

渤海湾盆地惠民凹陷 临北地区帚状构造物理模拟实验研究

贾红义,谭明友,韩波,汤梦静

(中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司物探研究院,山东东营 257022)

摘要:渤海湾盆地惠民凹陷地质构造复杂。以惠民凹陷临北地区帚状构造为主要研究对象,通过大量地质、钻井及地震资料研究,建立了该区典型帚状构造发育的地质模型,应用构造物理模拟手段对帚状构造发育的古应力环境进行了构造变形的动态过程模拟实验。实验结果证明,临北帚状构造受控于右旋走滑构造应力场;基于此,自北而南发育形成了多组北东向呈雁列式展布的正断层;呈现为自北而南、自撒开端向收敛端的演化序列。且从沙四期始到东营组发育期,构造活动呈现了弱—强—较强的变化规律,从而控制了洼陷沉积和主要三角洲(鼻状构造)的发育和迁移。

关键词:帚状构造;物理模拟;临北地区;惠民凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Physical simulation of brush structure in Linbei area, Huimin Sag, Bohai Bay Basin

Jia Hongyi, Tan Mingyou, Han Bo, Tang Mengjing

(Geophysical Research Institute of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257022, China)

Abstract: Geological structure is very complicated in the Huimin Sag of the Bohai Bay Basin. The brush structure in Linbei area of the Huimin Sag was studied. Based on geologic, logging and seismic data, a geological model for the generation of typical brush structure in the study area was established. The paleo-stress circumstance when the brush structure developed was simulated through the dynamic modeling of tectonic deformation. The brush structure in Linbei area was controlled by the dextrorotatory strike slip tectonic stress field. Several sets of NE oriented echelon normal faults generated from north to south. The evolution sequence was featured by opening in the north and closing in the south. During the period from E_s^4 to E_d , structural activity changed from weak to strong and then to relatively strong, controlling sediment and the generation and migration of main deltas (nose structures).

Key words: brush structure; physical modeling; Linbei area; Huimin Sag; Bohai Bay Basin

构造物理模拟是在研究构造变形力学机制的基础上发展起来的,用于地质构造变形研究已有200多年的历史。作为一种独特的实验方法,可以在实验室再现已经缺失或不复存在的含油气构造体系的形成演化过程,追踪它们形成的动力学成因机制,论证油气分布的有利层段和区域,是目前研究构造变形过程与成因机制最为有效的手段^[1-5]。

渤海湾盆地惠民凹陷临北地区紧邻临南生油洼陷,剧烈的构造运动使沙四段以上储层抬升到洼陷主力生油岩之上,勘探潜力大,目前油气勘探程度属中等。多年来胜利油田在该区投入了大量基

础学科的研究工作^[6-8],但至今还没有针对平面揭示的帚状构造模式进行过构造物理模拟实验,临北地区构造变形和演化过程的研究仍基于地震剖面解释和钻孔资料分析进行,大部分地质认识还处于推断阶段。本文通过对高精度三维地震资料解释,结合区域地质构造研究,总结前人研究成果,对临南洼陷临北地区主要构造形成期的构造格局和断裂特征进行讨论,进而开展构造物理模拟实验,以期再现帚状构造变形的历史过程,为构造变形的发育过程和构造样式的建立寻找实验证据,最终对该区油气的勘探开发提供一定的指导作用。

收稿日期:2012-04-23;修订日期:2012-09-27。

作者简介:贾红义(1968—),男,博士研究生,高级工程师,从事石油地质、物探综合研究工作。E-mail: Jiahongyi_slyt@sinopec.com。

基金项目:中国石油化工集团公司科技攻关项目(P04023)和国家自然科学基金(40372067)联合资助。

1 临北地质构造特征

临北地区地处惠民凹陷中央隆起带临邑断层东部撒开端,发育多组不同级别的断层。其中临邑控洼断裂深切基底,平面上主干断裂北西向凸出、北北东向延伸,与其末端发散的一组近东西向四级断裂构成马尾状、羽状或“卷心菜”状,整体呈向西收敛、向东撒开右行左阶的帚状断裂系^[9](图 1)。

