

文章编号: 1006-6616 (2015) 02-0290-08

东辛永3断块区多期构造演化物理模拟

文璐¹, 杨少春¹, 路智勇^{1,2}, 张艳增², 辛杰¹, 吴昊¹

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛266580;

2. 中国石化胜利油田分公司东辛采油厂, 山东东营257049)

摘要: 东辛永3地区为一多油层、中高渗透复杂断块, 内部被多级断层切割复杂化, 沙河街组为其主要含油层位。在三维地震解释基础上, 针对构造形态、成因机制不明确等问题, 根据相似理论支撑, 经过材料选取、边界设定、时间确立、受力加载, 对研究区古近纪沙河街组构造演化进行构造物理模拟。模拟结果实现了研究区基本断裂特征的恢复, 验证了地震解释结果; 初期北北东、北西向伸展、后期右旋剪切及底辟上拱多期构造能够成功模拟, 明确了其成因机制, 与整体东营凹陷伸展区域应力场及郯庐断裂带转型机制相吻合。

关键词: 构造物理模拟; 成因机制; 相似理论; 多期构造演化; 永3断块区

中图分类号: P542

文献标识码: A

0 引言

构造演化物理模拟以相似理论为依据, 采用相似的实际物理材料, 按照一定的构造形成模式, 模拟自然界岩石的构造变形, 重现原始的地质构造特征, 并阐述其成因机制、力学过程及物理参数效应^[1]。在国内, 李四光率先进行了一系列有意义的地质构造物理模拟实验, 此后不少学者相继开展了大量工作, 如: 单家增等研究了莺歌海盆地泥底辟构造的成因机制^[2-3]和辽河拗陷古近纪两期构造演化^[4]; 周建勋等介绍了盆地构造研究中的砂箱模拟实验方法^[5]; 朱战军等总结了挤压构造的砂箱物理模拟实验研究现状^[6]。

永安镇油田位于济阳拗陷东营凹陷的东北部, 是一个受永南断裂带控制的多油层多断块油气田, 而研究区永3断块是位于永安镇油田南部的一个断块。该区断层走向复杂多变, 低级序断层错综, 油气分布不清, 因此断裂系统的演化及形成机制对该区油藏开发中后期挖潜有着重要的意义。前人对永3断块已做了大量地质研究工作, 但大都局限于储层解剖或者断裂特征解析, 构造地质实验研究比较少, 目前对区内断裂成因认识多为南北单向伸展和底辟效应共同作用。本研究采用多期施力、边界简化、相似材料选取的物理模拟实验方法^[7-8], 模拟古近纪沙河街组以来研究区断裂系统的成因机制。

收稿日期: 2014-11-06

基金项目: 国家油气重大专项 (2011ZX05011-003)

作者简介: 文璐 (1990-), 女, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要从事油气藏开发地质研究。E-mail: youyouwoxin90

@163.com

1 永3断块区古近纪沙河街组时期以来构造背景

永3断块面积近 10.6 km^2 ,总体上受北界南倾近东西向的永3三级大断层控制,断层落差在 $150\sim 450\text{ m}$ 。断块内部又发育2条规模较大的近东西走向的四级断层,地层基本南倾,倾角在 $10^\circ\text{--}12^\circ$ 。由于2条北倾反向断层的分割作用,可分为北、中、南3个断鼻构造带^[9]。

研究区断层走向有东西向、北西向和近南北向。北西向断裂系统主要发育于研究区东部,断层规模、垂直断距和平面延伸长度均较大;近南北向断裂系统主要发育于研究区西部和东北部,活动时间较长;研究区中部主要以东西走向的断裂为主,且断裂断距大,切割深。剖面上,这组断裂一般断面向北倾斜,个别向南倾斜(见图1)。平面上,断层组合表现为平行式、弧形、树枝状分叉和斜交式。其中主干断层以弧形居多,而次级断层多为平直状。

