

文章编号: 0253-9985(2009)04-0483-07

郯庐断裂带辽东湾段新生代右旋走滑变形及其模拟实验

杨 桥^{1,2}, 魏 刚³, 马宝军², 漆家福^{1,2}

[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 资源与信息学院, 北京 102249 3 中海石油(中国)有限公司 渤海分公司 技术部, 天津 300451]

摘要: 郯庐断裂带是一条区域性深断裂带, 地球物理勘探资料表明郯庐深断裂主位移带在辽东湾坳陷大致沿坳陷东部边缘通过。辽东湾坳陷东部沿辽东凸起两侧发育有若干陡倾或近直立的断层。这些断层自盆地基底一直切割到新近系中, 部分断层甚至切割到更新统及全新统。在辽东凸起南段, 断层表现为向西南散开、向北收敛的帚状断层组合, 所有断层在剖面上均显示正断层位移特征; 在辽东凸起北段, 断层表现为向北北西发散、向南收敛的羽状断层组合, 西侧的部分断层在剖面上具有明显的逆冲断层位移特征。辽东凸起附近盆地盖层中的断层组合表明, 北北东向断层在新生代有明显的右旋走滑运动。沙箱模拟实验表明, 沿辽东凸起南、北两段的断层组合可能与郯庐深断裂新生代右旋走滑位移有关, 断层组合形式、运动性质的差异可能与郯庐深断裂主位移带走向变化有关。

关键词: 走滑断层; 断层组合; 新生代盆地; 辽东湾; 郯庐断裂带

中图分类号: TE121.2 文献标识码: A

Characteristics and modeling of the Cenozoic right-lateral slip deformation in the Liaodong Bay segment of the Tan-Lu fault zone

Yang Qiao^{1,2}, Wei Gang³, Ma Baojun², Qi Jiafu^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249 China;

2 Faculty of Natural Resource & Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249 China;

3 Department of Technology, CNOOC Tianjin Company, Tianjin 300451 China)

Abstract The Tan-Lu fault belt is a regional deep fault belt. Geophysical data show that the main shift zone of the Tan-Lu fault goes roughly along the eastern margin of the Liaodong Bay depression. Several steep and near-vertical faults were developed along both sides of the Liaodong uplift in the eastern part of the Liaodong Bay depression. These faults cut all strata from the basement to the Neogene, and some of them even cut the Pleistocene and Holocene. In the southern part of the Liaodong uplift, the faults occur as a broom-like fault complex diverging to the southwest and converging to the north. In section, all the faults show features of normal fault displacement. In contrast, in the northern part of the Liaodong uplift, the faults occur as a feather fault complex diverging to the north-northwest and converging to the south. In section, some faults in the west show distinct characteristics of thrust fault displacement. Fault complex in the sedimentary cover of the basin near the Liaodong uplift reveals that during the Cenozoic, the north-northeast-trending faults experienced obviously right-lateral slip activities. Sandbox simulation experiment indicates that the fault complexes along the northern and southern parts of the Liaodong uplift may be related to the Cenozoic right-lateral slip movement of the Tan-Lu fault. The differences in fault complex and movement may be related to changes of strikes of the main shift zone of the Tan-Lu fault.

Key words strike-slip fault; fault complex; Cenozoic basin; Liaodong Bay; Tan-Lu fault zone

收稿日期: 2009-05-21。

第一作者简介: 杨桥(1957-), 女, 副教授, 盆地沉降史分析和油区构造解析。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772085)。

郯城-庐江断裂带是我国东部一条重要的区域性断裂带^[1~6]。深部地球物理资料表明, 郯庐断裂带在渤海海域大致沿渤东凸起、辽东凸起(辽东湾东部边缘)向北延伸至辽河拗陷东部凹陷北端。渤海海域的郯庐断裂带在晚新生代时期主要表现为右旋走滑构造变形^[7~12], 并对新生代沉积拗陷的形成、演化以及油气聚集成藏过程有重要影响^[13~22]。本文根据地震资料的构造解释, 讨论了郯庐断裂带辽东湾段的新生代构造变形特征, 并通过沙箱模拟实验分析了不同性质构造要素之间的关系。

1 辽东湾拗陷新生代构造基本特征

辽东湾拗陷新生代地层明显具有裂陷盆地两阶段层序结构特征, 即: 裂陷阶段发育的古近系呈楔状充填在受正断层控制的半地堑断陷中; 后裂陷阶段发育的新近系呈毯状覆盖在断陷及其分割断陷的凸起之上。在新近系地层中仍然发育有大量断裂(图 1), 地震剖面上可以解释出一些近垂直的基底断层及其分支断裂向上甚至切割到更新统至全新统(图 2)。这些资料表明, 尽管断裂对

