

文章编号:1009-2722(2015)08-0047-06

# 琼东南盆地西南部反转构造发育机制物理模拟

徐子英<sup>1,2</sup>, 孙 珍<sup>2</sup>

(1 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广州 510075;

2 中国科学院边缘海地质重点实验室, 南海海洋研究所, 广州 510301)

**摘要:**为了揭示琼东南盆地西南部反转构造的发育机制,利用物理模拟方法设计了一组实验,基于模拟结果讨论了在软弱地质体与构造应力共同控制下琼东南盆地反转构造的发育特征。实验结果表明,软弱地质体的存在对琼东南盆地西南部的反转构造的发育起着重要控制作用,有软弱体的区域首先发育裂隙和褶皱隆起。由于NW向红河断裂的不断走滑,导致该盆地西北部受压,使得反转褶皱自NW向SE发育。模拟结果与实际构造对比表明,琼东南盆地西南部反转构造发育主要受软弱地质体及NW向红河断裂走滑导致盆地西北受挤压有关,推测该挤压应力来源与印支地块的旋转挤出作用有关。

**关键词:**琼东南盆地;反转构造;物理模拟;软弱地质体

中图分类号:P736.1 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2015.08007

琼东南盆地位于南海西北陆缘,为一走向近N60°E的新生代陆缘拉张盆地。该盆地主要发育了NE—NEE向、NW向和近EW向3组断裂体系,其中NE向断裂占主导地位,控制了盆地的走向和大部分凹陷的发育(图1)。琼东南盆地在始新世晚期(46 Ma)开始发育,受南海扩张和印支地块挤出的影响,盆地东西部的构造发育存在差异,盆地东部在NE向先存断裂和SE—SSE向伸展应力作用的影响下,发育NE和NEE向断裂;盆地西部受莺歌海盆地1号断裂剪切作用的影响,EW向断裂较为发育;NW走向的断裂带与应力方向近平行表现出走滑性质,对沉积控制不强<sup>[1,2]</sup>。

收稿日期:2015-06-03

基金项目:国土资源部海底矿产资源重点实验室开放基金(KLMMR-2013-A-10);中国科学院边缘海地质重点实验室基金(MSGL12-08);中国地质调查局项目(GZH201400202;1212010611302;1212011220116)

作者简介:徐子英(1981—),女,工程师,主要从事地质构造分析和区域地质调查研究工作。E-mail:ziyingx06@sesio.ac.cn

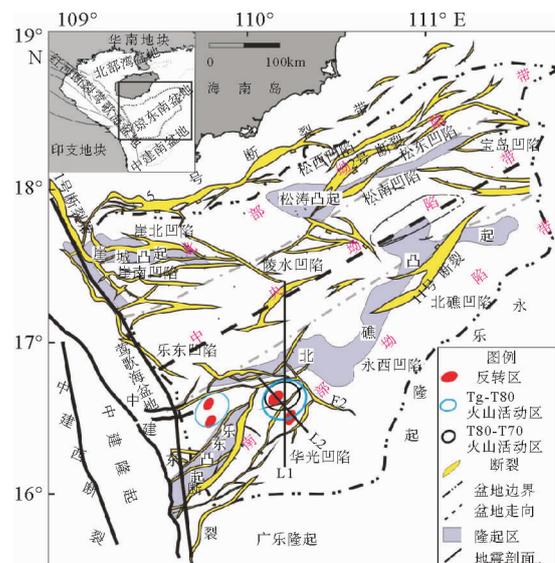


图 1 琼东南盆地断裂系和构造区划及反转构造区域分布

Fig. 1 Distribution map of main faults and reversed structures in Qiongdongnan Basin