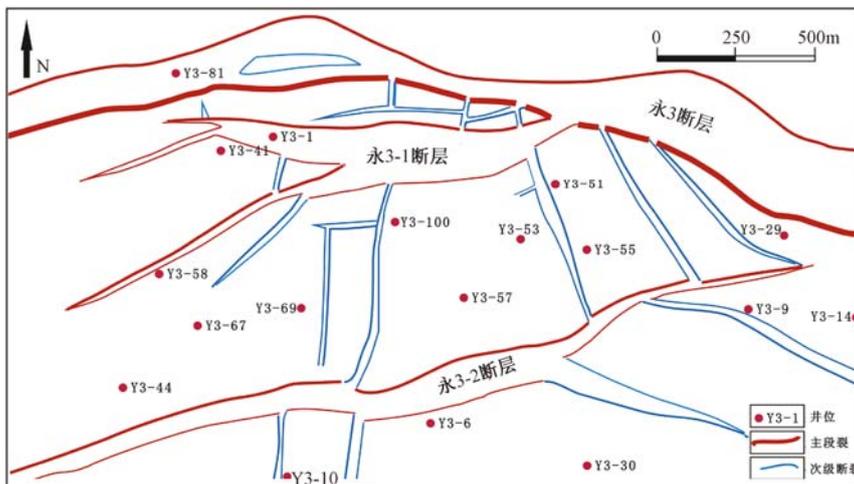


图1 永3断块区断裂分布

Fig. 1 Fault distribution of Yong 3 fault block

郯庐断裂带的演化序列分为左旋和右旋2个大的阶段,以距今 45 Ma (E_4 时期)左右为界。沙河街组经过转型期,致使研究区初期以北北东—南南西向区域引张作用为主, E_3 以来区域应力场以北西—南东向引张为主,总体表现出双向伸展特点; E_2 时期发生东营运动,产生右旋张扭性的区域应力场^[10];东营凹陷在始新世末至渐新世初(孔店组上部至沙四段)普遍发育盐岩、石膏、软泥岩等塑性岩层,永3断块区中部产生底辟效应,全区构造格局形成。

2 模拟实验原理

模拟实验主要遵循相似性原则建立模型,通过实验得到某些量之间的关系和规律,然后推广到实际对象上。模拟实验最关键之处是模型与原型的相似程度^[11],相似关系主要分为材料相似、边界相似、时间相似、动力相似等。目前对相似条件还无法做到很精确,大部分

情况下只能做到半定量状态,需要经过实验加以总结。通常的做法是:以相似材料的选择作为一般性参考^[1],最终以模型的构造形态变化达到与实际构造现象近似为主要判据。

材料相似主要考虑材料的力学性质,通常根据研究区的岩石力学参数确定;边界相似真正做到比较困难,通常采取简化边界的方式,实验模型几何相似因子通常为 $10^{-4} \sim 10^{-6}$;时间相似是指模拟实验与地质构造变形过程时间上的近似,模拟实验的1 min相当于自然界中的10~100 Ma,故时间相似因子在 $10^{-11} \sim 10^{-13}$ ^[12];动力相似为根据构造背景及试错法得出的作用力大小及方向推算模拟的构造变形力。

3 模拟实验过程

3.1 实验材料选取

永3断块岩性主要是细砂岩和粉砂岩,有部分含砾砂岩、砾状砂岩和泥质粉砂岩。经过反复试验,采用细砂与干黏土以3:1比例混合加适量水配置,在约 $15 \sim 20 \text{ g/cm}^2$ 的垂直力作用下压实成层,在挤压试验中产生的共轭剪切破裂角与工区一致。

3.2 边界条件和受力方式确立

边界几何条件不仅决定了构造的剖面样式,而且控制着构造的平面展布特征及三维变化规律^[13~16]。根据永3断块区沙河街组二段4砂层组顶面构造图中井位分布和断层分布特点,选择边界断层(永3断层)以南的范围(见图1)作为本实验构造物理模拟范围。

