

南海岩石圈破裂方式与扩张过程的三维物理模拟

孙 珍¹, 孙龙涛¹, 周 蒂¹, 蔡东升², 李绪深², 钟志洪³, 姜建群⁴, 樊 浩⁴

1. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 南海海洋研究所, 广东广州 510301

2. 中国海洋石油有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

3. 中国海洋石油有限公司深圳分公司技术部, 广东广州 510240

4. 辽河油田海南油气分公司, 辽宁盘锦 124010

摘要: 南海的形成演化一直是国内外关注的热点之一. 为了揭示南海的构造演化过程, 分析对比了3组物理模拟实验. 实验结果表明, 断裂样式和裂谷带的走向与岩石圈的初始热流变结构密切相关. 对比模拟结果与陆缘的断层样式, 推测在张裂初期, 陆坡区比陆架区具有相对热减薄的岩石圈, 从而导致不同构造位置上发育不同的裂陷特征. 受下地壳和软流圈韧性流动的影响, 断层越是靠近扩张区, 倾角变得越平缓. 实验揭示, 破裂首先以点状出现, 这些点不断扩大并互相连接形成连续的扩张区. 共轭边缘常具有对称的形状, 向海盆方向对凹或者对凸. 当离散边界附近有刚性块体时, 扩张区域的边界会明显受到地块边缘形态的影响. 通过模拟实验, 推测破裂过程可能以较粘性的方式进行. 西北次海盆的发育可能是沿着中—西沙地块北缘深裂陷槽破裂的结果.

关键词: 南海; 破裂方式; 形成演化; 三维物理模拟.

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2009)03-0435-13

收稿日期: 2008-12-21

Discussion on the South China Sea Evolution and Lithospheric Breakup through 3D Analogue Modeling

SUN Zhen¹, SUN Long-tao¹, ZHOU Di¹, CAI Dong-sheng², LI Xu-shen²,
ZHONG Zhi-hong³, JIANG Jian-qun⁴, FAN Hao⁴

1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China

2. Zhanjiang Branch of CNOOC, Zhanjiang 524057, China

3. Dept. of Science and Technology, Shenzhen Branch of CNOOC, Guangzhou 510240, China

4. Hainan Oil & Gas Exploration Company, Liaohe Oilfield, PetroChina, Panjin 124010, China

Abstract: The evolution of the South China Sea is one of the worldwide hot research spots. In order to investigate its evolution progress of tectonics, we compared three sets of analogue modeling experiments. Modeling experiments suggest that the fault patterns and orientation change of the rift zone were strongly related to the thermal situation and rheological stratification of the lithosphere. Comparing the modeling results with the fault patterns on the conjugate continental margin, we conjectured that the slope area might have born relatively hotter and thinner lithosphere than shelf area from the beginning of rifting. Due to the stretching and mantle upwelling associated with the regional extension, the initial rheological stratification was changed and therefore the rifting pattern from shelf to slope. Affected by the ductile flow of lower crust and asthenosphere, the faults became flattened, especially close to the breakup area. In the experiments, breakup developed first at isolated points, which grew and coalesced to become a single spreading area. The conjugate boundaries were either all concave or all convex. When there was a rigid massif located at the divergent boundary, the northern and southern areas of the massif thinned rapidly and developed into two deep troughs, which may finally evolve into spreading centers. The shape of the massif controls the orientation

基金项目: 国家重点基础研究 973 计划项目 (Nos. 2009CB219401, 2007CB41170405); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (No. KZCX3-SW-234-1); 国家自然科学基金项目 (Nos. 40406012, 40876026, 40576027); 中国科学院南海海洋研究所知识创新工程领域前沿项目 (No. LYQY200704); 中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放课题资助项目.

作者简介: 孙珍 (1971-), 女, 副研究员, 主要从事构造分析与模拟研究. E-mail: ltsun@scsio.ac.cn

and boundary shape of the spreading area. It's supposed that the crustal breakup may go in more viscous style, and the NW sub sea basin may develop along the northern trough of the Zhongsha-Xisha massif.

Key words: South China sea; breakup pattern; tectonic evolution; 3D analogue modeling.