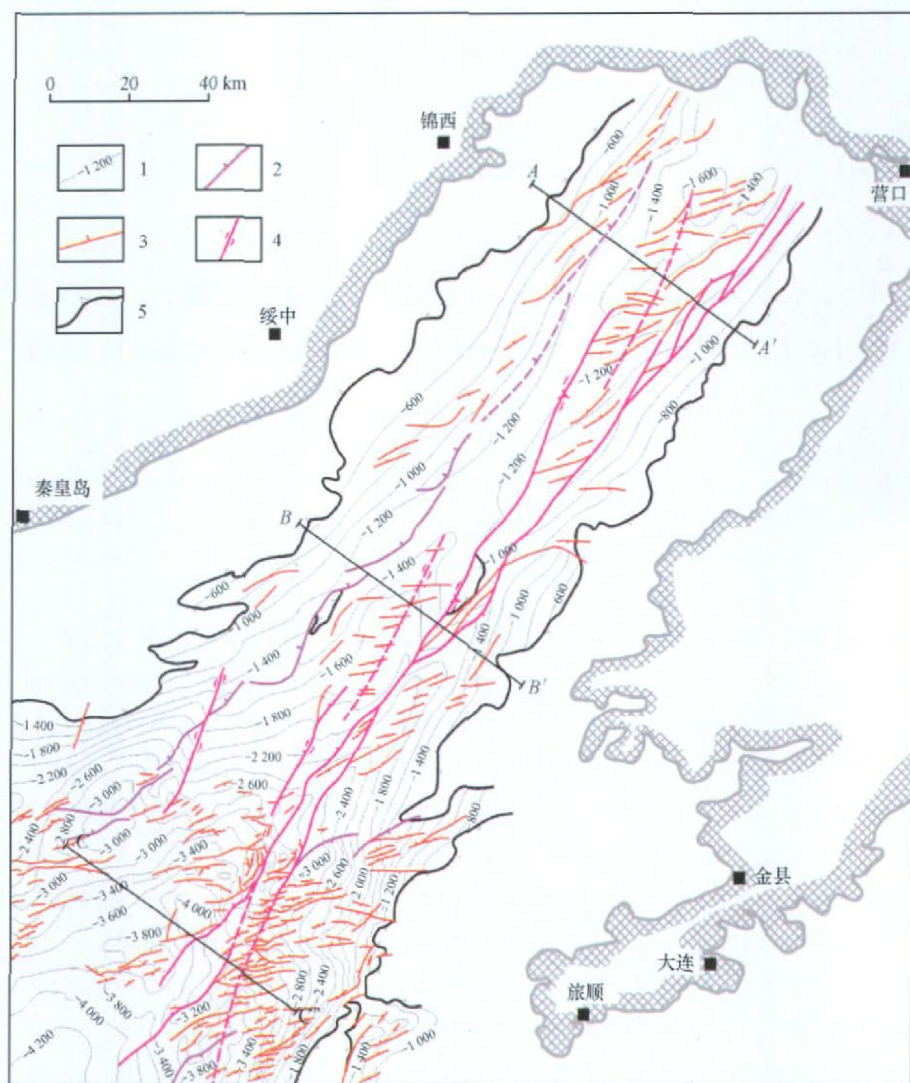


图 1 辽东湾拗陷新近系底面构造略图

Fig. 1 Outline map of the bottom structures of the Neogene in the Liaodong Bay Depression

1. 新近系馆陶组底面等深线 (m); 2. 主干基底正断层, 虚线为未切割馆陶组、控制古近系沉降的主干基底正断层;
3. 切割新近系的盖层正断层, 向下多在古近系东营组或沙河街组内部尖灭; 4. 主干基底右旋走滑断层, 虚线为未直接切割馆陶组、但变形影响到新近系的走滑断层; 5. 新近系馆陶组尖灭线, 三角顶指向尖灭方向