根据构造形迹法和应力场数值模拟结果确定研究区受到北北东—南南西向拉张应力、北西—南东向拉张应力及北东—南西右旋剪切力,且永3断层与永3-2断层中部放射状断层反映底辟效应,这与东营凹陷形成时的区域应力场一致。

3.3 模型设计

实验采用中国石油大学(华东)的构造物理模拟仪器,通过两侧手轮转动速度达到调整力的大小之目的。实验取边界简化相似,实际研究区展布长度为4 km,展布宽度2.5 km,岩层厚度约1 km,故设计模型尺寸为 $32 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$,几何相似因子 C_L 值为 8×10^{-5} 。本研究模拟沙河街组时期,历经17.7 Ma,实验用时20 min,时间相似因子 C_t 值为 2.15×10^{-12} 。本区断裂是在复杂的构造环境中由不同时期、不同方向的伸展和剪切共同作用形成的,本实验采用多向伸展和剪切作用及上拱作用,力的大小通过手动螺旋摇转速度快慢来调节。实验所用原型为走滑构造实验模型,经过改造,实现了多期构造叠加(见图2、图3)。在实验过程中,根据实际的力学限制条件及时改变旋转的速度,以改变力的大小。

3.4 实验过程

本实验共经历18 min,实验过程如下:

北北东—南南西向伸展阶段:模型调整为北西西—南东东向,作为实验的原始状态。钢板南北方向拉伸,从东段开始发育永3断层(见图4a),随后在中部从东段发育永3-1断层,从西部发育永3-2断层。开始断层规模较小,间断分布,永3断层断面南倾,永3-1和永3-2断层断面北倾。200 s后,在东部发育北西向断层①,随着拉伸继续,形成的断层切割深度和断距变大(见图4b)。

北西—南东、北北东—南南西双向伸展阶段:实验至500 s左右,永3、永3-1断层向西侧延展,永3-2断层向东侧延展(见图4c),断层走向以近东西向为主,目前主要为张应力。

