

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2018014

基底性质对断裂构造的影响: 以琼东南盆地为例

张佳星¹, 尹宏伟^{1*}, 朱继田², 熊小峰², 汪伟¹, 李长圣¹, 吴珍云³, 刘绍文¹

1. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023;

2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524057; 3. 江苏省地震局, 南京 210014

摘要: 影响断裂凹陷内的断裂系统演化的原因包含多种因素, 此次研究针对先存断裂及基底性质对断陷盆地的影响, 通过物理模拟实验方法探究裂谷盆地断裂发育的构造演化过程。根据对琼东南盆地的地震剖面图的解释分析, 盆地东部和西部的凹陷显示不同的凹陷构造形态, 实验结果显示, 先存断裂的位置和走向影响区域凹陷的演化和平面展布, 在先存断裂影响的区域演化形成地堑构造, 在无先存断裂影响的区域则演化形成地垒构造; 韧性基底的上覆地层拉伸演化为复式半地堑构造, 而刚性基底的上覆地层呈铲状半地堑构造, 在不同基底性质影响下的构造变形模式和琼东南盆地东西部的差异构造样式基本相符, 一定程度上说明了基底性质的差异对琼东南盆地东部和西部凹陷在断裂组合形态差异方面具有影响作用, 为研究供给油气运移聚集成藏的断裂系统演化提供了思路。

关键词: 物理模拟; 基底岩性; 构造差异; 断裂组合; 凹陷

中图分类号: P542

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2018)04-0563-10

Influence of Basement Property on the Fracture Structure: A Case Study of the Qiongdongnan Basin

ZHANG Jiaying¹, YIN Hongwei^{1*}, ZHU Jitian², XIONG Xiaofeng², WANG Wei¹, LI Changsheng¹,
WU Zhenyun³, LIU Shaowen¹

1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. CNOOC China Limited Zhanjiang Branch, Zhanjiang 524057, China; 3. Jiangsu Earthquake Administration, Nanjing 210014, China

Abstract: There are several factors influencing the formation of fracture system. In this paper, three scaled analog sandbox models were constructed to simulate the tectonic evolution of fault in rift basin, to explore the tectonic evolution of Qiongdongnan basin during the main fracture stage. According to the interpretation of 2D seismic section, the depression in eastern and western Qiongdongnan Basin shows different tectonic forms. Model results showed that the evolution and development of adjacent depression is affected by the position and direction of the fault-margin affects, and the basement property had a significant influence on the tectonic evolution. The formation of graben structure is affected by pre-existing fault, the regional tectonic evolution formed horst without pre-existing fault. The compound half-graben occur when the basement develop ductile deformation, and the shovel-like half-graben of structural style occur when the basement develop brittle deformation. Based on the model results, it is proved that the basement property plays an important role in developing different kinds of fault combination in the eastern and western Qiongdongnan Basin, which provide the paths for studying the fracture system of hydrocarbon migration and accumulation.

Key words: physical modeling; basement property; geological structural differences; fault combination; sag

Corresponding author: YIN Hongwei, Professor; E-mail: hwyin@nju.edu.cn

收稿日期: 2018-01-31; 修回日期: 2018-03-09

基金项目: 国家科技重大专项课题(2016ZX05026-002-007); 国家自然科学基金(41272227; 41572187) 联合资助

作者简介: 张佳星, 女, 1991年生, 硕士研究生, 主要从事构造地质方面研究工作; E-mail: jxz2318@163.com

*通讯作者: 尹宏伟, 男, 1971年生, 教授, 从事含油气盆地构造与沉积特征的研究与教学工作; E-mail: hwyin@nju.edu.cn

南海北部裂陷盆地是多因素多期次构造运动共同作用的结果,作为世界上深水油气资源丰富的裂陷盆地之一,至今仍是中国深海油气开发的热点区,对其内部的构造形态及其与油气成藏关系的研究对中国海洋油气的开发具有重要意义。

对于裂陷盆地内构造成因和影响因素,许多学者提出了多种解释和分类,周永胜和王绳祖(1999)根据引起张裂的构造环境和动力学背景的不同,根据其成因分为拉张型、走滑型和挤压型裂陷盆地;凹陷构造与断裂相伴生,与控凹断裂具有相同走向的展布特征(杨传胜等,2017);根据对珠一凹陷的断裂分析,彭辉界等(2016)认为断裂类型、断层的平面展布长度、断裂与圈闭的相对距离等因素是断裂控制油气藏形成的主要因素;刘志峰等(2013)认为基底岩性是控制坳陷在断陷期拉张程度的先决条件之一;童亨茂等(2009,2010)结合物理模拟实验分析认为影响裂陷盆地断裂系统的因素主要包括:基底先存断裂的性质与分布,伸展作用的类型与方向、岩性和岩性组合等因素。

本文根据前人关于区域基底性质对拉伸盆地演化过程影响的研究成果,以及先存断裂和地层岩性对裂陷盆地构造影响作用的研究(李培廉等,1992;杨香华和李安春,2003;能源等,2011;刘桂侠等,2003)。参照现有的地震及钻井资料,结合伸展作用的物理模拟实验方法(Buchanan and McClay,1991; Mandal and Chattopadhyay,1995; McClay and Scott,1991; Davy and Cobbold,1991; Koyi et al.,1993; 朱战军和周建勋,2004)。模拟并分析裂陷盆地内先存断裂走向和基底岩性差异对断裂构造演化的影响作用,对于进一步认识裂陷盆地的构造演化过程和结合断裂构造分析识别良好油气藏环境提供了新的信息和思路。

1 地质背景

南海北部深水区凹陷形态包括半地堑型、地堑型和复式地堑型,其中大型继承性的断坳叠合型凹陷往往是富生烃凹陷(张成功,2010;朱俊章等,2015;雷超等,2011)。半地堑作为裂陷盆地的基本单元,其构造形态与油气成藏模式有着密切关系,要分析断陷盆地不同时期油气运移的方向和规模,可以从半地堑的沉积体形态、物源

通道、油气藏的烃源岩、地层岩性组合和储层物性等方面对半地堑的演化史进行分析(茹克,1990;吴培康,1992)。

琼东南盆地位于海南岛东南部、中国南海北部,莺歌海盆地东部,珠江口盆地西南部(图1)。自白垩纪末—古新世起,受太平洋板块俯冲后撤影响,华南地块南部陆壳边缘伸展减薄发生断陷,逐渐形成一系列条带状的、平缓的被动大陆边缘盆地(谢文彦等,2007;解习农等,2015;朱伟林等,2015;巫建华等,2008)。琼东南盆地的整体构造具有“东西分块”的特点,盆地东部和西部在凹陷分布和内部断裂构造方面表现出明显的构造差异。盆地东部和西部凹陷的平面展布方向不同:盆地东部的松南凹陷、宝岛凹陷、长昌凹陷和松南低凸起呈EW向展布,西部的崖南—陵水低凸起、乐东—陵水凹陷为NE向展布。