南海是东南亚陆缘最大的边缘海之一,也是中国大陆边缘唯一发育了洋壳的海盆.它位于欧亚板块、太平洋板块和印度—澳大利亚板块的交汇处,其新生代形成演化过程的研究对认识东南亚的构造变动和气候变迁都具有重要意义(图 1).

通过对南海洋壳磁异常条带的解析, Taylor and Hayes(1983)首先确定了东部次海盆的扩张时代为早渐新世—早中新世,并提出西南次海盆的扩张时代可能为早中新世。Briais *et al.* (1993)通过更加细致的磁条带对比和海底扫描数据的分析,提出

南海的扩张至少包括一次洋脊跃迁,认为从磁条带 11~7(根据 Gradstein *et al.* (2004) 的定年标准,为 30~25.5 Ma 左右),扩张发生在西北和东部次海盆,西北次海盆扩张作用持续至 28.5 Ma 即停止了,之后 28.5~25.5 Ma 期间扩张只在东部次海盆继续。扩张方向从大约 28.5 Ma 以前的 NW-SE 向变为 28.5~25.5 Ma 期间的近 NS 向,之后扩张脊南迁,并从 6b(大致相当于 23 Ma)磁条带处继续扩张,最初扩张发生在盆地东部,之后迅速向西传播至西南次海盆。Briais *et al.* (1993) 认为扩张基本上同

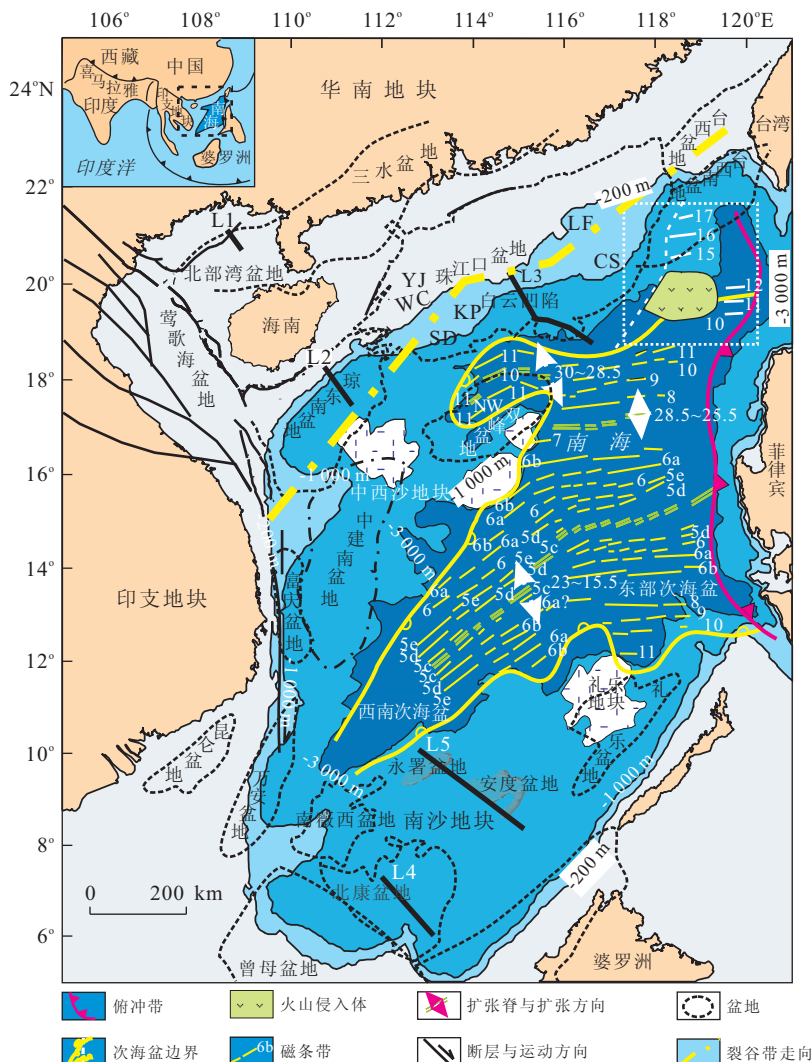


图 1 南海及邻区主要地质构造图

Fig. 1 Tectonics of the South China sea and neighbor areas

磁条带解释参考 Briais *et al.* (1993)(黄色和绿色)及 Hsu *et al.* (2004)(南海东北的白色线条带); NW. 西北次海盆; SW. 西南次海盆; YJ. 阳江凹陷; WC. 文昌凹陷; KP. 开平凹陷; SD. 顺德凹陷; LF. 陆丰凹陷; CS. 潮汕凹陷

