物理模拟[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(1): 142–145.
- Ma Baojun, Qi Jiafu, Yu Fusheng. Physical modeling on the inversion structure in the west sag of Liaohe depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(1): 142–145.
- [12] 张庆龙, 葛荣峰, 赵立文, 等. 辽河盆地中部构造演化与古潜山油气成藏模式[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 211–217.
- Zhang Qinglong, Ge Rongfeng, Zhao Liwen, et al. Structural evolution and model of hydrocarbon accumulation in buried hills in the central Liaohe basin [J]. Petroleum Geology & Experiment 2010, 32(3): 211–217.
- [13] 孙洪斌, 张凤莲. 辽河拗陷古近系构造—沉积演化特征[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(2): 60–65.
- Sun hongbin, Zhang Fenglian. Structural-sedimentary evolution characteristics of Paleogene in Liaohe Depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(2): 60–65.
- [14] 杨雪, 杨桥, 于福生. 辽河盆地西部凹陷北部地区古近系地层剥蚀量恢复[J]. 西安石油大学学报, 2006, 21(5): 34–39.
- Yang Xue, Yang Qiao, Yu Fusheng. Calculation of the denudation amount of the Paleogene in the north part of the west depression, Liaohe Basin[J]. Journal of Xian Shiyou University (Natural Science Edition), 2006, 21(5): 34–39.
- [15] 漆家福, 张一伟, 陆克政, 等. 渤海湾新生代裂陷盆地的伸展模式及其动力学过程[J]. 石油实验地质, 1995, 17(4): 316–323.
- Qia Jiafu, Zhang Yiwei, Lu Kezheng, et al. Extensional pattern and dynamic process of the Cenozoic rifting basin in the Bohai Bay[J]. Experimental Petroleum Geology, 1995, 17(4): 316–323.
- [16] 马杏垣, 刘和甫, 王维襄. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造[J]. 地质学报, 1983, 57(1): 22–32.
- Ma Xingyuan, Liu Hefu, Wang Weixiang, et al. Meso-Cenozoic Taphrogeny and extensional Tectonics in eastern China [J]. Acta Geologica Sinica, 1983, 57(1): 22–32.
- [17] 孟庆任, 王战, 王翔. 新生代黄骅拗陷伸展、沉积作用和岩浆活动[J]. 地质论评, 1993, 9(6): 535–547.
- Meng Qingren, Wang zhan, Wang xiang, et al. Tectonic extension, sedimentation and magmatism of the Cenozoic Huanghua depression [J]. Geological Review, 1993, 9(6): 535–547.
- [18] 陆克政, 漆家福, 戴俊生. 渤海湾新生代含油气盆地构造模式 [M]. 北京: 地质出版社, 1997: 87–125.
- Lu Kezheng, Qi Jiafu, Dai Junsheng. Cenozoic Structural models of Bohai Bay basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 87–125.
- [19] Allen M, Macdonald D, Zhao X, et al. Early Cenozoic two-phase extension and late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14(7): 951–972.
- [20] Chen W, Nabelek J. Seismic strike-slip faulting and the development of North China basin [J]. Tectonics, 1988, 7(5): 975–989.
- [21] Ziegler P A, Sierd Cloetingh. Dynamic processes controlling evolution of rifted basins [J]. Earth-Science Reviews, 2004, 64: 1–50.
- [22] 赵重远. 渤海湾盆地的构造格局及其演化[J]. 石油学报, 1984, 5(1): 1–18.
- Zhao Zhongyuan. Structural pattern and evolution of Bohaiwan Basin, China [J]. Acta Petrolei Sinica, 1984, 5(1): 1–18.
- [23] 侯贵廷, 钱祥麟, 宋新民. 渤海湾盆地形成机制研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34(4): 503–509.
- Hou Guiting, Qian Xianglin, Song Xinmin. The origin of the Bohai Bay basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium of Universitatis Pekinensis, 1998, 34(4): 503–509.
- [24] 许浚远, 张凌云. 西北太平洋边缘新生代盆地成因(上), 成盆机制述评[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 93–98.
- Xu Junyuan, Zhang Linyun. Genesis of Cenozoic basins in northwest pacific ocean margin (1): Comments on basin-forming mechanism [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(2): 93–98.
- [25] 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[J]. 中国科学(D辑), 2006, 36(3): 507–519.
- Zhou Jianxun, Zhou Jiansheng. Cenozoic structural deformation mechanism of Bohai Bay basin: Physical simulation and discussion [J]. Science in China (Series D), 2006, 36(3): 507–519.
- [26] 周天伟, 周建勋, 董月霞, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷新生代断裂系统形成机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(1): 12–17.
- Zhou Tianwei, Zhou Jianxun, Dong Yuexia, et al. Formation mechanism of Cenozoic fault system of Nanpu sag in Bohai Bay Basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 2009, 33(1): 1217.
- [27] 陈国达. 东亚陆缘扩张带——一条离散式大陆边缘成因探讨[J]. 大地构造与成矿学, 1997, 21(4): 285–293.
- Chen Guoda. The marginal extensional belt of east Asia continent-investigating the origin of a discrete continental margin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1997, 21(4): 285–293.
- [28] Fukao Y, Maruyama S. Geologic implication of the whole mantle p-wave tomography [J]. Jour Geol Soc Japan, 1994, 100(1): 4–23.
- [29] Ichiki M, Uyeshima M, Utada H, et al. Upper mantle conductivity structure of the back arc region beneath Northeastern China [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(19): 3773–3776.
- [30] 张健, 石耀霖. 东亚陆缘带构造扩张的深部热力学机制[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(3): 222–227.
- Zhangjian, Shi Yaolin. Thermodynamics mechanism of the marginal extensional belt of east Asia [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27(3): 222–227.