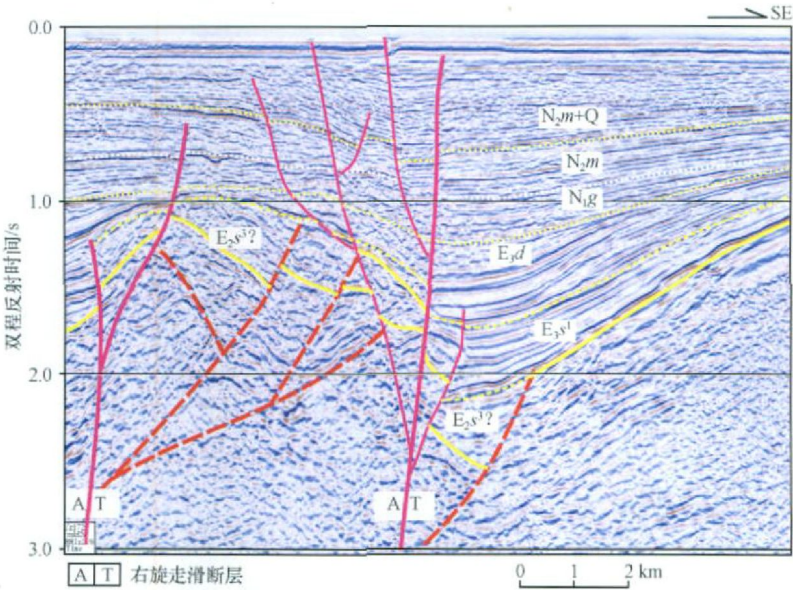


图 2 辽东凸起北段地震剖面

Fig. 2 Seismic section across the northern part of the Liaodong Uplift
 N_2m+Q . 上新统明化镇组-第四系; N_2m . 上新统明化镇组; N_1g . 中新统馆陶组;
 E_3d . 渐新统东营组; E_3s^3 . 始新统沙河街组三段; E_3s^1 . 渐新统沙河街组一段

后裂陷阶段沉积作用没有明显的影响,但是后裂陷阶段仍然有较强烈的断裂活动。

按照古近系的分布,辽东湾坳陷被划分为 5 个次级构造单元,包括辽西凹陷、辽中凹陷、辽东凹陷 3 个负向构造单元和分隔凹陷的辽西凸起、辽东凸起 2 个正向构造单元(图 3)。地震资料揭

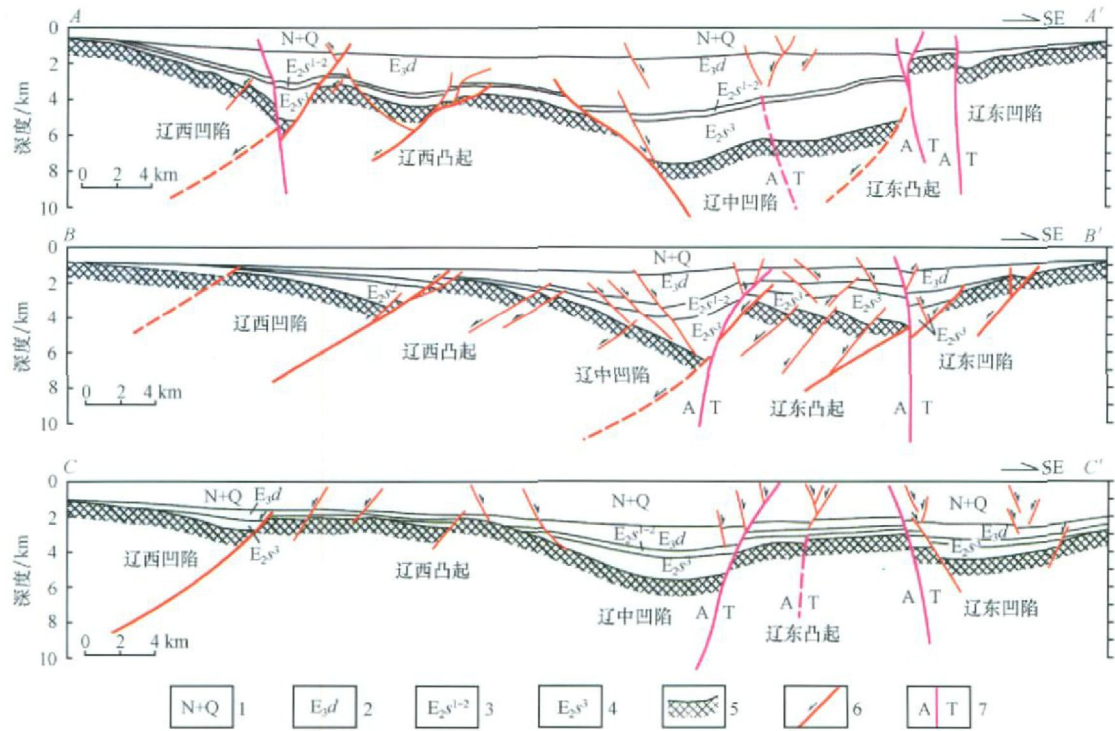


图 3 辽东湾坳陷构造剖面

Fig. 3 Sections showing structures in the Liaodong Bay Depression
1. 新近系-第四系; 2. 渐新统东营组; 3. 始新统沙河街组一、二段; 4. 始新统沙河街组三段;
5. 新生代盆地基底; 6. 正断层; 7. 右旋走滑断层
(据渤海石油公司地震资料解释。剖面位置见图 1。)