时停止在 5c 磁条带处,即大约 16 Ma(Gradstein *et al.*, 2004)前后。

台湾学者许树坤(Hsu *et al.*, 2004)根据在南海东北部新获得的水深和磁测数据,提出南海东北部保存有最老的新生代洋壳(见图 1 中白色虚线框内),最老磁条带年龄为 37 Ma 左右。

考虑到这些海盆扩张的数据,仍有许多疑问,他们的解释是否正确?南海以怎样的方式发生破裂?哪些因素控制了南海的演化过程?南海西北次海盆为何扩张了很短的时间即停止了等。孙珍等(2006)在准三维物理模拟的基础上对南海的形成演化进行了分析和探讨,并提出南海的张裂和扩张是一个与印藏碰撞相互独立的地质过程。由于模拟实验中未设置软流圈,因此实验中观察不到破裂过程。为了探讨南海的扩张过程,笔者在地质分析的基础上,开展了一系列包括软流圈的三维模拟实验,后面将作详细分析和探讨。

1 南海的地质特征

1.1 南海北部陆缘

在扩张开始前,南海的南北陆缘经历了 3 期主要的张裂(Ru, 1988; Zhou *et al.*, 1995)。磁测数据显示,华南地块在新生代相对于欧亚大陆未发生明显的位移(Yang and Besse, 1993)。北部湾盆地张裂作用最早,大致开始于 65 Ma,珠江口盆地张裂起始于晚古新世—早始新世(李平鲁, 1994; 秦国权, 2000; 陈长民等, 2003)。琼东南盆地张裂作用推测开始于早始新世(Zhang and Hao, 1997)。因此,北部陆缘的张裂作用表现出自北向南、自东向西的传递。根据磁异常分析,扩张过程也表现出北早南晚、东早西晚的特征。孙珍等(2006)提出,南海在晚白垩至晚渐新世期间(65~25.5 Ma)经历了 SE—近 NS 向的顺时针旋转式伸展,早中新世—中中新世(24~16 Ma)又经历一期 SE 向的伸展。琼东南盆地内 30~23 Ma 期间 EW 向断裂的发育,以及沿着 EW 和 NW 向断裂的沉降速率的增加(钟志洪, 2000; 谢文彦等, 2007),这些都说明区域应力场的变化。西南次海盆是个向西南变窄的洋盆,两洋陆过渡边缘(COBS)的夹角为 35°,笔者推测南海伸展过程中曾发生了 35°的顺时针旋转。

珠江口盆地的南部,尤其是靠近洋陆边界的白云凹陷,断层小而多,向沉积中心对倾。大多数断裂

延伸长度在 20 km 左右,垂向断距只有数百米(500 m 或更少,个别达 1 000 m),断层的倾角约 45°~60°(Huang *et al.*, 2005),比北部盆地的倾角缓。这里的拗陷由较对称的地堑组成,几个小地堑通过组合形成复式地堑,之间以低隆起过渡(孙珍等, 2005)(图 2, L3)。位于陆架和洋陆边界之间的区域,张裂单元表现为边界控制断裂规模较大,内部断裂规模小,张裂结构为单地堑,或者由半地堑和不对称地堑组合成的复式地堑(图 2, L2)。根据拉张因子计算,张云帆等(2007)提出了白云凹陷在拉张前就具有了一个热减薄地壳。因此,笔者推测这些结构特征可能代表了被动陆缘不同构造位置上的张裂样式,张裂样式的特点受到其发育位置上差异的初始热流变结构的控制。陆架区可能在正常流变结构的岩石圈基础上发育,而陆坡区则可能发育在已减薄的岩石圈上。在后面的实验中,还将探讨初始流变结构对张裂结构的影响。