临南洼陷北端的临北地区,发育以北东东向平行展布为主的断层,其他方向次之。该带地层断块破碎,地质构造极为复杂^[10]。其中主干断层形成于古近纪始新世早期,持续活动到新近纪,地震剖

面揭示向下断切至基底。次级断层南倾,呈西南端收敛、北东端撒开的帚状;撒开端分支断层平面上亦呈弧形,皆南倾,断距以中段最大;自北向南呈平行状—雁行状排列,控制了临邑洼陷沙河街组—东营组地层沉积和滚动构造的形成。

1.1 断裂的剖面发育特征

在地震剖面上,单个断层的形态有板式、铲式和坡坪式等 3 种构造样式,板式断层上下产状变化不大,规模较小。该带断层的剖面组合形态有:马尾状、羽状、阶梯状、卷心菜状、地垒型和“Y”字形、“倒 Y”字形等 7 种组合样式(图 2)。卷心菜状(地垒型)由走向大致平行、倾向相反、性质相同的多条

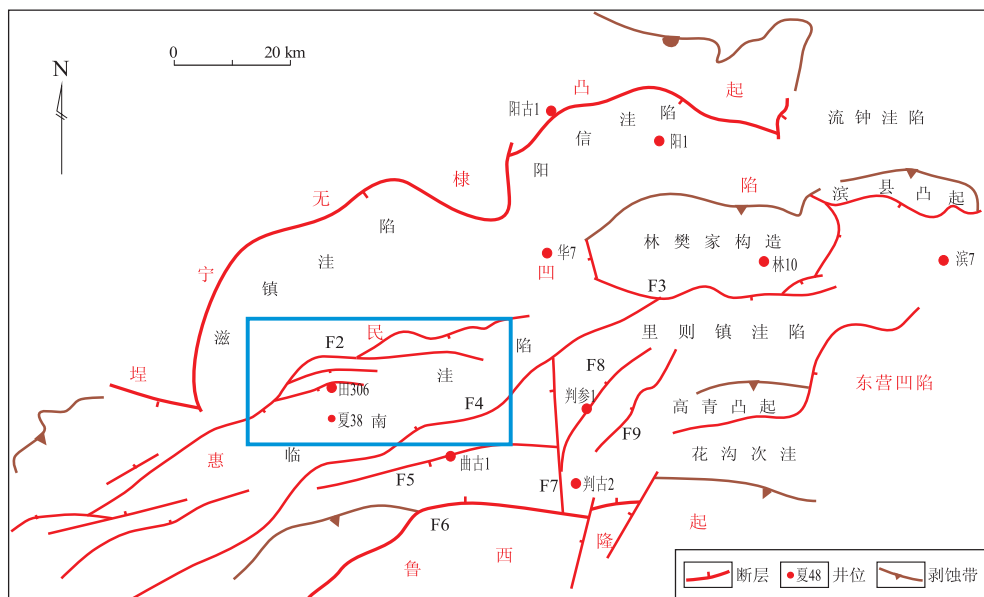


图 1 渤海湾盆地惠民凹陷古近系构造纲要

- F1. 陵县—阳信断层; F2. 临商断层; F3. 林南断层; F4. 夏口断层;
- F5. 曲堤断层; F6. 齐河断层; F7. 白桥断裂; F8. 仁凤断层; F9. 王判镇断层