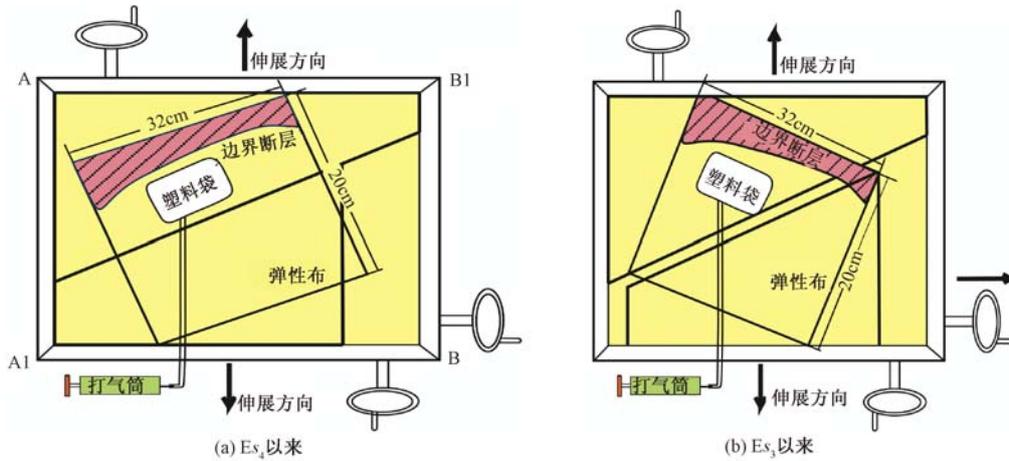


图2 实验模型平面图
Fig. 2 Plan of experimental model

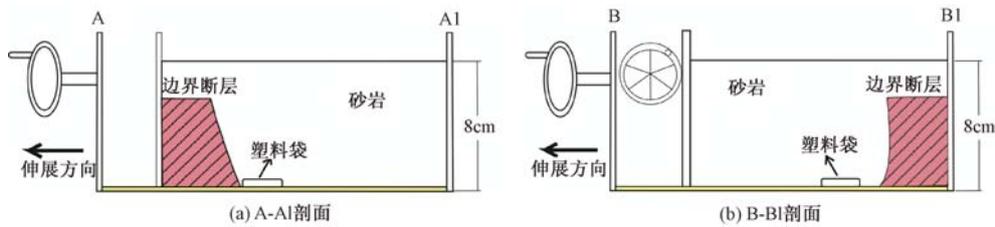


图3 实验剖面图 (剖面位置见图2)
Fig. 3 Profile of experimental model

右旋剪切作用阶段: 实验至 900 s 左右, 施加北东—南西向右旋剪切作用力, 在永 3-2 断层南部及永 3 断层与永 3-2 断层之间产生剪切性质的断层②③④⑤⑥。受先期断层限制, ②③断层夹于永 3 和永 3-2 断层之间, ④⑤断层交于永 3-2 断层西段, ⑥断层交于永 3-2 东部, 同时由高级序断层又衍生发育多条次级断层 (见图 4c、4d)。

底辟上拱作用施力阶段: 在中部产生近似放射状的断层 (见图 4e), 随着底辟作用加强呈发散状展布。后期低级序断层主要出现在高级序断层末端, 东部 2 条高级序断层之间呈雁列状展布, 中部岩层拱张部位出现放射状展布等。

4 实验结果分析

实验过程中出现的四级以上断层与地震解释的构造图相吻合, 在发育次序上, 边界断层和三级断层最早形成, 随后四级断层产生, 伴随产生一些低级序断层。

断裂形成的动力机制主要为初期受北北东—南南西、北西—南东两期伸展作用, 加之右旋剪切作用及上拱作用。这与东营凹陷沙河街组以来的构造背景相契合。

证实了底辟作用大约发生在 $E_{s_2}^3$ 时期, 加载位置在中部, 效果明显, 说明实际位置底辟作用明显。初期对地层有松动作用, 可加剧高级序断层的断裂程度; 后期在高级序断层附近生成多个呈放射状的低级序断层。随着构造运动加剧, 在大断层附近也产生了许多与大断层平行或相交的低级序断层。