示,控制这些次级构造单元的构造变形具有明显的差异性。其中,古近系充填的辽西凹陷和辽中凹陷为东断西超(翘)的半地堑断陷,而辽东断陷为西断东超的半地堑断陷。辽西凹陷东部断陷边界断裂带结构相对简单,为向西倾斜的基底卷入正断层,断层两盘发育的同沉积楔状层序显示断层在古近系沙河街组、东营组沉积时期具有多米诺式旋转特征,导致断层倾角变小(约 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$),并使辽西凸起向东倾斜成为半地垒构造。辽中凹陷的古近系断陷最深,东部断陷边缘的断裂带结构相对复杂,在剖面上显示为向西陡倾的基底卷入正断层(断层倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$),而且有被新近纪—第四纪活动断裂强烈改造的迹象。辽东凹陷古近系断陷最浅,只发育古近系沙(河街组)一段、东营组,缺失辽中凹陷、辽西凹陷普遍发育的古近系沙三段、沙二段,断陷西部边界断层几乎是一条直立的断层。

在平面构造图中,辽东湾坳陷的基底断层总体走向为北北东—北东向,断陷边缘是由多条断层构成的断裂带。辽西凹陷断陷边缘断裂带中的断层在盆地盖层中断层间鲜见直接连接,其中辽东湾南段主要为左阶斜列,辽东湾北段主要为侧列,主干断层之间为走向斜坡或被次级断层复杂化的走向斜坡变换带。辽中凹陷断陷边缘断裂带中的主干断层以帚状分支形式连接为主,在辽东湾南段为向南撒开、向北收敛的帚状断层系,在辽东湾北段主干断层的连续性较好、少量分支断层向北撒开。辽东凹陷断陷边缘断裂带中的断层连续性好,在平面上的线性延伸特征明显。

2 郯庐断裂带辽东湾段新生代右旋走滑构造变形

漆家福等(1995, 2008)^[8, 10]将辽东湾坳陷的断裂构造划分为伸展构造和右旋走滑构造两个系统,认为缓倾斜的基底卷入正断层是控制古近纪断陷形成和演化的伸展构造系统;而分布在辽东凸起两侧的近直立的基底断裂为走滑构造系统,它是郯庐断裂带辽东湾段新生代构造活动的产物。Hsiao等(2004)^[11]认为,辽西坳陷边缘的北东—北北东向正断层在平面上总体为左阶斜列,它们与郯庐断裂带的深部断裂也有直接或间接的联

系;整个辽东湾坳陷的断裂构成一个统一的右旋走滑断裂系统,它是郯庐断裂带新生代右旋走滑活动的产物。无论是将辽东凸起东侧的基底断裂作为郯庐断裂带还是整个辽东湾的断裂系统作为郯庐断裂带,构造特征在横向上、纵向上的差异性相当明显。在横向上,自东向西断裂构造在新生代的活动强度逐渐减弱,辽西凹陷断陷边缘发育的北北东向、北东向倾角较缓的基底正断层多数只切割古近系,凹陷内部的基底断层甚至仅切割始新统沙三段,在渐新统东营组沉积时期断裂基本停止活动;而辽东凸起两侧的北北东向、北东向基底断层向上切割到新近系,并且沿着基底断裂带发育大量近东西向的小位移正断层(图 1)。在纵向上,辽东湾北段辽东凸起西侧的断裂走向北北东向,为向北发散的逆冲走滑断层,断裂组合显示斜压右旋走滑断裂带特征;辽东湾南段断裂走向北东向,为一系列向西南撒开的断裂,辽东凸起南段主要表现为北北东向的斜张右旋走滑断裂带。

从地震资料解释的断层与层序的关系看,辽东湾坳陷的断裂显然具有多期、不同性质的运动学特征(图 2 图 3)。辽东凸起北段地震剖面的反射特征能清晰地解释出近直立的基底走滑断层与盖层中的分支断层构成的花状构造,主干基底走滑断层在一些剖面上还明显具有逆冲位移分量;而盖层中的分支断层可以一直切割到新近系—更新统浅层,甚至到海底(图 2)。这些现象表明,郯庐断裂带的右旋走滑活动可能主要是在沙一段、东营组发生的,并且在新近纪(更新世至全新世)仍有明显活动。辽东凸起两侧线性延伸特征清晰、连续性好的基底断层应该与郯庐断裂带的深部断裂有直接联系,可以视为郯庐断裂带新生代右旋活动的主干断层,表明辽东湾坳陷东部边缘的断裂系统与郯庐断裂带活动有更密切的关系。

3 沙箱模拟实验

图 4是针对郯庐断裂带辽东湾段沿走向构造变形的差异性所设计的物理模拟实验模型示意图。该模型设计中主要考虑主干走滑位移带的产状发生变化,导致在不同区段出现不同的伴生构造。如图 4所示,模型底部左侧设计为弧形断块,连接驱动马达,受马达牵引相对于右侧的基底断