Fig. 1 Paleocene tectonic pattern in Huimin Sag, Bohai Bay Basin

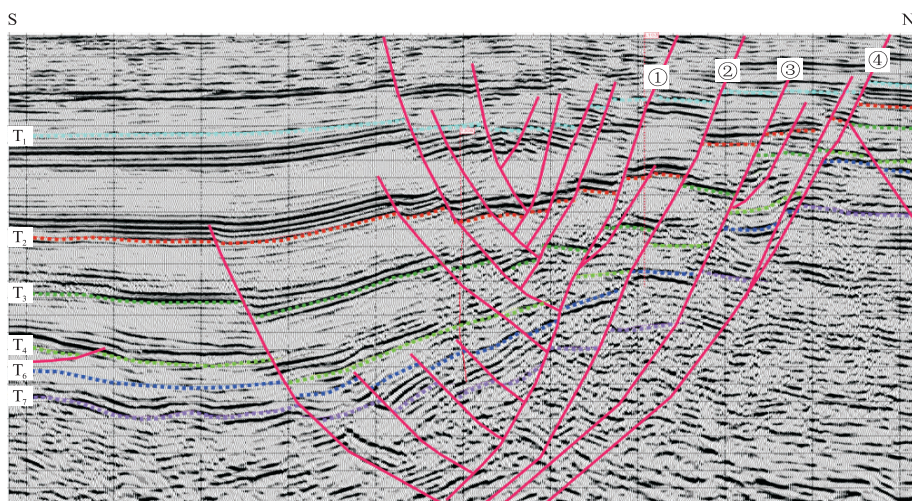


图 2 渤海湾盆地惠民凹陷临南洼陷过田 306 井南北向地震剖面

Fig. 2 Seismic profile crossing well Tian 306 (SN) in Linnan sub-Sag, Huimin Sag, Bohai Bay Basin

断层组成;地垒型则恰好相反;“Y”字形断层有主干断层和与其对应的上盘低序级断层组合而成,此种组合形式在研究区发育较广^[11-14]。

1.2 断裂的平面发育特征

利用临北田家高精度三维地震资料进行构造解释成图,地质界面构造特征反映比较客观。从临北断阶带沙三下顶面(T_0)构造图(图3)上可清楚看出,研究区构造复杂,断层多而密,断块多而小。断裂的展布具有明显的方向性,一是发育控制该带构造格局的近东西向的4条规模较大的主干断层(①号断层、②号断层、③号断层和④号断层),单个南掉主干断裂的形态呈弧形弯曲,即同一条断层的展布方向沿断层的走向发生变化,主干断裂从南到北延伸距离逐渐增加,呈阶梯状平行分布,致使从南到北断阶带的面积依次向东延伸扩大,地层从南到北节节抬升;二是在各个断阶上,各主干断层派生发育了近南北向、北北西向、北东向的低序级断层,延伸短、断距小,这些众多的低序级断层与近东西向主干断层组合配置,将该带分隔成50多个墙角式断块。平面构造图上显示,构造高部位处于区块的西北部,南东端则埋深相对变大,即整体呈南东向低洼、北西向高凸的构造景观,从而形成了东西差异成带、南北条块分割、地层南东倾没的构造格局。

1.3 问题提出

上述可见,该带地质条件复杂,构造活动剧烈。反映在该区勘探上,表现在以往发现的油气藏主要

是构造、构造—岩性油气藏,且成藏主要受构造、岩性的双重控制,其中断裂活动的不均衡性影响了油气富集成藏^[15]。

现今所见的地壳表层及地震剖面揭示的结构型式和组合系统是构造同时性和历时性的综合图像,构造动力作用在特定时期发生,形成特定的时空结构型式,必将改造前一时期形成的时空构造格局,并将地壳切割成一些块段,使它们或裂离、或会聚、或斜向滑移,改组成大小不等的地壳构造基体群。据此,临邑帚状断裂体系是如何产生的以及主干和分支断裂形成顺序和机制如何,一直是困扰研究人员的基础地质问题。

定量表征帚状断裂的活动性,明确断裂形成的先后顺序,确定后期断裂与先期断裂的沿承关系,理清后期断裂系统与先期断裂系统的继承与改造关系;反演其产生、发展、改造、定型的整个形成与叠合过程,对地质研究和油田勘探生产意义重大。客观、真实地揭示断裂带产生、发育及活动规律,是本区油气勘探突破的关键。