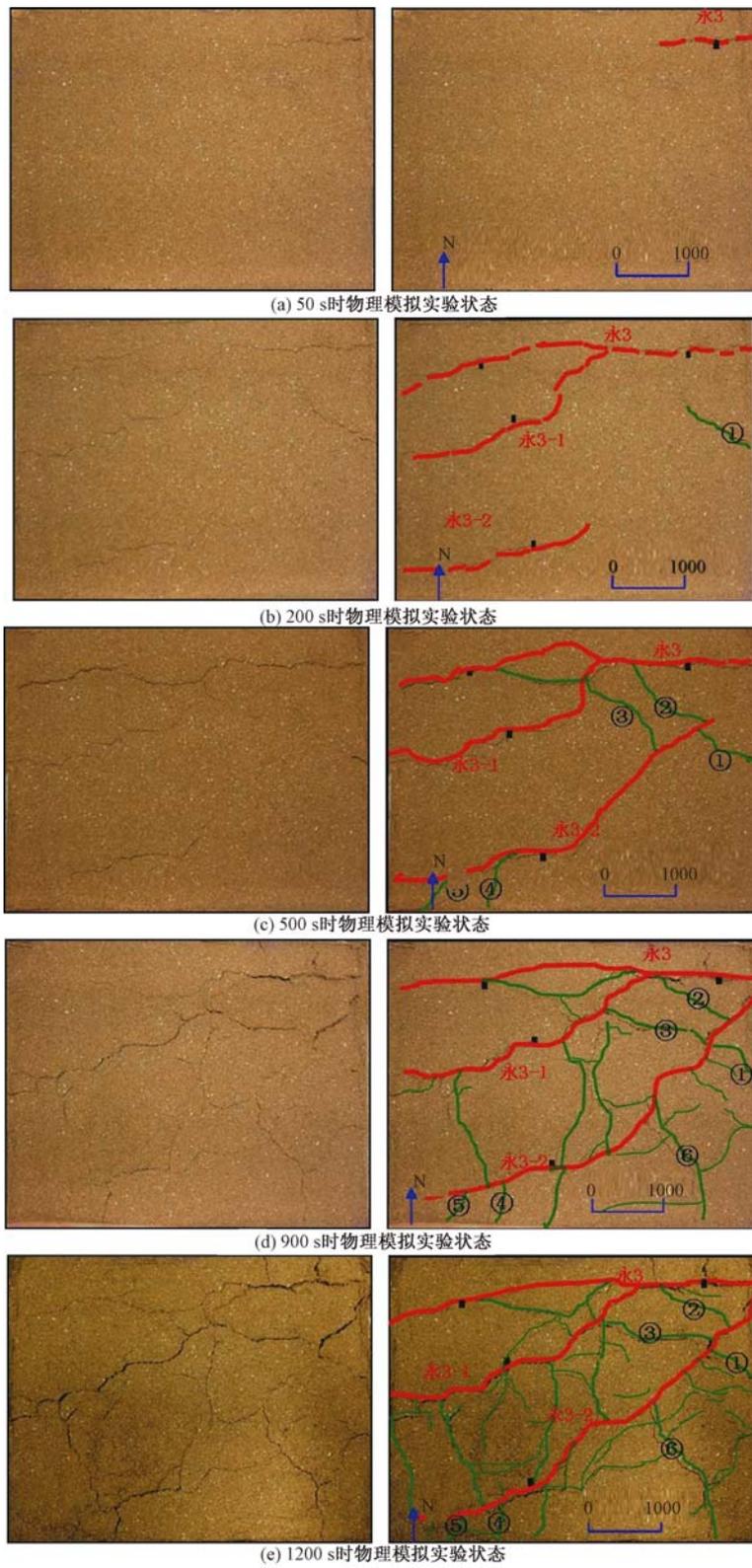


图4 构造物理模拟实验

Fig. 4 Experimental process of physical modeling

根据实验模拟过程结合区域构造背景得出该区的断裂演化模式 (见图5), 可以看出:

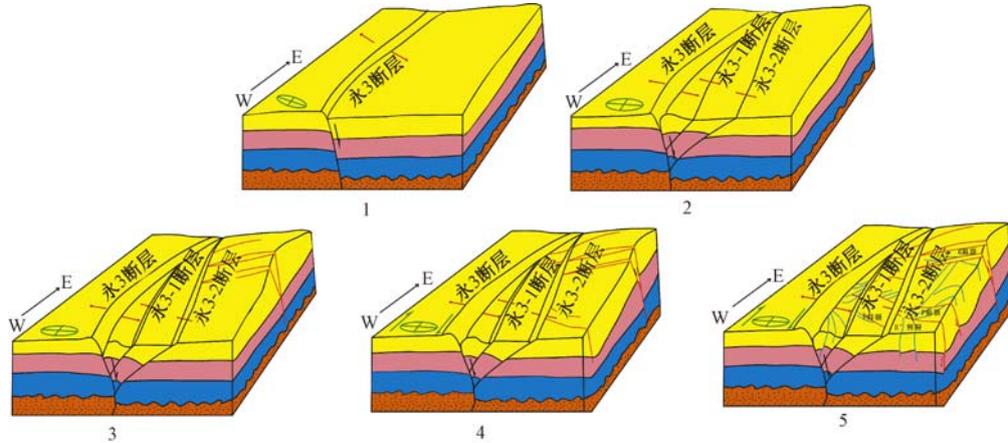


图5 永3断块区断裂形成模式

Fig. 5 Fracture formation model of Yong 3 fault block

①北北东—南南西向伸展断陷阶段 ($E_k—E_{s_4}$), 北北东—南南西向区域引张作用为主, 发育北西西—南东东向断裂。

②双向伸展作用阶段 ($E_{s_3}—E_{s_2}^{\text{下}}$), 北北东—南南西向区域引张继续作用, 并发生以北西向伸展作用为主的双向伸展阶段, 产生近北向伸展合力, 永3、永3-1及永3-2高级序断层受其控制发育, 且在永3-2断层尾端产生部分北西向次级断层。