琼东南盆地主要经历了断陷期和坳陷期两个构造演化阶段,其中断陷期作为盆地的主要断裂发育期,对盆地的断陷发育和后期的构造演化都具有重要作用。从盆地东部和西部地震剖面图对比可以看出,在纵向上,盆地东部和西部凹陷内部断裂构造的密集程度有明显差异。盆地东部的长昌凹陷呈复式地堑构造,凹陷内部断裂呈阶梯状由中心向两侧发育,断层数量多,单一断层的断距较小(图2)。盆地西部的乐东凹陷剖面上呈半地堑构造,断陷一侧为缓坡,另一侧边界发育有坡度较大的正断层,断层数量较少,单一断层的断距较小。断裂相关构造活动主要发育于T60及早期沉积地层,T60之后的沉积地层属于坳陷沉积,剖面图显示盆地东部地层厚度明显小于盆地西部的地层厚度,说明盆地东、西部凹陷在断陷期的沉积厚度不均,长昌凹陷在坳陷期沉积地层较薄,表现出沉降速率大于沉积速率的“饥饿型”盆地特征;乐东凹陷在靠近2号断层附近的沉降速度较大,上部地层厚度显示出自NW方向的陆坡推进(苏明等,2009;李才等,2016)。

根据地球物理数据的分析结果显示,自中新世以来,南海周边存在大量岩浆活动,热模拟的结果显示岩浆活动对琼东南盆地东部热流的影响大于盆地西部(图3),推测盆地东部和西部的区域构造可能受到岩浆晚期热效应导致琼东南盆地东部的高热流值作用(施小斌,2017; Wang et al.,

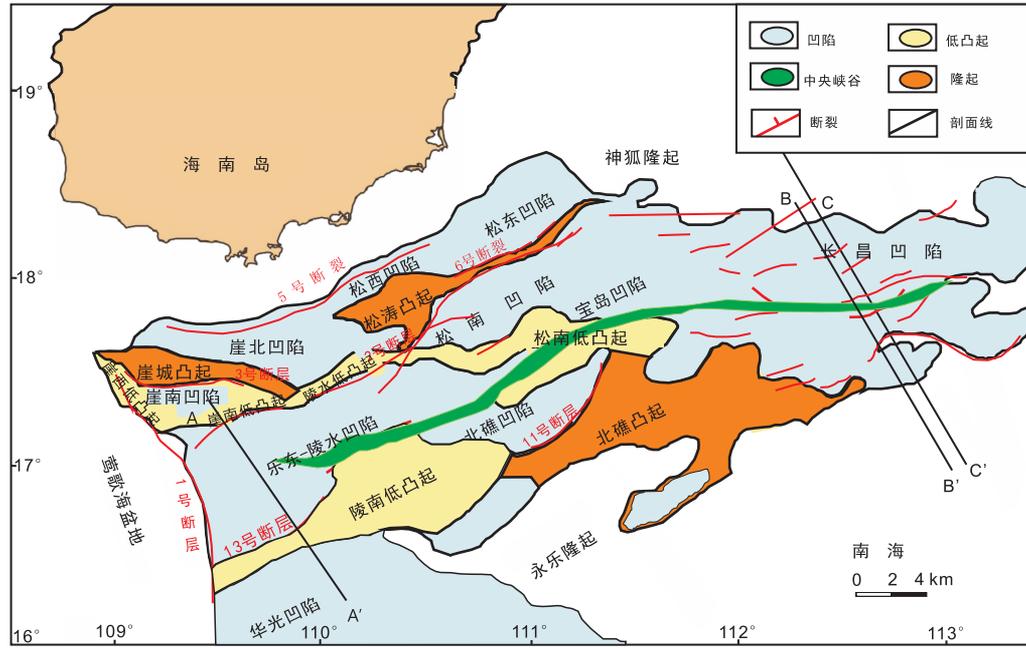


图1 琼东南盆地构造区域划分 (修改自杨军等, 2015)