在对临邑帚状断层系统的形成演化背景和惠民凹陷的构造格局研究的基础上,设计了此次实验,试图再现断层构造的形成过程,揭示帚状断层系统形成的力学机制和发育演化,剖析帚状断层的构造特征。

2 构造物理模拟实验

近年来,由于在选择实验材料方面取得的进

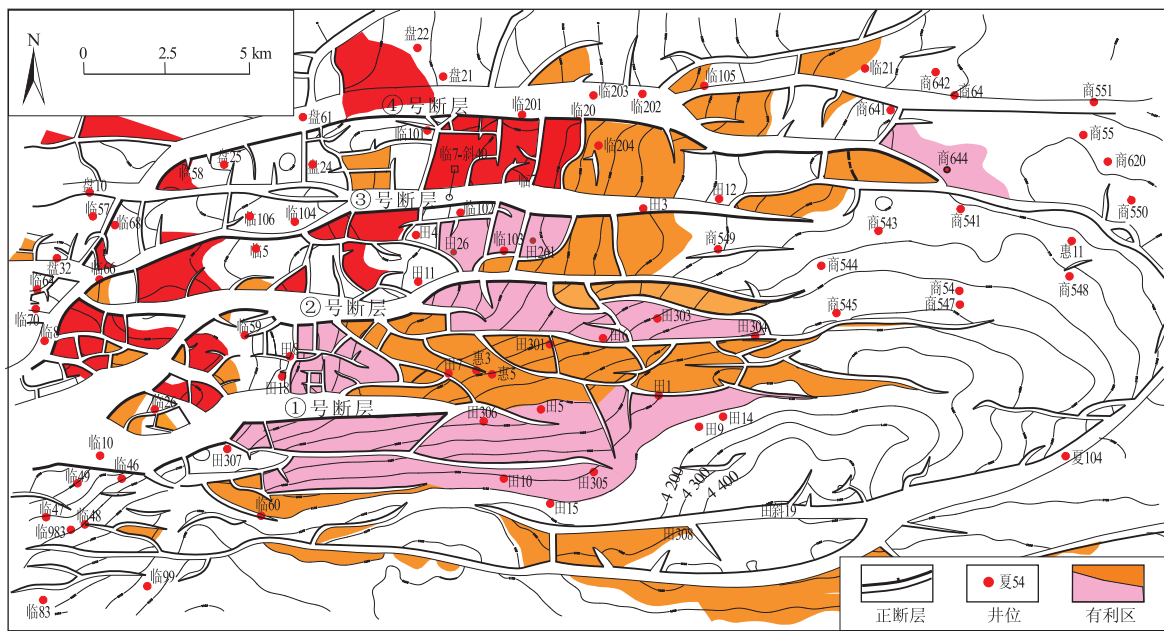


图3 渤海湾盆地惠民凹陷临北断阶带 T_0 构造

Fig. 3 T_0 structural map of Linbei fault zone in Huimin Sag, Bohai Bay Basin

展,使得物理模拟实验模型和自然原型之间的比例愈加精确,物理模拟实验从而被广泛应用于地质构造变形与演化历史研究及石油勘探研究领域中。随着科学技术的发展,构造物理模拟实验为油气勘探研究提供了一个由定性描述跨入半定量分析乃至定量分析的有效途径。

2.1 物理模拟实验遵循的理论及原则

为了使构造物理模拟实验能够真实再现构造变形过程,提高构造物理模拟实验的真实可靠性,相似理论被应用到构造物理模拟实验中来,从而使模拟结果与自然界真实的构造变形之间能够互为相似。模型与原型之间的相似性问题是物理模拟的关键,实验模型在多大程度上与原形具有可比性是模拟实验成败的重要判断依据,因此相似理论成为构造物理模拟实验装置参数设计的重要依据,是构造物理模拟实验的指导思想,是提高实验精度的有效保证^[16]。