1.2 南海海盆

南海的洋壳区(海盆)呈向西南收敛的菱形形态,大致沿东经 115°E,海盆可分为西北、东部和西南 3 个次海盆(图 1)。洋陆边界呈不规则的形态,中西沙和礼乐地块向海盆凸出。钻井数据表明,中—西沙地块具有前寒武变质基底,上覆有 1 000 m 以上的新近系碳酸盐(吕炳全等, 2002)。礼乐地块推测具有相同的基底(南海海洋研究所, 2000)。这些地块在新生代基本上未发生明显的张裂变形,作为刚性地块保存下来。西南次海盆共轭的洋陆边缘表现出较好的对称特点,但西北和东部次海盆对称特点不明显。南部扩张脊沿走向可分为 3 段,自西向东走向为 NE 向、近 EW 向和 NNE 向。西北次海盆内的扩张脊沿着西沙地块呈弧形展布,推测西北次海盆的发育受到了西沙地块的影响。

1.3 南部陆缘

南海南部陆缘的南沙地块在新生代也经历了较强烈的伸展(Clift *et al.*, 2002)(图 2, L4 和 L5)。发育有一系列 NE 走向的盆地(姚伯初等, 2004),如南薇、礼乐和安渡盆地等(图 1)。南沙地块上的断裂多数北倾,且大多数活动至中—晚中新世。在南沙和婆罗洲之间发育有南沙海槽,海槽南侧有向 NW 方向推覆的逆冲带,推测是古南海向婆罗洲俯冲造成的(Hazebroek and Tan, 1993)。俯冲的证据还有婆罗洲东北部发育的晚白垩世—中中新世的拉姜群和克罗克群复理石带(Hutchison, 1996)。