Fig. 1 Tectonic map of the Qiongdongnan Basin

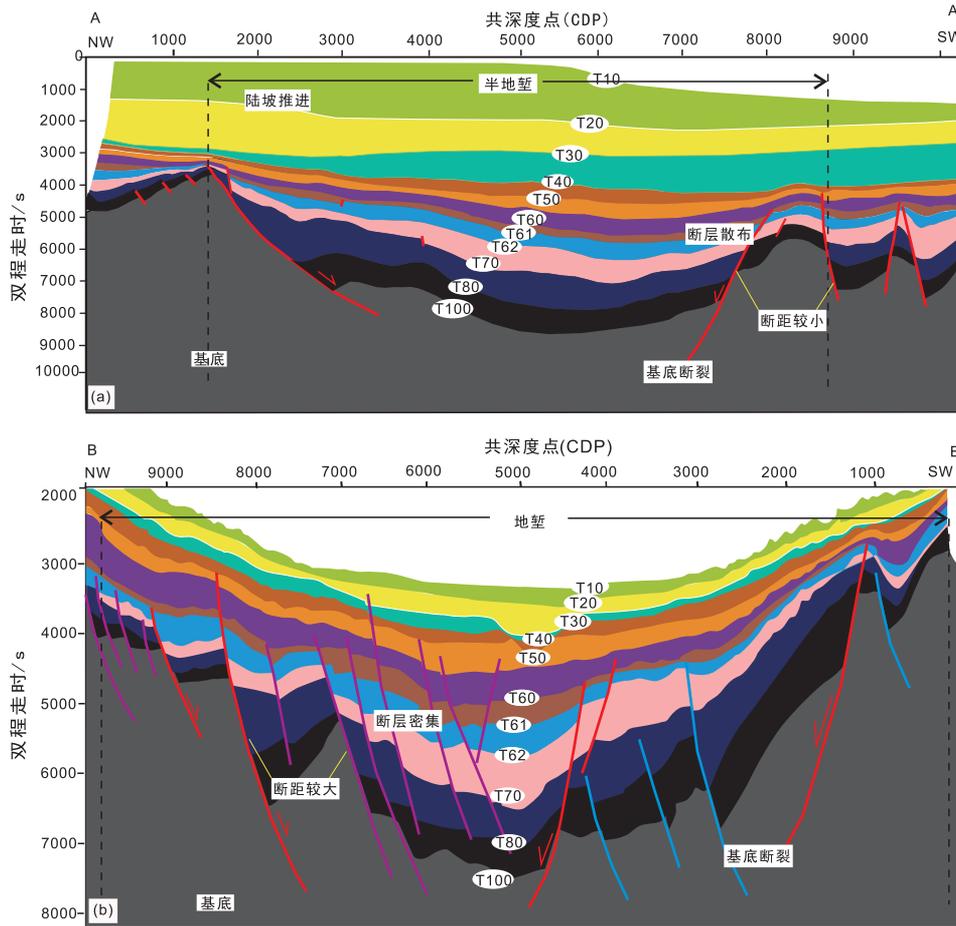


图2 AA' 和 BB' (剖面位置见图1) 的地震剖面解释图 (据中海油湛江分公司内部资料)

Fig. 2 Interpreted seismic section Line AA' and Line BB' (see Fig 1 for location)

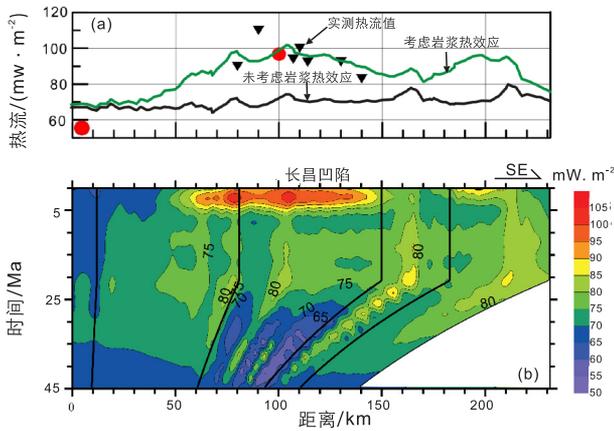


图3 琼东南盆地东部剖面现今热流与热流史
(施小斌等, 2017, 剖面位置见图1 CC')

Fig. 3 Present heat flow and paleo-heat flow evolution along the profile in the eastern Qiongdongnan Basin

2014), 造成盆地东、西部基底性质差异。为此, 笔者设计了三个物理模拟实验, 研究区域基底性质差异和先存断裂对裂陷盆地断裂构造的影响。

2 实验模型

物理模拟采用砂箱实验, 模型的设计符合几何学、运动学和动力学的相似性原理 (Bonini, 2003, 2007)。本实验中设计的长度 (l_m) 与实际尺度 (l_n) 的比值为 3.8×10^{-6} 。运动学的相似性则是通过量化确定模型的运动时间 (T_m) 与盆地断陷期的构造演化时间 (T_n) 相对应, 模型的相似比例设置如表1所示。

根据公式:
$$l_{m/n} = v_{m/n} \times t_{m/n} \quad (1)$$

计算得到 $l_{m/n} = 2.1 \times 10^{-6}$ 与实验设计长度比位于同一数量级。

实验材料选用的是在物理模拟中常被用来模拟上地壳的干燥石英砂, 石英砂粒径为 80~100 目。根据所选取的干燥石英砂密度可以得到实验

表1 实验材料性质参数
Table 1 Material properties

| 量 | 单位 | 模型 | 原型 | 相似系数 |
|-------------------|-------------------|------|----------------------|-----------------------|
| 长度(l) | m | 0.01 | 2700 | 3.6×10^{-6} |
| 速度(v) | mm/s | 0.02 | 1.2×10^{-6} | 2.1×10^5 |
| 时间(t) | s | 100 | 1×10^{13} | 1×10^{-11} |
| 密度(ρ) | kg/m ³ | 1297 | 2400 | 0.54(尹宏伟等, 2011) |
| 上覆地层摩擦系数(μ) | - | 0.65 | 0.7 | 0.832 |
| 上覆地层聚合强度(C) | Pa | 200 | 8.4×10^7 | 1.83×10^{-6} |

条件与自然条件下的应力比, 计算得到聚合强度比 (吴珍云等, 2014) ($\sigma_{m/n}$):

$$\sigma_{m/n} = \rho_{m/n} \times g_{m/n} \times l_{m/n} \quad (2)$$

公式 (2) 可得 $\sigma_{m/n} = 1.8 \times 10^{-6}$, 表明实验模型所使用的石英砂聚合强度相对于实际地层的倍数。实验选用的石英砂与实际地层的聚合强度比值约为 2.4×10^{-6} , 与公式 (2) 的结果位于同一数量级。

因此, 根据 (1)、(2) 的计算结果证明模型的尺寸与材料的选择满足动力学相似性原理的要求。

在模型设计过程中的基底材料的选择先后使用过铝板、橡皮布和帆布等材料, 模型中橡皮布传递伸展应力来模拟韧性基底, 帆布模拟不发生基底变形的区域。在模型中使用帆布和橡皮布的组合来模拟“刚性基底边界的先存断裂” (McClay et al., 1995; 童茂亨等, 2009; 周建勋等, 2002)。实验过程中先后使用过铝板和帆布模拟断裂的刚性地块边界, 实验结果基本一致, 帆布更易与橡皮布进行的拼接, 因此在模型中使用帆布模拟刚性地块边界。

模型的参数设置如表2所示, 其中模型1是盆地中模拟控凹断裂对断裂凹陷带演化发育的影响, 模型2和模型3分别对琼东南盆地东部和西部可能存在的韧性和刚性基底在伸展应力场中的断裂发育情况进行模拟, 模型上部同沉积层厚度是根据地震剖面图的地层沉积厚度进行添加。

表2 模型设置

Table 2 Model configuration

| 实验模型 | 模型大小/cm | 拉伸量/cm | 同构造沉积厚/cm |
|------|----------|--------|-----------|
| 模型1 | 80×80×40 | 36 | 4 |
| 模型2 | 60×80×40 | 40 | 3 |
| 模型3 | 50×80×40 | 34 | 6 |

3 实验过程和结果描述

3.1 模型1

本实验组目的是研究伸展应力作用下, 先存断裂对拗陷构造演化的影响。实验装置的底部将橡皮布两端固定于两端电机, 三角形帆布边缘与橡皮布拼接, 随橡皮布的拉伸向两边拉伸端移动。考虑琼东南盆地的主要NE向控凹断裂与伸展应力方向的夹角, 模型1断裂角度与伸展方向设定为 45° , 模型初始厚度为 12 cm, 拉伸量达 6 cm 时开始加入同沉积, 之后每隔半小时加入一层厚度