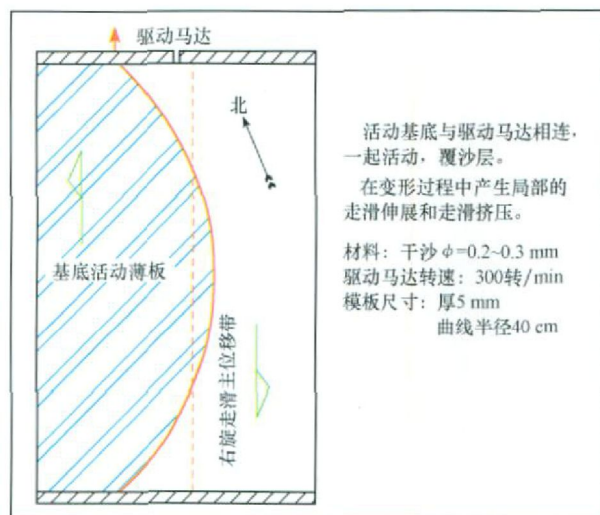


图 4 走滑构造物理模拟实验模型

Fig. 4 Model for the simulation experiment of right-lateral slip deformation

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地台盖层和中、新生代盆地盖层。受基底断裂走滑位移的影响, 盖层将产生相应的构造变形。该实验在中国石油大学(北京)构造物理模拟实验室完成。

图 5 是基底断层右旋走滑位移量每隔 0.5 cm 采样的沙箱模拟实验结果的平面照片及其构造解释。其中, 图 5a 为初始状态, 并在模型顶部表面间隔 2.5 cm 刻画一条标志线; 图 5k 为右旋走滑位移 5.0 cm 的最终实验结果模型。图 6 是最终实验结果模型(右旋走滑位移 5.0 cm)的切片剖面图像解释。对比图 5 和图 6 不难看出, 基底右旋走滑使北部(图像的上部)盖层产生逆冲断层和逆冲走滑断层, 而使南部(图像的下部)盖层产生正断层和正走滑断层。在模拟实验中, 马达驱动左侧的基底断块向北位移, 模型侧边界所示的基底主干走滑位移带与基底断块位移矢量方向并不完全平行。北部的侧边界向北延伸偏向左侧, 导致左侧断块向北位移时在侧边界上产生斜压右旋走滑作用; 南部的侧边界向北延伸偏向右侧, 导致左侧断块向北位移时在侧边界上产生斜张右旋走滑作用。因此, 导致同一走滑构造带中的不同区段出现不同的构造变形样式。北部发育逆冲断层和逆走滑断层, 构成正花状构造样式; 南部发育正断层和正走滑断层, 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, 而且这些走滑断层在

剖面上的垂直升降分量相对较小。

值得注意的是, 斜压走滑产生的走滑变形带明显较斜张走滑变形带宽一些。模型北部斜压走滑带的宽度最大可以达到 16~18 cm; 南部斜张走滑带的宽度最大仅为 10~12 cm; 而中间部位的变形宽度最小。此外, 在平面图上可以看到中间区段的走滑位移集中在较窄的变形带中, 标志线明显呈右旋错开(图 5k); 但是在切片图中, 中间区段在剖面上的断层却相对模糊(图 6b 中的切片 10 和图 6c 中的切片 11)。纯粹的走滑断层由于断裂两盘没有相对升降位移, 在剖面上识别相对困难; 而只有发育一些分支断层、且分支断层为斜压走滑或斜张走滑时, 与主干走滑断层构成花状构造才有明显的标志。

上述物理模拟实验说明, 辽东凸起北段和南段新生代构造变形的差异应该是营潍断裂带走向变化引起的。从盆地中表现的右旋走滑构造带的分布看, 营潍断裂带深层断裂在辽东湾北段分支为两条。也正因为近南北走向的西支与北北东走向的东支在辽东凸起中部交织在一起, 致使在区域右旋走滑作用下辽东凸起北段出现逆走滑断层, 南段出现正右旋走滑断层。

4 结论

1) 郯庐断裂带辽东湾段的主破裂带沿辽东湾坳陷东部分布。其中, 辽东凸起东侧的北北东向线性延伸特征明显。近直立的主干基底断层和斜列在辽东凸起西侧的若干北北东-北东向高角度基底断层可能与郯庐断裂带深部断裂有直接联系, 构成了郯庐断裂带在新生代盆地构造层中的主位移带。