③张扭作用阶段 ($E_{s_2}^{\text{上}}—E_{s_1}$), 处于裂陷收敛幕, 断裂活动减弱, 经过东营运动, 形成近东西向右旋张扭性的区域应力场。近北向断层大量发育, 且对高级序断层进行改造, 形成弧形弯曲。在该时期研究区中部受底辟上拱作用, 使前期产生的近北向的断层呈发散状展布。

④断块深埋阶段 ($E_d—N_m$), 地层在此时期继承平稳沉积, 步入断块深埋时期。

5 结论

依据相似理论, 进行材料选取、边界设定、时间确立及动力加载, 实现了研究区基本断裂特征恢复, 实验结果展现的断裂特征验证了地震解释的结果。

初期北北东—南南西、北西—南东两期伸展作用, 加之右旋剪切作用及上拱作用多期构造叠加, 成功验证了预测的断裂形成演化。与整体东营凹陷区域伸展区域应力场及郯庐断裂带的左右旋转型阶段相吻合。

低级序断层主要分布于单条高级序断层末端和弯曲部位、两条高级序断层之间或断层相交位置以及带状拱张变形 (局部有底辟作用) 的部位。

确定了此研究区成因机制, 研究成果也可适用于东营凹陷其他区域。

参 考 文 献

[1] 马瑾. 构造物理学概论 [M]. 北京: 地震出版社, 1987.

MA Jin. Tectonophysics introduction [M]. Beijing: Seismological Press, 1987.