为 0.5 cm 的同沉积层，根据地震剖面图的凹陷平均地层厚度，到实验结束时加入同沉积层总厚度为 4 cm（图 4）。

实验开始后，模型两端以 0.02 mm/s 的速度同步拉伸，断层最先在先存断裂带处发育，当拉伸至 3 cm 时，沿着先存断裂处发育形成 V 型共轭断层，断层倾角与初始断层倾向一致，模型顶面形成一条由共轭断层构成的凹槽（图 5b）。随拉伸量增大，凹槽宽度逐渐增大，模型的两端向内逐渐发育正断层（图 5c）；当拉伸量为 22 cm 时，在先

存断裂附近形成的一系列正断层，使凹槽逐渐加宽形成小型凹陷（图 5d），在无先存断裂影响的另一端，向内部发育有连续的 V 型共轭断层。至实验结束，在剖面上构造演化为地垒-地堑-地垒构造。在先存断裂带，断层数量明显多于右侧拉伸所形成的正断层数量，凹陷的宽度约为 43 cm（图 5f）。

在拉伸过程中，位于基底先存断裂的上部首先发育断层，并在拉伸过程中形成一系列正断层构成的凹陷带，凹陷随基底的拉伸而不断变宽，

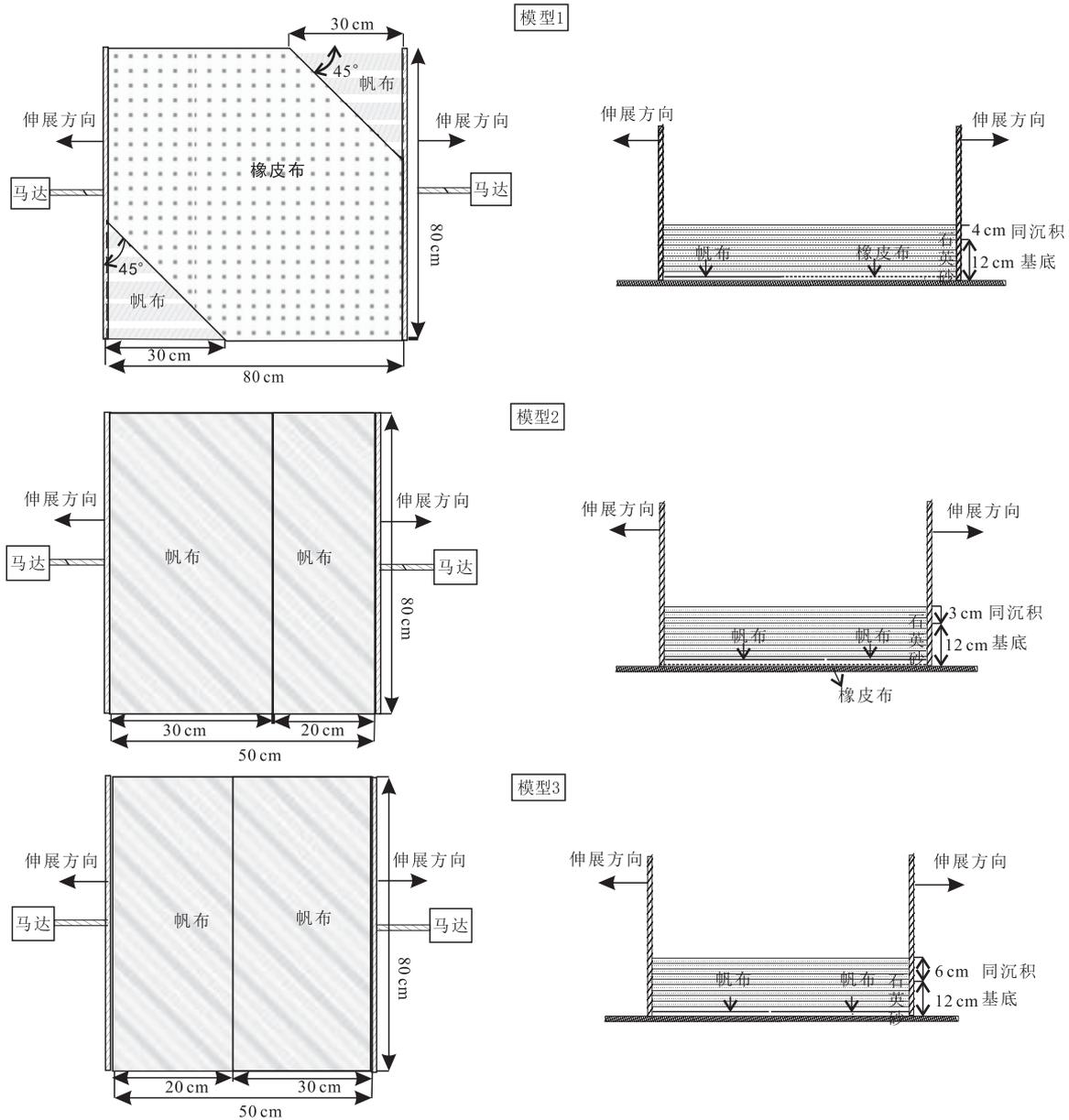


图 4 实验模型 1、2 和 3

Fig. 4 Experiment model 1, 2 and 3

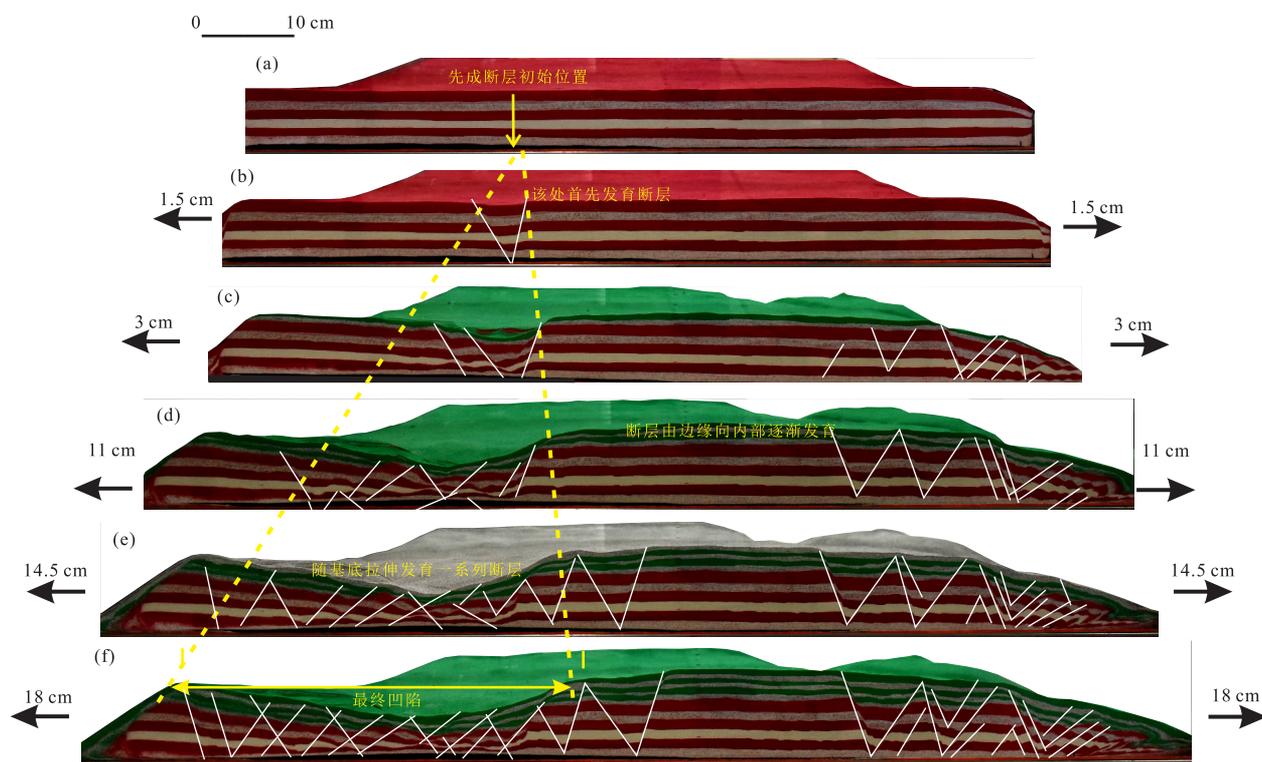


图5 模型1的运动演化过程

Fig. 5 The deformation process of model 1

存在先存断层一端所发育的断层多为反倾向断层，未设置先存断裂的一端发育多对共轭正断层。沿底部断裂的移动方向呈条带状分布，在模型顶面，凹陷平面展布与伸展应力的方向成 45° ，与先存断裂的走向一致。

拉伸应力自拉伸端向内部传递，造成靠近拉伸端的地层形变早、形变量大，模型中部相对隆起（图5f）。在没有先存断层影响的一端，在伸展作用下形成连续分布的共轭正断层，正倾断层和反倾断层的数量大致相同。