物理模拟实验必须遵循相似理论。一般情况下,应从以下几个方面考虑实际地质条件与实验模型的相似性:(1)材料相似;(2)时间相似;(3)组合形式相似;(4)边界条件相似;(5)受力方式相似;(6)几何尺寸相似。

由于目前对在高温、长时间、低应变速率的构造变形条件下的岩石力学性质了解得还很不够,相关的力学方程中仍有很多不确定的参数,因此目前对相似条件还无法做到很精确,大部分情况下只能处于半定量状态,需要经过经验的归纳总结,最终以模型的构造形态变化达到与实际地质现象近似为主要判据。自然界实际地质情况十分复杂,影响构造变形的因素很多,往往无法同时满足相似性原则,可在实验中只考虑对构造变形影响最大的主控因素进行分析,即依据选择原则;同时,需要采取分解的原则,即设计多组实验,每一组只考虑一个主要因素,固定其他因素,在分解研究各个因素的基础上进行综合分析,以达到简化模型设计的目的;其次,实验室条件有时只能做到大致相似,可采取逐步逼近原则;最后,物理模拟实验所获得的结论是纯经验的,特别是每个实验不可能保证条件精确相同,因此需要依据统计的原则来评价它的可信度与准确度^[17]。

2.2 地质模型的建立

模拟区域根据研究区及模具尺寸来确定,本次实验区定为临南洼陷,包括了临南双帚状断层系统主体。临南双帚状断层系统是由临商帚状断层和夏口断层组成的,北部的临商帚状断层为北东东走

向,由西收敛、向东撒开,由一系列北东东向的断层左行雁列组成;南部的夏口帚状断层平面上呈向南凸出的弧形,呈北东东向延伸,由东向西撒开,表现为右行斜列状。

区域背景设定为:南抵齐河断层,为南部边界;西至黄骅—东明走滑断层,为西部边界,作为主走滑断层;北至中央隆起带,为一长方形区域(图4)。

模拟对象为临南双帚状断层的形成演化机制,由于实验模拟手段及实验工艺的限制,在模拟过程中不考虑地层的不均一性。

区域地质资料分析表明,临南双帚状断层系统是新生代右旋剪切作用的产物,先存断层的存在必定在断层处形成地壳中的薄弱带,从而对后期的变形造成影响,基于这一点,在实验模型中预置基底走滑断层。

2.3 实验模型及实验材料

实验材料、边界条件和驱动力作用方式等,均按照相似理论的原则,根据临邑双帚状断裂系统的实际地质背景确定。

由于上地壳大多为脆性物质,而天然石英砂是一种用于模拟浅部地壳脆性库仑行为的很好的模拟物质,因此本次实验中采用天然石英砂混入8%凡士林。为了能够使剪切力更好地上传到模型上覆地层,产生整体的右旋剪切力,在地质模型的底层加上一层1 mm厚的具有弹性的塑料薄膜,薄膜四周在拉伸阶段与活动挡板连接。

时间相似系数为2.88~3.576 Ma/min,即1 min相当于自然界中2.88~3.576 Ma。

模型中地层厚度为1 cm,实际地层厚度为8.5 km,其相似比例系数为 1.18×10^{-6} 。模拟区域南北距离约为40 km,实验模型长度为26 cm,此方向的相