- [2] 单家增. 莺歌海盆地泥底辟构造成因机制的模拟实验 (一) [J]. 中国海上油气 (地质), 1994, 8 (5): 311~318.
SHAN Jia-zeng. Model experiments one on the mechanism of mud diapir structure in Yinggehai basin, South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1994, 8 (5): 311~318.
- [3] 单家增, 董伟良. 莺歌海盆地泥底辟构造动力学成因机制的高温高压模拟实验 [J]. 中国海上油气 (地质), 1996, 10 (4): 209~214.
SHAN Jia-zeng, DONG Wei-liang. High temperature and high pressure modeling experiments for dynamic mechanism of the mud in Yinggehai basin, South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1996, 10 (4): 209~214.
- [4] 单家增, 张占文, 肖乾华. 辽河坳陷古近纪两期构造演化的构造物理模拟实验 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31 (3): 14~17.
SHAN Jia-zeng, ZHANG Zhan-wen, XIAO Qian-hua. Modeling experiments of two-phase structural evolution in the Liaohai depression, Paleogene [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31 (3): 14~17.
- [5] 周建勋. 基于平面砂箱实验对黄骅盆地新生代构造成因的新解释 [J]. 大地构造与成矿学, 1999, 23 (3): 281~287.
ZHOU Jian-xun. New interpretation on the mechanism of Cenozoic structures in the Huanghua basin, north China: Insights from plane sandbox experiments [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1999, 23 (3): 281~287.
- [6] 朱战军, 周建勋, 林壬子. 挤压构造的砂箱物理模拟实验研究现状 [J]. 断块油气田, 2002, 9 (2): 11~13.
ZHU Zhan-jun, ZHOU Jian-xun, LIN Ren-zi. Experimental study on sand-box analog models of compressional structure [J]. Fault Block Oil & Gas Field, 2002, 9 (2): 11~13.
- [7] 单家增. 构造物理模拟实验在实验地质学中的应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
SHAN Jia-zeng. The application of structural physical modeling in experimental geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [8] Ramsay J G, Huber M I. The techniques of modern structural geology [M]. London: Academic Press, 1989: 1~127.
- [9] 陈清华, 吴孔友, 王绍兰. 永安镇油田构造特征 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1998, 22 (5): 23~25.
CHEN Qing-hua, WU Kong-you, WANG Shao-lan. Structural features in Yonganzhen oilfield [J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1998, 22 (5): 23~25.
- [10] 张升平. 东营凹陷新生代构造转型及其控油意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31 (3): 281~287.
ZHANG Sheng-ping. The Cenozoic structural transition and its significance for petroleum accumulation in Dongying sag, Shandong [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31 (3): 281~287.
- [11] 赵仕俊, 赵锡奎, 杨少春. 构造物理模拟实验模型的相似条件 [J]. 西北地质, 2005, 38 (4): 14~18.
ZHAO Shi-jun, ZHAO Xi-kui, YANG Shao-chun. Similar analysis of geological structure physical model [J]. Northwestern Geology, 2005, 38 (4): 14~18.
- [12] 周建勋, 漆家福. 盆地构造研究中的沙箱模拟实验方法 [M]. 北京: 地震出版社, 1999: 1~3.
ZHOU Jian-xun, QI Jia-fu. Sand box experiment in the study of basin tectonic [M]. Beijing: Seismological Press, 1999: 1~3.
- [13] Braun J, Batt G E, Scott D L, et al. A simple kinematic model for crustal deformation along two- and three dimensional listric normal faults derived from scaled laboratory experiments [J]. Journal of Structural Geology, 1994, 16 (10): 1477~1490.
- [14] 周永盛, 李建国, 王绳祖, 等. 用物理模拟实验研究大陆伸展构造 [J]. 地质力学学报, 2002, 8 (2): 141

~147.

ZHOU Yong-sheng, LI Jian-guo, WANG Sheng-zu, et al. Physical experiments on continent extensional structures [J]. *Journal of Geomechanics*, 2002, 8 (2): 141 ~ 147.

[15] Saltzer S D. Boundary conditions in sandbox models of crustal extension; an analysis using distinct elements [J]. *Tectonophysics*, 1992, 215 (3/4): 349 ~ 362.

[16] Mc Clay K, Dooley T. Analogue models of pull-apart basins [J]. *Geology*, 1995, 23 (8): 711 ~ 715.

PHYSICAL MODELING OF MULTI-PHASE STRUCTURAL EVOLUTION OF YONG-3 FAULT BLOCK IN DOXIN

WEN Lu¹, YANG Shao-chun¹, LU Zhi-yong^{1,2}, ZHANG Yan-zeng², XIN Jie¹, WU Hao¹

(1. *College of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China;*

2. *The Dongxin Production Plant of SINOPEC Shengli Oilfield Branch, Dongying 257049, Shandong, China*)

Abstract: The Yong-3 fault block in Dongxin is a complicated reservoir with multi-layers, medium and high permeability, thin oil. The main oil-bearing layer is Shahejie Formation. According to the 3D seismic interpretation, with choosing the appropriate material, setting boundaries, determining time and loading stress, physical modeling experiments of the structural development in the Shahejie Formation, Paleogene in the study area are conducted on the basis of similarity theory for the uncertainty of structural shape and the genetic mechanism. The result makes the representation of basic fracture characteristics come true to validate the seismic interpretation. It also shows that the multi-phase structural evolution history can be divided into NNE-SSW extension, NNE-SSW and NW-SE extension, dextral-slipping and diapir. Mechanically, the tectonic evolution in the study area is controlled by intense extension and the fault depression of Dongying sag and the right-lateral strike-slip of Tanlu fault zone.

Key words: physical modeling; genetic mechanism; similarity theory; multi-phase structural evolution history; Yong-3 fault block