3.2 模型2

模型2设计目的是模拟存在韧性基底影响下凹陷的构造演化过程。模型中的两块帆布模拟被先存断裂分割的刚性地层边界，下部的橡皮布模拟韧性基底。先存断裂与两端拉伸边界平行，两端同时以 0.02 mm/s 的速度拉张。模型的初始厚度为 12 cm ，当拉伸量至 10 cm 时，开始每隔20分钟加入一层同沉积，根据长昌凹陷地震剖面图的沉积层厚度，至实验结束时加入同沉积层总厚度为 3 cm （表1，图6）。

实验开始后，两个断块在拉伸作用下逐渐拉

开间距，先存断裂处首先发育一对共轭断层，共轭断层发育形成条带状凹槽（图6b）。拉伸量达到 10 cm 时加入同沉积，条带状凹槽的拉分宽度增大，凹槽两边的共轭正断层随断块拉分，内部逐渐发育新的正断层（图6c）。随着拉伸距离的增大，凹槽由内向外依次发育正断层，发育的断层数量不断增多凹槽演化为凹陷，最先形成的断层切入地层的深度较深，凹陷中央的同沉积层较厚，两侧较薄；凹陷的中心位置不发生偏移（图6d）。模型2最终的拉伸率为 40% ，凹陷的宽度约 30 cm （图6e）。

在模型2中，先存断裂的位置决定了所发育凹陷的中心位置，在该位置最先发育断层，断层倾角约为 70° 。在底部韧性基底的作用下，凹陷内的断裂随拉伸作用向外依次发育，凹陷中央的同沉积层下降深度最大，向两边依次递减，因此凹陷的剖面形态呈“V”型。凹陷内部断裂的倾向与两边的拉伸方向大致相同，断层多为正倾向断层，发育有少量反倾断层。同样由于底部韧性基底的存在，正断层上盘的同沉积在拉伸作用下向两边移动，没有堆积在凹陷内部。

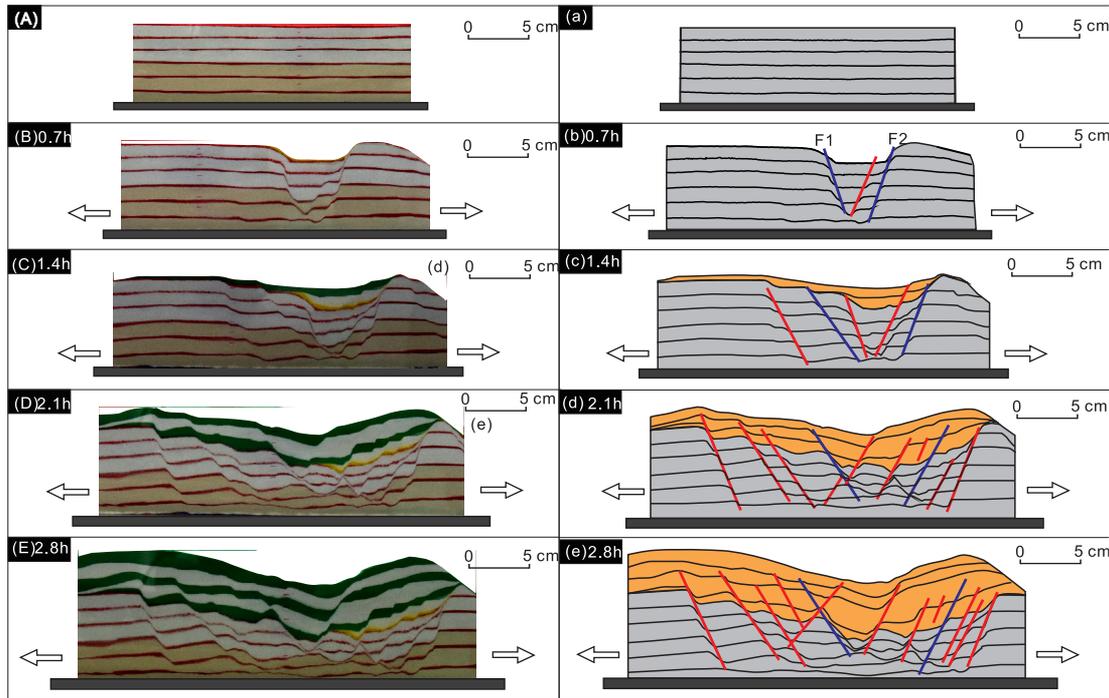


图6 模型2的运动演化过程 (A-E实验过程照片, a-e构造剖面解释图)