琼东南盆地在整体伸展的背景下,局部发育有反转构造。谢文彦等<sup>[3]</sup>认为琼东南盆地构造反转时间主要在 T70—T60(30~21 Ma),反转强度自西向东减弱,时间由北向南变晚。孙珍等<sup>[2]</sup>认为琼东南盆地构造反转主要发育在盆地西南部,靠近中建隆起和一号断裂(图 1),褶皱个体较小,且多为单褶皱,长轴走向 NE,反转构造表现出样式独特的断背斜、中央凸、顶部发育花状断裂系统的鼓状背斜等样式。前人主要通过地质分析的方法定性研究了琼东南盆地反转构造的分布、时间、隆起特点,对反转构造类型进行了几何描述,但对反转构造发育机制的影响因素并未展开过系统研究。事实上,琼东南盆地西南部的反转构造分布区域比较特殊,除了少数褶皱沿断裂发生继承性反转变形外,大部分反转隆起发育在凹陷中央,远离红河断裂带,与下伏和两侧断裂系统的相关性比较差,反转隆起分布范围与张裂早期岩浆活动范围比较一致(图 1),该区早期 Tg—T70(46~30 Ma)是裂陷中心,岩浆活动比较活跃。剖面反映了该区裂陷期沉降量比其周边大,地震剖面也表明岩浆活跃的区域发育有明显的褶皱隆起,且大部分隆起幅度低,隆起褶皱没有明显的伴生逆冲断裂。与该时期反转相伴的是整个区域上发育一组 NW 向张扭断裂,推测这一构造反转应力独立于琼东南盆地伸展过程,可能与 42~21 Ma 期间印支地块 SSE 向的旋转挤出走滑造成的压扭作用有关<sup>[1,2]</sup>。

基于上述分析,推测琼东南盆地的反转构造可能受斜向构造应力和岩浆体的影响。为了论证该推测,前期已对影响反转构造发育的构造应力和软弱体(本文将火山活动较多、易变形的区块视为软弱地质体,简称软弱体)2个地质因素进行了物理模拟实验。实验首先针对单个影响因素进行模拟,然后2个影响因素叠加进行模拟,结果表明,无论伸展应力场还是挤压应力场下反转变形都更容易在软弱区集中,反转褶皱个体发育的规模与软弱体初始面积大小有关,软弱体所处构造位置及其所受应力性质对反转构造发育起着重要的控制作用<sup>[4,5]</sup>。在此认识基础上,针对琼东南盆地西南部反转构造这一地质实例,本文设计了一组物理模拟实验,探讨琼东南盆地西南部反转构造在软弱体和构造应力的共同控制下,其构造反转的发育特征。对琼东南盆地内的反转构造进

行深入分析,有利于推动该盆地油气勘探,同时可为盆地的构造演化研究提供理论依据。

## 1 实验设置

### 1.1 实验装置

模拟实验是在中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室构造物理模拟实验室完成的。本实验装置(图 2a、2b)可根据实验需要模拟