2) 郯庐断裂带主位移带沿辽东凸起两侧分布。辽东凸起南段西侧的分支断层为北东-北北东向延伸, 向南延伸至辽中凹陷内部尖灭, 向北收敛并入郯庐断裂带中的主干基底走滑位移带中, 在剖面上主要显示走滑正断层特征, 在平面上构成向南散开的帚状断层系。辽东凸起北段西侧的分支断层为北北东-近南北向延伸, 向北延伸进入辽中凹陷内部, 向南延伸则并入郯庐断裂带的主干基底走滑位移带中, 在剖面上主要显示走滑逆断层特征, 在平面上则构成向北发散的羽列状断层系。

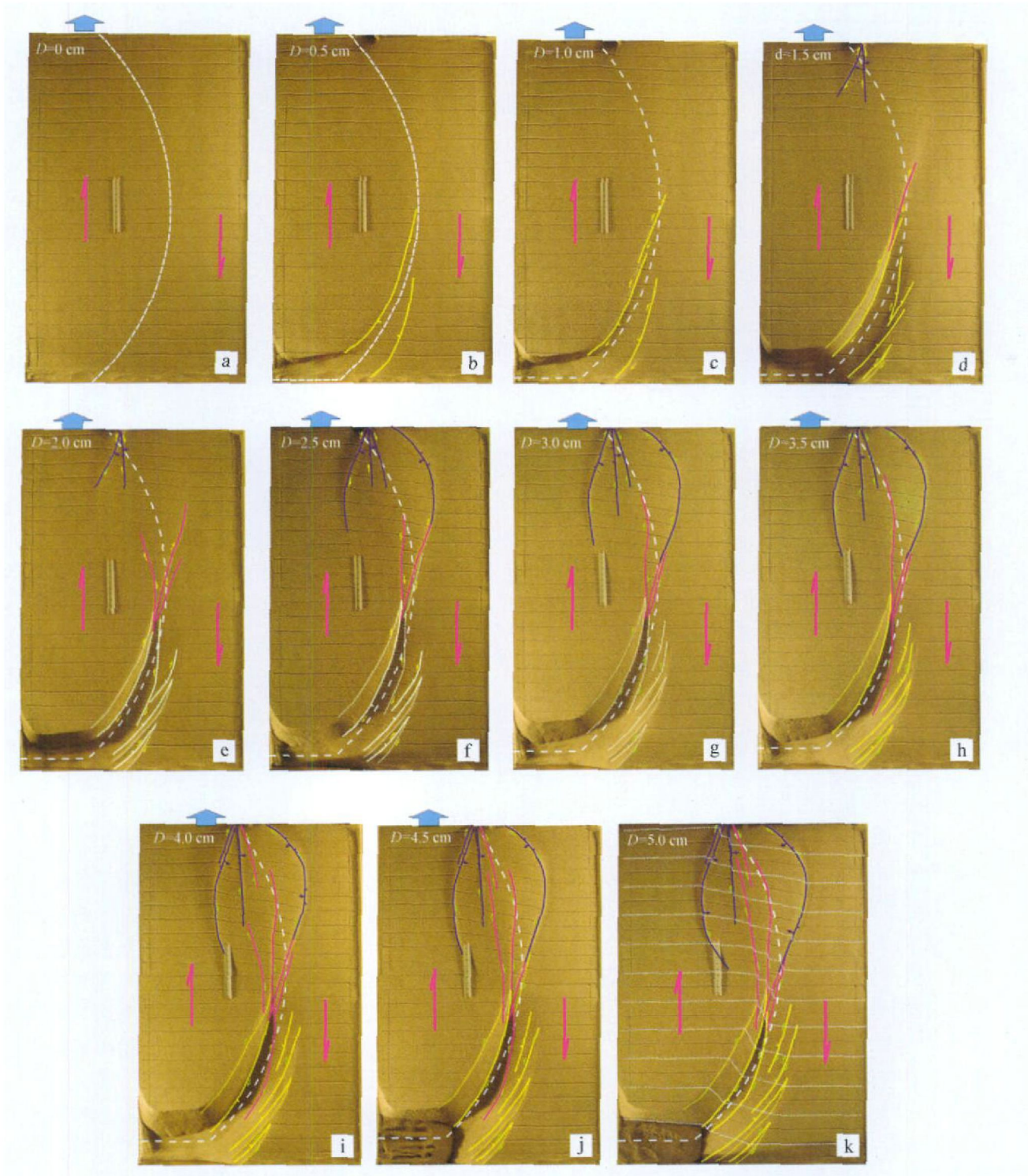


图 5 右旋走滑模拟实验过程图像解释

Fig. 5 Images of the simulation experiment process for modeling right-lateral slip deformation
(a—k为基底右旋走滑位移量每隔 0.5 cm 采样的平面照片解释。)