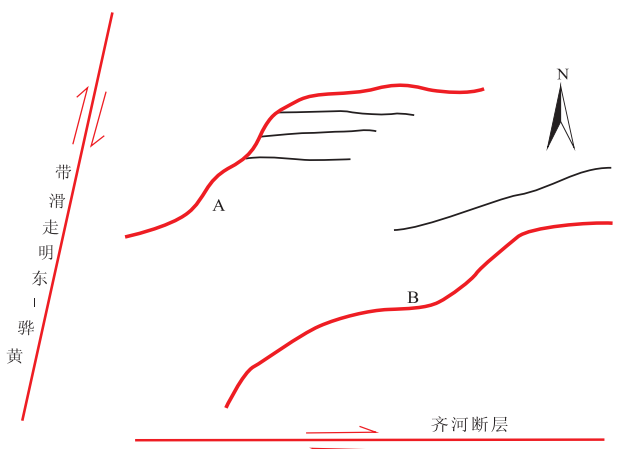


图4 渤海湾盆地惠民凹陷临邑洼陷双帚状断裂地质模型

Fig. 4 Geological model for Linyi dual brush faults, Huimin Sag, Bohai Bay Basin

似比例系数为 6.5×10^{-6} 。地层在一定垂直作用力下压实成层,形成地质模型。

本次研究中只涉及到拉伸和剪切作用,因此选用拉剪模具。该实验模具采用长、宽、高 $38 \text{ cm} \times 32 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ 的砂箱拉剪模具。实验中通过两侧的水平泵提供拉伸力,通过泵体中的蒸馏水流速控制面板来调节流速以达到调整拉伸力大小的目的。同时,通过泵体的拉伸作用,可以使模具中的基底走滑断层产生走滑剪切作用,平流泵的拉伸力大小变化可以间接地控制基底走滑剪切作用的强弱。

根据区域构造演化总的背景构造应力场特征,新生代主要以右旋剪切力为主。实验中通过平流泵中蒸馏水的流速变化来调节施力大小,可以间接控制基底走滑剪切作用的强弱,从而达到半定量一定量控制。据构造物理模拟实验的“逐步逼近原则”,结合多次实验数据,确定实验中平流泵的流速采用 20 mL/min 。

2.4 实验结果

实验初始状态为均一薄层,由平流泵的单向拉伸使模型整体受右旋剪切作用。

实验进行到 4.3 min ,即相当于沙四上沉积期,①号、②号和④号断层发育,①号断层附近的次级小断层与之呈左行排列,并且可以看出临北断阶带发育的趋势;②号和④号断层规模变大,表现出较强的活动性,而③号断层规模变化微弱(图 5a)。模拟表明在沙四段沉积期,临邑断层、临北断阶带开始初具形态,主要表现为临邑主干断层的中、西段开始发育,呈右旋左行排列,而夏口断层发育不

明显,③号断层即夏口断层控洼作用较小。

至沙三段沉积期(实验 $7 \sim 7.7 \text{ min}$)(图 5b),随着右旋剪切作用的持续进行,上述断层持续活动,规模变大,2号断层(即临邑断层)靠近①号发育,断层规模变大,①号和2号断层大致呈帚状排列;③号断层继续延伸变长,最终演变为1号断层,即夏口断层。模拟表明此期夏口断层由西向东开始发育,且临邑断层继续活动,④号断层大致对应玉皇庙断层,但其活动较强。模拟表明临邑、夏口双帚状断层在沙三沉积期形成,此时雁列特征比较明显,特别是临邑断层。夏口断层附近,由于右旋剪切作用形成一系列次级断层,走向与夏口断层近一致。

沙一段—东营组沉积期(实验 $10.3 \sim 12 \text{ min}$),夏口断层继续活动,活动较强,规模变化较大,附近发育的②号和⑤号断层也随着夏口断层的活动,规模也继续变大,玉皇庙断层继续发育(图 5c)。

此次实验模拟效果较好,与地质模型比较相似。在整个演化过程中,夏口断层和临邑断层一直在活动,但在沙三段—沙二段沉积期活动最强烈。总的来说,临邑断层的东端和夏口断层的西端帚状断层首先形成,在此基础上,临邑断层向西、夏口断层向东分别发育,大致在沙三段—沙二段沉积期活动最剧烈,同时陆续发育临南洼陷内次级断层,从而形成现今临南洼陷双帚状断层的构造格局。