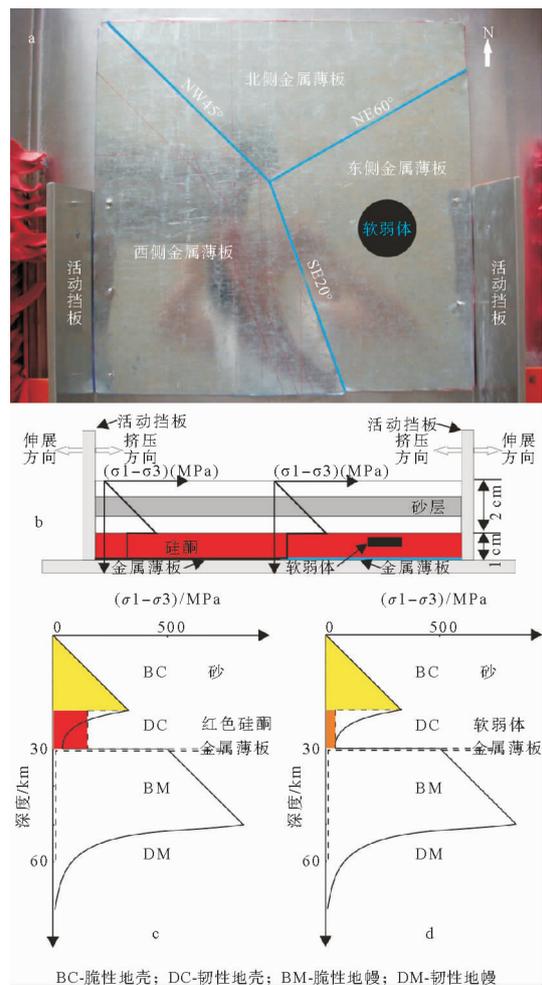


图 2 实验装置示意图(a)和剖面图(b)及正常岩石圈(c)和软弱体(d)的理论(黑实线)与实验中(虚线)的初始流变结构剖面(理论曲线据文献[6])

Fig. 2 a. Experimental system; b. Cross-section of the system; c. initial lithosphere; d. weak body strength profile of normal in theory (solid line) and experiment (dash line) (the theoretical curve from reference [6])

不同方向的伸展构造、挤压构造及剪切构造等构造样式,挡板两侧可多方向自由活动,其余两侧为自由边界,金属薄板为应力传递介质,厚度约 0.5 mm。模型初始面积约为 40 cm×40 cm,厚为 3 cm,两侧挡板都活动。

## 1.2 模型设置与实验材料及比例

根据琼东南盆地的走向,将主控琼东南盆地的初始断裂设为 NE60°,莺歌海盆地与琼东南盆地相接的北西向初始断裂简化为南北两段,北段走向约为 NW45°,南段走向约为 SE20°(图 2a)。由于琼东南盆地的伸展应力场由早期的 SE 向逐渐变为后期的 SSE 向,又因为琼东南盆地与北部湾盆地裂隙作用都处于南海陆缘张裂这同一伸展应力场中<sup>[1-2,7]</sup>,故根据北部湾盆地 3 期伸展应力场的确定<sup>[8]</sup>,将琼东南盆地伸展按 3 期加载;分别是第 1 期为 SE 向(SE45°)伸展,第 2 期和第 3 期分别为 SE30°和 SE20°方向伸展。NW 向断裂的走滑作用分 2 期,早期沿 SE20°方向顺时针旋转走滑,旋转角度大约为 15°左右;后期单纯为向 SE(SE45°)的走滑<sup>[2,3]</sup>。根据南海的扩张速率<sup>[9]</sup>和 Davy 等<sup>[10]</sup>所得的相似比,即模型长度只有地质体的 10<sup>-6</sup>,实验所用时间是地质时间的 10<sup>-11</sup>,实验速率设为 5 cm/h。红河断裂的左行走滑位移有 200~700 km 不等<sup>[11,12]</sup>,如果左行走滑时间为 42~15 Ma,那么红河断裂的平均走滑速率在 0.8~3.5 cm/a 左右范围,实验室中按比例可设置为 8~35 cm/h。因为红河断裂左行走滑晚于

琼东南盆地的伸展裂隙作用,早期(晚始新世)左旋走滑速率小于琼东南盆地的伸展速率,晚期(早渐新世以后)走滑速率大于琼东南盆地伸展速率<sup>[1,2]</sup>,本文将早期速率设为 2 cm/h,晚期速率设为 10 cm/h。

构造物理模拟实验中,松散干燥的石英砂、硅酮、丙醇、橡皮及金属薄板等常被用来当做模拟实验的理想材料,如 Montanari 等<sup>[13]</sup>用干燥石英砂模拟脆性上地壳,用低黏度的油酸和硅酮的混合物模拟花岗岩体;Keep<sup>[14]</sup>用干燥的石英砂来模拟脆性上地壳和上地幔,用硅酮模拟韧性下地壳和下地幔;Cruden 等<sup>[15]</sup>用具有牛顿流体特征的丙醇模拟岩浆体,Corti 等<sup>[16]</sup>用比下地壳黏度和密度大的硅酮模拟上地幔,用夹于硅酮层间的丙醇流体模拟岩浆体;Brun<sup>[6]</sup>和 Callot<sup>[17]</sup>用低于围区 1~2 个数量级的低黏度硅酮体模拟地质软弱体;孙珍等<sup>[18]</sup>用干燥石英砂模拟上地壳和同构造沉积,用硅酮模拟韧性下地壳,用金属薄板模拟上地幔并作为应力传递介质。