Fig. 6 The deformation process of model 2

3.3 模型3

模型3模拟刚性基底影响下断裂凹陷的构造演化过程, 使用两块边缘相切的帆布模拟被先存断裂分割的刚性地层边界, 但模型底部未放置代表韧性基底的橡皮布。模型的初始厚度为12 cm, 根据地震剖面图中乐东凹陷的地震剖面显示的地层厚度, 当拉伸量达到16 cm时, 开始加入第一层同沉积, 至实验结束共加入8 cm的同沉积。(表1, 图7)。

实验开始后, 两侧电机以0.02 mm/s的速度同步拉伸, 拉伸量到达8 cm时, 先存断层处首先发育一对共轭正断层, 共轭断层之间构成一条明显的凹槽(图7b)。随两边的拉伸量增加, 两条正断层的倾角逐渐减小, 凹槽进一步发育形成凹陷, 上盘沉积物堆积在凹陷中心形成低凸起(图7c)。凹陷内部自下而上开始发育断层, 断层上切至顶部同沉积层(图7d)。整个凹陷由两个半地堑和中央的低凸起组成, 形成的断层都位于凹陷内(图7e)。至实验结束时, 模型总拉伸量为34 cm, 构成凹陷的两个半地堑中央都发育有从基底延伸至顶面的深大断裂, 凹陷内断层数量较少, 中央低凸起上部同沉积层没有断层发育。凹陷的最终宽度约为47 cm(图7f)。

模型3在拉伸过程中断层的倾角在发育初期为

60°, 随伸展作用倾角逐渐降低最终为34°。影响断层倾角的直接原因是伸展作用下断裂地块间距增大, 致使凹陷宽度变宽。由于底部没有韧性基底的作用, 上盘沉积物向下塌陷并在在凹陷中央堆积形成小幅度隆起, 隆起两边形成犁式填充半地堑构造, 在底部刚性板块的拉伸下, 两个地堑内部的同沉积层自下而上发育少量正断层, 断裂由底部基底延伸至顶面, 断层数量较少。从整体看, 断裂凹陷构造由两个半地堑和一个中央低凸起组成。

4 讨论

4.1 韧性基底对凹陷断裂构造的影响

对比韧性基底在伸展应力作用下对上部地层构造发育的影响, 对模型2和模型3的实验结果进行分析。表3分析显示, 在构造发育过程中和最终的断层组合形态方面都表现出明显差异。模型2在拉伸作用下形成的凹陷内部断裂数量较多, 断层走向与伸展应力方向相垂直, 单一断层断距较大。以基底先存断裂为中轴线, 模型2中轴线两侧发育的正断层以倾向与伸展方向一致的正向断层为主, 实验后期发育有少量与伸展方向相反的反向断层, 模型3中发育的断层则以反向断层为主。

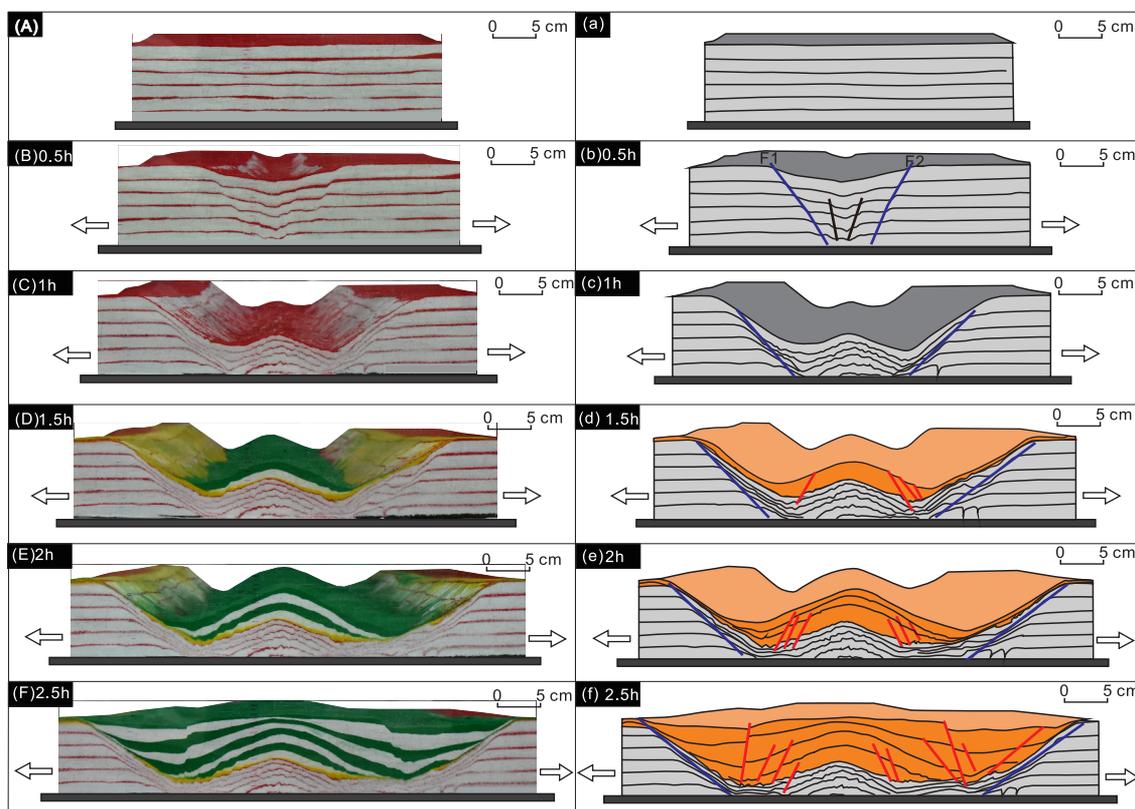


图7 模型3的运动演化过程 (A-F实验过程照片, a-f构造剖面解释图)