3) 沙箱模拟实验表明,如果基底断裂带呈弧形弯曲或走向发生变化,基底断裂的走滑位移可以导致上覆岩层沿基底断裂带发育不同组合型式、不同性质的分支断层。郯庐断裂带辽东湾段主位移带在南、北发育的分支断层特征的差异可

能暗示郯庐断裂带深部的主位移带走向的变化,导致在盆地构造层中诱导的构造变形在辽东湾北段表现为右旋压扭构造变形特征,而在辽东湾南段总体上表现为右旋张扭构造变形特征。

4) 郯庐断裂带辽东湾段新生代时期的右旋

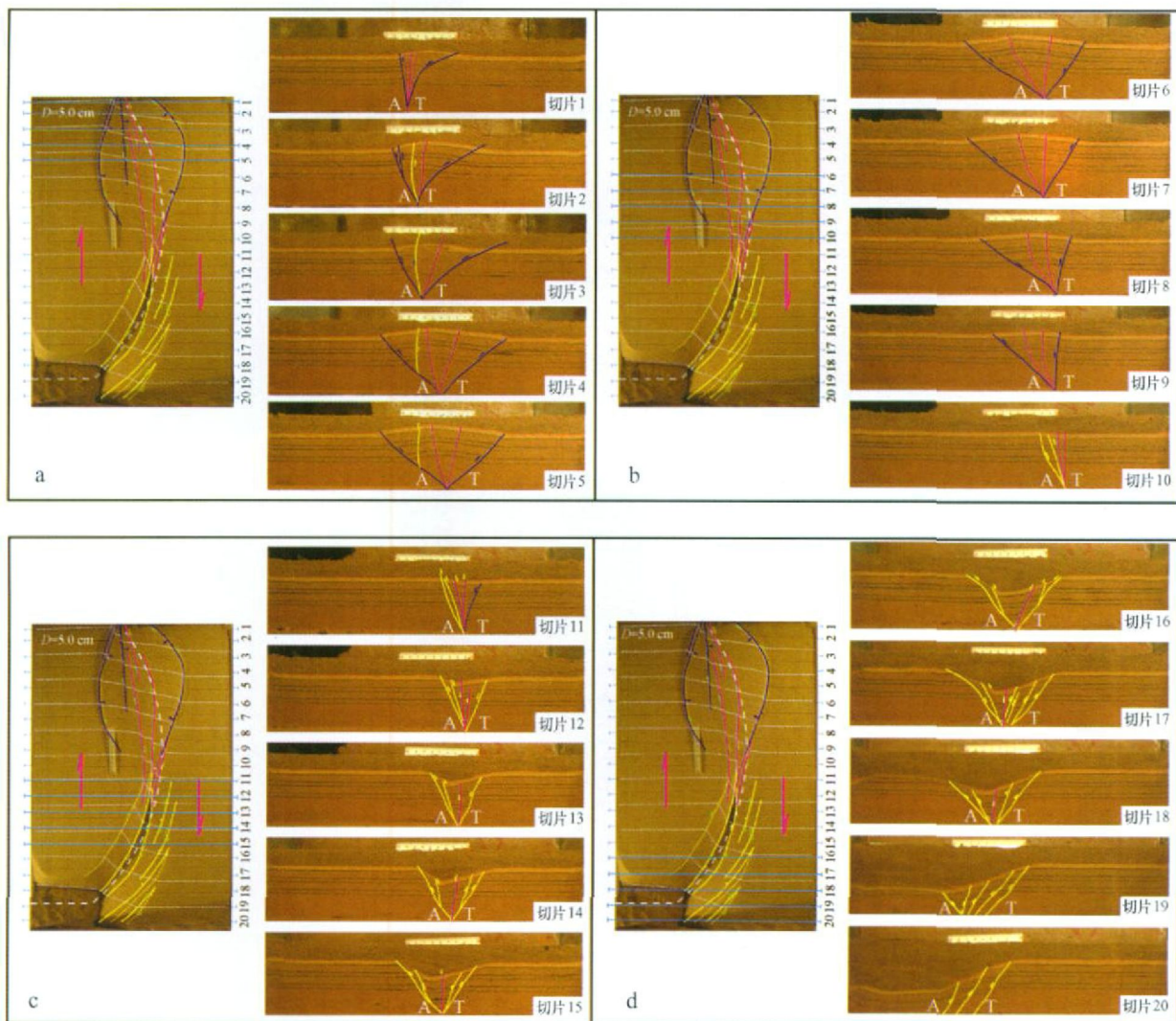


图 6 右旋走滑模拟实验最终模型的切片剖面图像解释

Fig. 6 Sections of the final model for simulating right-lateral slip deformation

(右旋走滑位移 5.0 cm。a—d 为不同区段的切片, 相当于辽东凸起自北向南所见的剖面构造组合。)