实验采用脆-韧双层模型,松散干燥的石英砂模拟脆性上地壳和同构造沉积,砂的粒径为 200~300 μm,内摩擦角为 30°~32°;用红色硅酮模拟韧性下地壳,室温下(25 ℃)密度约 1 300 kg·m<sup>-3</sup>;用黏度低于围区 2 个数量级的丙醇和黑色颜料调制的混合物夹层来模拟岩浆活动相对丰富的地质软弱体,用金属薄板作为应力传递介质,各项实验材料具体参数见表 1。

表 1 实验材料与对应地质体参数

Table 1 Parameters of the experiment materials and the natural counterpart

模拟对象	实验材料	密度/kg·m <sup>-3</sup>	黏度/Pa·s	流变学特征
脆性上地壳和同构造沉积	松散石英砂	1 200		莫尔-库仑准则
韧性下地壳	砂+红色硅酮	1 300	10 <sup>4</sup> ~10 <sup>5</sup>	指数定律
软弱体	黑色染料+丙醇	1 260	10~100	牛顿流变定律

实验中假设反转构造是在正常厚度岩石圈(图 2c)上发育,故脆性层和韧性层厚度比设为 2:1<sup>[9]</sup>,模型中硅酮厚 1 cm,砂层厚 2 cm,模型总厚度为 3 cm,软弱体夹在硅酮中间铺设(图 2b、2d),模型厚度与地质体的比例为 1:10<sup>6</sup>。模型中模拟上地壳的砂体范围大于模拟下地壳的硅

酮,以防止下地壳流动。实验每隔 1 cm 或 0.5 cm 拍照 1 次,实验完成后,用水喷湿模型并切剖面进行观察,由于实验条件有限,实验变形过程中只能观察到平面变形过程,而剖面反映的只是变形的最终结果,每个实验均进行了 2 次以上的重复实验并得到相似结果。模拟实验无法考虑到热

效应,实验结果反映的只是构造变形的结果。

## 2 实验结果与讨论

在实验过程中,北侧板固定,东侧板伸展速率一直为 5 cm/h,西侧板早期左旋走滑速率为 2 cm/h,晚期左旋走滑速率为 10 cm/h。

实验第 1 阶段,北侧板固定,西侧板静止,东侧板以 5 cm/h 的速率沿 SE45°先伸展 1 cm。平面上,在先存 NE60°软弱带附近首先发育 2 条 NEE 向断裂,即中央凹陷带开始发育,几乎同时位于南部凹陷的软弱区也发育 NE 向断裂(图 3a)。随后东侧板伸展方向改为 SE30°,继续伸展 1 cm,中央凹陷带和软弱区发育的断裂在原先基础上继承性发育,而且中央凹陷带上发育的 NE 向断裂不断向西延伸,并向南弯转,在 SE20°软弱带附近也发育一系列 NE—NNE 走向的张剪断裂(图 3b)。

实验第 2 阶段,东、西侧两板同时运动,东侧板伸展方向改为 SE20°,伸展速率不变。西侧板沿 SE20°方向边走边滑边顺时针旋转 15°,早期走滑速率为 2 cm/h,此时期北部凹陷开始发育,NW 向断裂发育,但北部凹陷发育没有中央凹陷发育快(图 3c),伸展到 2 cm 后,走滑速率增大为 10 cm/h,随着北西向断裂走滑位移的增加,北部凹陷带开始迅速发育,北部断裂比中央凹陷断裂发育快,NW 向断裂发育,并切割 NE—NEE 向断裂,在中央凹陷与北部凹陷交界部位发育近 EW 向断裂。南部凹陷随着东侧板沿 SE20°伸展,软弱区也发育 NWW 向断裂(图 3d)。