Fig. 7 The deformation process of model 3

表3 模型2与3实验结果对比

Table 3 photograph and interpretation of cross-section profile cut parallel to the shortening section from model 2 and model 3

| 构造特征 | 模型2 | 模型3 |
|----------------|---------------|-----------------|
| 断距 | 单一断层断距较大 | 单一断层断距较小 |
| 断层数量 | 断层数量较多,分布较密集 | 断层数量较少,分布较疏散 |
| 断层倾向 | 以向伸展方向倾斜的断层为主 | 以向伸展方向反向倾斜的断层为主 |
| 断层倾角 | | |
| 实验剖面与实际构造剖面对比图 | | |

注: 模型2和模型3中F1、F2的位置与图6和图7中的断层序号对应

在拉伸应力作用初期, 基底先存断裂处最先发育有一对共轭正断层 F1 和 F2, 根据实验拉张量与 F1 和 F2 倾角的变化折线图所示 (表 3), 实验 2 中最先出现的共轭断层随着拉张量的增大, 倾角值变化幅度较小, 断层倾角始终在 70° 左右的范围波动。在模型 3 中, 断层 F1 和 F2 的倾角初始值与模型 2 相近, 但随拉伸量增大 F1 和 F2 倾角明显较小, 在伸展作用下 F1, F2 断距不断增大形成滚动背斜, 由于 F1, F2 位于凹陷两侧, 断层倾角变缓使得凹陷宽度增加, 当拉张量增至约 150 mm 之后, 两侧倾角值保持在约 55°。

在伸展应力场中, 韧性基底作用下拉张量被上部地层发育的数量较多的断层断距分散, 而在无韧性基底作用的上部地层中, 地层薄弱带最先发育的共轭断裂带抵消了大部分拉伸位移, 后期凹陷内部产生的断裂数量较少, 断距较小。

在凹陷构造形态方面, 模型 2 呈复式地堑构造, 位于凹陷中央上部的同沉积层下降深度最大, 向两侧过渡深度逐渐变浅, 凹陷在侧向上呈 V 形。模型 3 底部无韧性基底, 模型被先存断裂分裂的刚性地层边界在拉分过程中形成共轭正断层, 上盘沉积物在拉分形成的凹陷内部堆积形成低凸起, 凹陷由两个铲式半地堑和中央低凸起组成, 在侧向上呈 W 形 (表 3)。

4.2 先存断层走向对凹陷演化和分布的控制作用

模型 1 中靠近拉伸端的地层最先接触到应力作用, 应力逐渐向盆地内部传播, 因此靠近两边拉伸端的拉伸量大于中部地区。与基底性质相同的区域相比, 存在岩性差异的地区出现更多复杂断裂呈复式地堑构造, 另一边的拉伸端在相同基底性质影响下则由边缘逐渐向内演化为地垒—地堑式构造, 左右两侧在相同的拉伸应力系统中显示出明显不同的构造形态 (图 5)。

实验结果显示, 在先存断裂处最先发育有 X 形共轭正断层组, 该区域演化形成复式地堑构造, 另一侧在伸展应力作用下则由边缘逐渐向内演化为地垒—地堑式构造。从模型顶部看地堑呈长条状, 其走向与底部先存断裂的走向一致, 地堑内部断裂走向与先存断裂平行。两个凹陷中部相对隆起, 隆起下部发育有共轭正断层组, 其方向与伸展应力方向相垂直, 模型 1 中设置的先存断层的走向和位置控制了后期断裂的发育及凹陷的

平面走向形态。

4.3 基底性质差异对断裂凹陷构造的影响

琼东南盆地断裂组合的形态不仅影响了盆地内的地貌形态, 还可能与盆地内部油气藏的储存与运移通道相关。盆地西部凹陷内只存在早期形成的断裂, 因该区域断层数量较少, 且上部地层构成凹陷的封闭作用, 地堑内部存在的油气藏能够在凹陷内部聚集成藏且不易散失; 盆地东部凹陷内部的断裂组合由于断裂期次多、断层组合复杂, 且断裂数量多, 原有油气容易从断裂形成的通道散失, 不利于油气藏的保存。

结合地球物理数据与实际地震剖面的对比, 琼东南盆地西部在断陷期晚期的热流值较低, 构造上发育有铲式复式半地堑, 盆地东部的长昌凹陷在断陷期晚期出现热流值偏高的情况, 构造上发育有复式地堑构造, 推测其断裂构造差异的形成原因可能是东部受到高热流值影响基底岩性为可发生伸展变形的韧性地层。

此外, 琼东南盆地的主控断层走向为 NE-NNE 向, 其中 1、2、5、6 和 8 号断裂为主要的控凹断层, 构成了盆地内“三凹两隆”的构造格局 (龙根元等, 2016; 谢玉洪等, 2015)。模拟实验的结果表明控凹断裂对于裂陷盆地内凹陷走向及凹陷内部断层发育的影响。根据地震剖面显示, 琼东南盆地内的共轭 X 型断裂主要发育于凹陷带内 (何永垚等, 2012)。模型 1 的模拟结果显示, 由于断层最先发育在先存断裂带, 断裂能进一步形成凹陷, 认为早期断裂进一步演化对盆地后期凹陷的演化有影响作用 (刘平等, 2017)。

由于目前已掌握的琼东南盆地岩性资料, 对盆地深部基底性质了解较少。本文的研究主要根据目前掌握的该地区的地质资料及裂陷盆地相关地质构造的形成模式, 为研究盆地内凹陷演化过程及东、西部凹陷构造演化模式提供一定思路。

5 结论

通过对琼东南盆地先存断裂在伸展应力下演化模式的模拟实验, 对盆地构造演化和凹陷断裂组合形成原因进行了研究, 主要得到以下结论。

(1) 在裂陷盆地的演化过程中, 韧性基底影响下的上部刚性地层演化形成复式地堑构造, 地堑内部发育的断裂数量较多, 单一断层断距小;

在无韧性基底影响下的上部地层在拉伸过程中演化为由两个铲式半地堑和一个中央低凸起组成,地堑内断裂数量较少,单一断层断距大。

(2) 先存断裂的位置及断裂走向影响裂陷盆地内凹陷发育位置及盆地内平面展布方向。盆地内凹陷通常在靠近先存断裂的位置开始发育,先存断裂断裂即为凹陷边界的控凹断裂。在伸展作用下控凹断裂处首先发育复式共轭断层组并进一步演化形成地堑,无先存断裂影响的区块相对形成地垒构造。地堑的平面分布走向及内部发育的断裂走向与控凹断裂走向一致。

(3) 结合实验模拟结果和研究区的地震剖面分析认为,盆地东、西部凹陷发育不同类型的半地堑构造凹陷对油气藏的保存性能存在差异,东部凹陷由于断裂数量多,其中有许多小型断层零散分布,而西部凹陷的断裂数量较少,且断层多分布于半地堑边界,这或为油气藏的形成提供良好的圈闭条件,有利于凹陷内部的油气储存。

参考文献 (References):

何永垚,王英民,卿元华,等. 2012. 琼东南盆地X型共轭正断裂及其油气勘探意义[J]. 新疆石油地质, 33(5): 528-530.