3 结论

根据实验模型的设计要求,在预置断层方式和

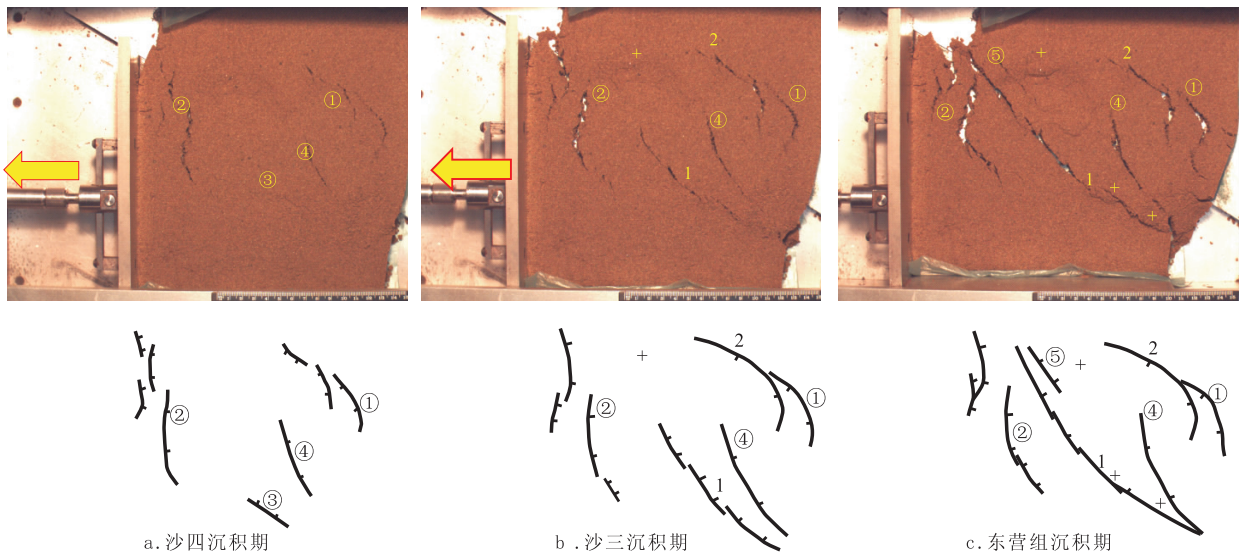


图5 渤海湾盆地惠民凹陷临邑洼陷双帚状构造物理模拟结果

+ 表示局部相对掀隆带,位置上处于兴隆寺、江家店和瓦屋构造带

Fig. 5 Physical modeling results of Linyi dual brush structure in Huimin Sag, Bohai Bay Basin

方位、实验材料等略有变化的情况下进行了多次构造物理模拟,最终实验模型所要求的双帚状构造、洼陷及洼陷内较大的次级断层等发育演化特征都获得再现。因此可认为实验半定量一定量地模拟了双帚状断裂系统的发展演化过程。基本地质结论如下:

1) 临南洼陷新生代2条控洼断层在平面上主要表现为帚状,在剖面上构成地堑样式,双帚状断裂在力学机制上主要受控于新生代右旋走滑作用;

2) 新生代双帚状断裂主要活动时间为古近纪,且从沙四上亚段沉积期、沙三段—沙二段沉积期至沙一段—东营组沉积期,呈现弱—强—较强的活动变化规律;

3) 在生长发育序列上,临邑主干断层由东向西、分支断裂由北至南发育,活动强度西强东弱;与此相对应,夏口主干断层自西向东发育,向东活动性逐渐增强。

物理模拟存在的缺陷:

1) 重力在大规模的构造变形过程中起到极其重要的作用,因此,构造物理模拟不能不考虑重力的影响^[18],而本次实验缺少考虑重力因素的作用;

2) 该模拟单纯考虑地质构造因素,且实验材料与自然界实际地质组构间存在一定的差距。地质作用过程应该是塑性、粘弹性和刚性变化交替的过程。限于实验条件,在此方面缺乏考虑,还需进一步完善改进;

3) 构造与流体作用过程及对油气影响^[19-22],没有体现出来。下一步实验可综合构造变迁、流体及油气充注全方位实施。

致谢:物理模拟得到中国石油大学(华东)李理教授和她的学生及惠民研究室同仁的大力支持,谨此表示诚挚的谢意!