实验第 3 阶段,东侧板还是按原来方向伸展,西侧板后期走滑方向改为 SE 向(SE45°),代表 NW 向走滑断裂对琼东南盆地的斜向挤压作用,随着走滑不断进行,软弱区首先发育隆起褶皱,随后沿 NNW 向走滑断裂带也发育部分小隆起,隆起发育时间西早东晚,隆起幅度自西向东减弱(图 3e)。

实验结果显示:①琼东南盆地反转构造主要沿 NW 向走滑断裂带分布,反转规模较少,反转强度较弱。构造反转应力主要来源于盆地西北部,与印支地块的旋转走滑有关;②软弱地质体的存在对反转构造发育具有重要影响,当 NW 向断

裂旋转走滑挤压时,反转构造较易在有软弱体的地方发育;③琼东南盆地早期主要发育控盆的 NE 向断裂,随着伸展应力方向角度不断向 SSE 向增大,近东西向断裂出现,后期随着 NW 向断裂的走滑作用,盆地西北侧有 NW 向断裂发育并切割原先 NE 向断裂。剖面上伸展期形成的正断层在后期反转挤压时,倾角和断距变化不大,反转期的缩短量主要是通过地层弯曲和形成缓倾角的逆断层得以平衡。

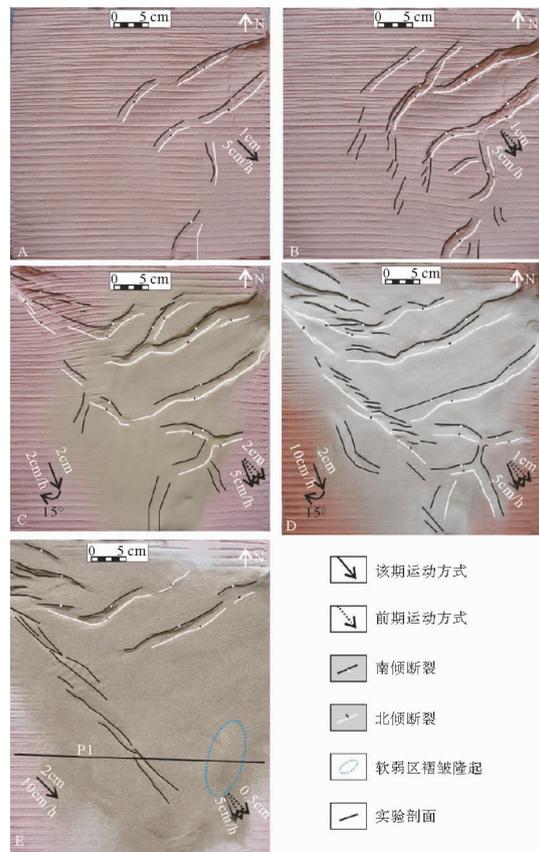
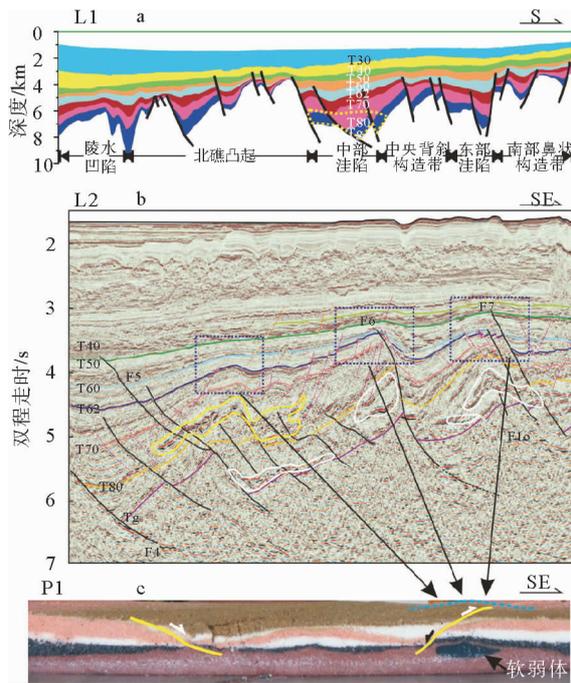