走滑变形影响到新近系, 而伸展构造变形主要影响到古近系, 从而导致在辽东湾坳陷新近系中构造变形明显具有东强西弱的特征。辽东湾坳陷东部新近系构造层中发育大量的延伸较短、呈左阶斜列的近东西向盖层正断层, 它们是郯庐断裂带右旋走滑活动的产物。

参 考 文 献

- 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
- 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
- 汤加富, 侯明金, 高天山. 郯庐断裂带的主要特征与性质讨论 [J]. 安徽地质, 1995, 5(3): 60~65
- 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
- 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
- 朱光, 宋传中, 王道轩. 郯庐断裂带走滑时代的 $A_{r^{40}} / A_{r^{39}}$ 年代学研究及其构造意义 [J]. 中国科学 (D 辑), 2001, 31(3): 250~256
- 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): 15~21
- 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
- 漆家福, 陈发景. 辽东湾—下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
- 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 1): 19~29
- 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 off

(下转第 496 页)

- 球科学, 1993, 18(6): 699~ 724
- 12 徐长贵, 许效松, 丘东洲, 等. 辽东湾地区辽西凹陷中南部古近系构造格架与层序地层格架及古地理分析 [J]. 古地理学报, 2005, 7(4): 449~ 459
 - 13 漆家福, 杨桥, 陈发景, 等. 辽东湾—下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
 - 14 朱筱敏, 董艳蕾, 杨俊生, 等. 辽东湾地区古近系层序地层格架与沉积体系分布 [J]. 中国科学 (D 辑), 2008, 38(增 I): 1~ 10
 - 15 李德江, 朱筱敏, 董艳蕾, 等. 辽东湾坳陷古近系沙河街组层序地层分析 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 36(6): 669~ 676
 - 16 朱伟林, 王国纯, 周毅. 渤海海域油气勘探浅析 [J]. 石油学报, 2000, 23(1): 1~ 7
 - 17 项华, 周心怀, 魏刚, 等. 渤海海域锦州 25-1 南基岩古潜山油气成藏特征分析 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2007, 29(5): 32~ 35
 - 18 邓运华, 李建平. 浅层油气藏的形成机理——以渤海油区为例 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008
 - 19 周心怀, 项华, 于水, 等. 渤海锦州南变质岩潜山油藏储集层特征与发育控制因素 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 17~ 19
 - 20 龚再升. 中国近海含油气盆地新构造运动和油气成藏 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 133~ 138
 - 21 邓津辉, 周心怀, 魏刚, 等. 郯庐走滑断裂带活动特征与油气成藏的关系——以金县地区为例 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 102~ 106
 - 22 刘乐, 杨明慧, 李春霞, 等. 辽西低凸起变质岩潜山裂缝储层及成藏条件分析 [J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(2): 188~ 194 222
 - 23 孟卫工, 李晓光, 刘宝鸿. 辽河坳陷变质岩古潜山内幕油藏形成主控因素分析 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 584~ 589
 - 24 龚再升, 杨甲明, 杨祖序. 中国近海大油气田形成与分布 [A]. 见: 张文昭. 中国陆相大油田 [C]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 337~ 367
 - 25 曾金昌. 渤海辽东湾辽中北洼欠压实特征及其与油气的关系 [J]. 中国海上油气, 1995, 9(6): 361~ 366
 - 26 姜培海, 唐文辉. 渤海海域稠油油田 (藏) 特征及勘探意义 [J]. 特种油气藏, 1998, 5(2): 18~ 22 39
 - 27 王毓俊. 渤海下第三系浅部油气勘探前景分析 [J]. 中国海上油气 (地质), 2001, 15(2): 153~ 156
 - 28 李家康. 渤海油气成藏特点及与断层关系 [J]. 石油学报, 2001, 22(2): 26~ 31

(编辑 高 岩)

(上接第 489 页)

- shore China [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(1): 71~ 97
- 12 黄泽光, 高长林, 吉让寿. 南华北地区中新生代盆地演化 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 252~ 256
 - 13 安作相, 马纪. 渤海石油地质的几个问题 [J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(5): 23~ 28
 - 14 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
 - 15 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
 - 16 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
 - 17 Reilly O, Brendan J, Ge H X, et al. Fault geometry and kinematics in the Penglai 19-3 Field, Bohai Bay, People's Republic of China [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(9): 1 472
 - 18 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
 - 19 Yang Y T, Xu T G. Hydrocarbon habitat of the offshore Bohai Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(6): 691~ 708
 - 20 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
 - 21 张云银. 郯庐断裂带含油气性研究 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(1): 28~ 38
 - 22 邓津辉, 周心怀, 魏刚, 等. 郯庐走滑断裂带活动特征与油气成藏的关系——以金县地区为例 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 102~ 106

(编辑 李 军)