雷超,任建业,李绪深,等. 2011. 琼东南盆地深水区结构构造特征与油气勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 38(5): 560-569.

刘桂侠,杨永泰. 2003. 柴达木盆地北部基底岩性对上部地层构造演化及储集条件的影响[J]. 天然气工业, 23(2): 40-43.

刘平,李文龙,唐圣明,等. 2017. 北部湾盆地雷东凹陷主控断层发育特征及其形成机制[J]. 海洋地质前沿, 33(2): 48-55.

刘志峰,王升兰,印斌浩,等. 2013. 珠江口盆地珠I、珠III坳陷裂陷期湖相分布差异及其控制因素[J]. 石油实验地质, 35(5): 524-533.

李才,尤丽,朱继田,等. 2016. 琼东南盆地深水区中央凹陷断裂体系及其对油气成藏的控制[J]. 海相油气地质, 21(1): 73-78.

李培廉,朱平. 1992. 试论东海陆架盆地的基底构造演化和盆地形成机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 12(3): 38-43.

能源,吴景富,漆家福,等. 2011. 琼东南-珠江口盆地深水区构造样式及其分布特征[J]. 天然气工业, 31(8): 32-37.

彭辉界,庞雄奇,李洪博,等. 2016. 珠江口盆地珠一坳陷断裂控藏定量表征与有利勘探区预测[J]. 现代地质, 30(6): 1319-1328.

茹克. 1990. 裂陷盆地的半地堑分析[J]. 中国海上油气(地质), 4(6): 2-10.

苏明,李俊良,姜涛,等. 2009. 琼东南盆地中央峡谷的形态及成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 29(4): 85-93.

施小斌,于传海,陈梅,等. 2017. 南海北部陆缘热流变化特征及其影响因素[J]. 地学前缘, 24(3): 56-64.

童亨茂. 2010. “不协调伸展”作用下裂陷盆地断层的形成演化模式[J]. 地质通报, 29(11): 1607-1613.

童亨茂,孟令箭,蔡东升,等. 2009. 裂陷盆地断层的形成和演化——目标砂箱模拟实验与认识[J]. 地质学报, 83(6): 760-774.

巫建华,刘帅. 2008. 大地构造学概论与中国大地构造学纲要[M]. 北京:地质出版社.

吴培康. 1992. 琼东南盆地半地堑充填模型[J]. 中国海上油气(地质), 6(6): 1-8.

吴珍云,尹宏伟,汪新,等. 2014. 裂谷盆地盐构造形成演化及油气成藏地质意义[J]. 石油学报, 35(3): 877-889.

谢文彦,张一伟,孙珍,等. 2007. 琼东南盆地断裂构造与成因机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 27(1): 71-78.

解习农,任建业,王振峰,等. 2015. 南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系[J]. 地学前缘, 22(1): 77-87.

谢玉洪,童传新,范彩伟,等. 2015. 琼东南盆地断裂系统特征与演化[J]. 大地构造与成矿学, 39(5): 795-807.

龙根元,吴世敏,刘兵,等. 2016. 琼东南盆地南部坳陷带12号断层性质及成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 36(2): 93-99.

杨传胜,杨长清,张剑,等. 2017. 东海陆架盆地中生界构造样式及其动力学成因探讨[J]. 海洋通报, 36(4): 431-439.

杨香华,李安春. 2003. 东海大陆边缘基底性质与沉积盆地[J]. 中国海上油气(地质), 17(1): 26-28.

张成功. 2010. 南海北部陆坡深水区构造演化及其特征[J]. 石油学报, 31(4): 528-541.

周建勋,魏春光,朱战军. 2002. 基底收缩对挤压构造变形特征影响——来自砂箱实验的启示[J]. 地学前缘, 9(4): 377-382.

朱俊章,施和生,龙祖烈,等. 2015. 珠一坳陷半地堑成藏系统成藏模式与油气分布格局[J]. 中国石油勘探, 20(1): 24-37.

朱伟林,吴景富,张功成,等. 2015. 中国近海新生代盆地构造差异性演化及油气勘探方向[J]. 地学前缘, 22(1): 88-101.

周永胜,王绳祖. 1999. 裂陷盆地成因研究现状综述与讨论[J]. 地球物理学进展, 14(3): 29-47.

朱战军,周建勋. 2004. 雁列构造是走滑断层蹲在的充分判据——来自平面沙箱模拟实验的启示[J]. 大地构造与成矿学, 28(2): 142-148.

Bonini M. 2003. Detachment folding, flod amplification, and diapirism in thrust wedge experiments [J]. Tectonics, 22: 1065.

Bonini M. 2007. Deformation patterns and structural vergence in brittle-ductile thrust wedges: an additional analogue modelling perspective [J]. Journal of Structural Geology, 29(1): 141-158.

Buchanan P G and McClay K R. 1991. Sandbox experiments of inverted listric and planar fault systems [J]. Tectonophysics, 188: 97-115.

Davy Ph and Cobbold P R. 1991. Experiments on shortening of a 4-layer model of the continental lithosphere [J]. Tectonophysics, 188: 1-25.

Koyi H, Jenyon M K and Petersen K. 1993. The effect of basement faulting on diapirism [J]. Journal of Petroleum Geology, 16(3): 283-312.

Mandal N and Chattopadhyay A. 1995. Modes of reverse reactivation of domino-type normal faults: experimental and theoretical approach [J]. Journal of Structural Geology, 17(8): 1151-1163.

McClay K R and Scott A D. 1991. Experimental models of hangingwall deformation in ramp-flat listric extensional fault systems [J]. Tectonophysics, 188: 85-96.

McClay K R and White M J. 1995. Analogue modelling of orthogonal and oblique rifting [J]. Marine and Petroleum Geology, 12(2): 137-151.

Wang Z F, Shi X B, Yang J, et al. 2014. Analyses on the tectonic thermal evolution and influence factors in the deep-water Qiongdongnan Basin [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 33(12): 107-117.