图 3 模拟实验过程变形图

Fig. 3 The deformation of modeling experiment

对比琼东南盆地西南部反转构造特征与实验模拟结果发现有很好的相似性。琼东南盆地在早期伸展过程中,由于南部凹陷软弱区的存在,南部凹陷与中央凹陷的断裂带几乎同时发育,且南部凹陷软弱区的沉降量大于无软弱区沉降量(图 4a)。后期受 NW 向断裂走滑导致对该盆地斜向挤压的影响,使得南部凹陷软弱区首先发育褶皱隆起,但隆起幅度小(图 4c),地震剖面也显示岩

浆活跃的区域发育有褶皱隆起,但隆起幅度低,隆起褶皱没有明显的伴生逆冲断裂(图 4b);随着 NW 向断裂走滑位移量的增加,沿 NW 向断裂也发育部分隆起,但隆起幅度更小。总体上,随着构造应力由 NW 向 SE 挤压传递,反转隆起强度由 NW 向 SE 传递,从而导致反转构造西北发育早、东南发育晚的特点。通过上述琼东南盆地反转构造特征和模拟实验结果对比分析,认为琼东南盆地西南部深水区的反转构造发育主要受 NW 向红河断裂带走滑作用控制,以及斜向挤压应力和南部凹陷软弱体的共同影响,推测挤压应力可能与印支地块的旋转挤出作用有关。



黄色实线圈为早渐新世岩浆体,白色实线圈为始新统岩浆体,深蓝色线框为反转隆起区

图 4 琼东南西南部沉降量剖面 L1(a);火山活动与反转隆起关系对应剖面 L2(b);实验剖面(c)

Fig. 4 a The subsidence profile of the southwestern Qiongdongnan Basin; b The corresponding profile of volcanic activity with reversed uplift; c Comparison with experiment profile

### 3 结论

通过对比分析琼东南盆地反转构造特征和实

验模拟结果,结论如下。

(1)琼东南盆地反转构造主要沿 NW 向张扭断裂发育,在有软弱体的区域较易发育反转构造,反转规模较小,反转强度自西向东减弱,时间自北向南由早变晚。

(2)琼东南盆地西南部深水区的反转构造主要受 NW 向红河断裂带走滑作用以及相关的斜向挤压应力和南部凹陷软弱体的共同影响,推测挤压应力可能与印支地块的旋转挤出作用有关。

(3)琼东南盆地早期主要发育控盆的 NE 向断裂,随着伸展应力方向角度不断向 SSE 向增大,近东西向断裂出现,后期随着 NW 向断裂的走滑作用,盆地西北侧有 NW 向断裂发育并切割原先 NE 向断裂。剖面上伸展期形成的正断层在后期反转挤压时,倾角和断距变化不大,反转期的缩短量主要是通过地层弯曲和形成缓倾角的逆断层得以平衡。

致谢:感谢广州海洋地质调查局陈泓君教授和高红芳教授对论文提出的宝贵修改意见!