参考文献:

- [1] 赵卫卫,李得路,查明. 陆相断陷盆地砂岩透镜体油藏成藏过程物理模拟[J]. 石油实验地质,2012,34(4): 438-444.
- [2] 马宝军,漆家福,于福生,等. 施力方式对半地堑反转构造变形特征影响的物理模拟实验研究[J]. 大地构造与成矿学,2006,30(2): 174-179.
- [3] Dooly T, Mc Clay K. Analog modeling of pull-apart basins[J]. AAPG Bulletin,1997,81(11): 1804-1826.
- [4] Magma G C. Induced strain localization in centrifuge models of transfer zones[J]. Tectonophysics,2002,348(2): 205-218.
- [5] Marques F O, Cobbold P R. Topography as a major factor in the development of arcuate thrust belts: Insights from sand box experiments[J]. Tectonophysics,2002,348(2): 247-268.
- [6] 佟殿君,李亚哲,任建业,等. 临南洼陷构造样式、发育机制及其对油气成藏的控制[J]. 石油天然气学报,2010,32(4): 31-36.
- [7] 王克,查明. 惠民凹陷中央隆起带油气事件成藏规律[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报),2008,30(3): 5-9.
- [8] 赵阳,刘震,戴立昌. 惠民凹陷临南洼陷异常低压与油气聚集的关系[J]. 西北大学学报,2004,34(6): 713-716.
- [9] Hempton M R, Neher K. Experimental fracture, strain and subsidence patterns over en-echelon strike-slip faults: implications for the structural evolution of pull-apart basins [J]. Journal of Structural Geology,1986,8(6): 597-605.
- [10] 陈伟,吴智平,侯峰. 临南洼陷临商断裂带与油气成藏的关系[J]. 油气地质与采收率,2010,17(2): 25-28.
- [11] 赵波. 松辽盆地安达地区石油地质特征及勘探方向分析[J]. 石油实验地质,2011,33(2): 165-170.
- [12] 张君龙,蒙启安,漆家福. 断陷盆地多期构造变形特征与油气聚集:以海拉尔—塔木察格盆地南贝尔凹陷为例[J]. 石油实验地质,2012,34(4): 368-375.
- [13] 崔世凌,杨泽蓉,李鑫,等. 惠民凹陷构造样式及分布规律研究[J]. 石油物探,2010,49(2): 187-197.
- [14] 孙冬胜,刘池阳,杨明慧,等. 渤海湾盆地冀中坳陷中区新生代复合伸展构造[J]. 地质论评,2004,50(5): 484-490.
- [15] 王克,查明. 惠民凹陷中央隆起带油气事件成藏规律[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报),2008,30(3): 5-9.
- [16] 单家增. 构造模拟实验在石油地质学中的应用[M]. 北京:石油工业出版社,1996.
- [17] 钟嘉猷. 实验构造地质学及其应用[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [18] 稽少丞,王茜,杨文采. 华北克拉通泊松比与地壳厚度的关系及其大地构造意义[J]. 地质学报,2009,83(3): 324-329.
- [19] 沈朴,张善文,林会喜,等. 油气输导体系研究综述[J]. 油气地质与采收率,2010,17(4): 4-9.
- [20] 牟雪梅,查明,刘磊. 惠民凹陷江家店地区油气运聚过程物理模拟[J]. 石油天然气学报,2010,32(2): 6-10.
- [21] Nemcok M, Henk A, Rodney A G. Strike-slip fault bridge fluid pumping mechanism: insights from field-based palaeo-stress analysis and numerical modeling [J]. Journal of Structural Geology,2002,24(12): 1885-1901.
- [22] 彭渤,陈广浩. 地质过程中几种重要的构造—流体作用[J]. 地质论评,2002,48(5): 495-504.

(编辑 韩 斌)