#### 参考文献:

- [1] 谢文彦,张一伟,孙 珍. 琼东南盆地新生代发育机制的模拟研究[J]. 地学前缘,2008,15(2): 232-241.
- [2] 孙 珍,孙龙涛,张云帆,等. 华光凹陷构造演化及其对油气成藏的影响[R]. 广州:中科院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室,2007:44-78.
- [3] 谢文彦,孙 珍,张一伟,等. 南海北部陆缘盆地新生代反转构造动力学与成藏分析[J]. 地球科学,2007,32(增刊): 32-40.
- [4] 徐子英,孙 珍,周 蒂,等. 软弱地质体对反转构造变形制约作用的物理模拟及其应用[J]. 热带海洋学报,2012,31(3):144-154.
- [5] 徐子英,孙 珍,周 蒂,等. 软弱地质体对挤压构造变形影响的物理模拟及其应用[J]. 地球科学,2011,36(5):921-930.
- [6] Brun J P. Narrow rifts versus wide rifts: inferences for the mechanics of rifting from laboratory experiments[J]. Philosophical transactions of the royal society A,1999,357:695-712.
- [7] 孙 珍,钟志洪,周 蒂,等. 南海的发育机制研究:相似模拟证据[J]. 中国科学(D辑),2006,36(9): 797-810.
- [8] 朱伟林,江文荣. 北部湾盆地涠西南凹陷断裂与油气成藏[J]. 石油学报,1998,19(3): 6-11.
- [9] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading in the South

- China sea : Implications for the Tertiary tectonics of South-east Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98 (B4): 6 299-6 328.
- [10] Davy P, Cobbold P R. Experiment on shortening of a 4-layer model of the continental lithosphere [J]. *Tectonophysics*, 1991, 188: 1-25.
- [11] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan-Red River metamorphic belt : Tertiary left lateral shear between Indochina and South China [J]. *Nature*, 1990, 243: 431-437.
- [12] Sun Z, Zhou D, Zhong Z H, et al. Experimental evidence for the dynamics of the formation of the Yinggehai basin, NW South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2003, 372 (122): 41-58.
- [13] Montanari D, Corti G, Sani F, et al. Experiment investigation on granite emplacement during shortening [J]. *Tectonophysics*, 2010, 484(1-4): 147-155.
- [14] Keep M. Physical modelling of deformation in the Tasman organic zone [J]. *Tectonophysics*, 2003, 375 (1-4): 37-47.
- [15] Cruden A R, Koyi H, Schmeling H. Diapiric basal entrainment of mafic into felsic magma [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 131: 321-340.
- [16] Corti G, Bonini M, Sokoutis D, et al. Continental rift architecture and patterns of magma migration: A dynamic analysis based on centrifuge models [J]. *Tectonics*, 2004, 23 (10): 1-20.
- [17] Clallot J P, Grigne C, Geoffroy L, et al. Development of volcanic passive margins: Two-dimensional laboratory models [J]. *Tectonics*, 2001, 20(1): 148-149.
- [18] 孙 珍, 钟志洪, 周 蒂. 莺歌海盆地构造演化与强烈沉降机制的分析和模拟 [J]. *地球科学*, 2007, 32(3): 347-356.

## ANALOGUE MODELING OF REVERSED STRUCTURAL DEFORMATION IN THE SOUTHWESTERN QIONGDONGNAN BASIN

XU Ziyi<sup>1,2</sup>, SUN Zhen<sup>2</sup>

(1 MLR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China;

2 CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China)

**Abstract:** In order to investigate the mechanism of reversed structure deformation in the southwestern Qiongdongnan Basin, we carried out an analogue modeling experiment. The influence of weak body and tectonic stress on reversed structure deformation in the Qiongdongnan Basin is discussed upon the basis of the modeling results. The modeling results suggest that the weak body plays an important role in the deformation of reversed structures no matter it is in the extension stage or compression stage, which marks the time when the reversed structural deformation first appears and propagates in weak zone. As the Red River fault in NW-direction slips, the northwestern Qiongdongnan Basin was compressed which led to reversed folding from northwest to southeast. Based on comparison of modeling results with the actual structures, it is concluded that the deformation of the reversed structure in southwestern Qiongdongnan Basin is mainly influenced by the existence of the weak body and the northwestern Qiongdongnan Basin was compressed because of the slipping of NW Red River fault and the compressional tectonic stress which may come from the revolving of the Indochina block.

**Key words:** Qiongdongnan Basin; reversed structures; analogue modeling; weak body