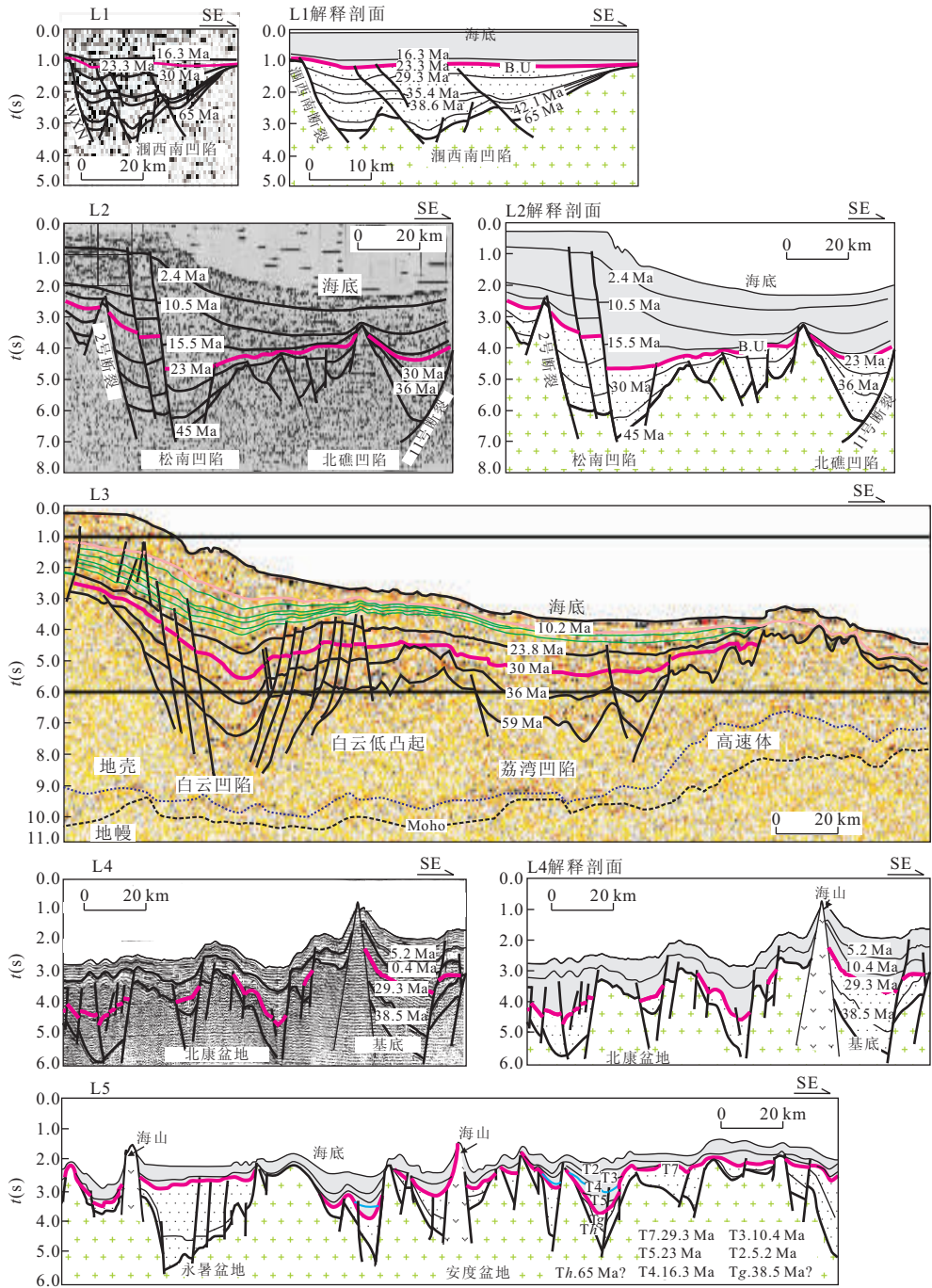


图 2 南海南北陆缘 5 条解释剖面

Fig. 2 Five interpreted profiles on the northern and southern margins of South China sea

L1 据康西栋等(1994);L3 据 Huang *et al.* (2005);L4 和 L5 据南海海洋研究所(2000);L1. 解释剖面比 L1 剖面水平放大了两倍,其他的解释剖面与地震剖面基本上具相同的水平比例尺;剖面的位置见图 1

2 物理模拟实验

这里将介绍 3 个模拟实验,其中正常厚度以及减薄的均一模型用来探讨初始流变结构对变形样式的影响,进而讨论陆架和陆坡盆地的变形机制. 带有刚性地块的不均一模型是用来分析岩石圈流变结构

的横向不均一性(如中—西沙刚性地块等)对伸展和破裂过程的影响.

2.1 模型与相似材料

在自然界中,强度剖面常被用来反映岩石圈流变特征与脆韧层之间的耦合程度(Kirby, 1983; Carter and Tsenn, 1987; Ranalli and Murphy,

1987; Ranalli, 1995). 通常正常厚度的岩石圈具有较低的地温梯度,其流变结构可描述为漂浮于韧性软流圈之上的 4 层结构(图 3a)(Davy and Cobbold, 1991; Brun *et al.*, 1999). 伴随岩石圈的伸展和软流圈的抬升加热,地壳变薄,脆韧厚度比下降(图 3b). 老的稳定岩石圈(克拉通)只有两层结构,上部脆性层包括整个地壳和上地幔顶部,下层为韧性地幔(图 3c)(Brun *et al.*, 1999; Mart and Dauteuil, 2000). 与正常岩石圈相比,老岩石圈的下地壳强度较高.

模拟实验是在西澳大学的构造专题研究中心完成的. 变形箱为一个有机玻璃盒,内部尺寸是 80 cm×80 cm×10 cm(图 3d). 分层铺设的实验材料用于模拟岩石圈,在挤压构造模拟的三维模型中,Keep(2003)用干燥的石英砂来模拟脆性上地壳和上地幔,用硅酮模拟韧性的下地壳和下地幔. Pubellier and Cobbold(1996)和 Corti *et al.* (2001, 2003)用比下地壳的粘度和密度大的硅酮来模拟上地幔. 实验为拉张过程模拟,用无粘结力的石英砂模拟上地壳,砂的粒径为 200~300 μm,内摩擦角为 31°~40°. 模拟下地壳的硅酮的粘度为 10⁴ Pa·s,在室温下(28℃)密度约 1.2 g·cm⁻³. 模拟刚性地块下地壳的硅酮,其密度为 1.4 g·cm⁻³,粘度为 10⁵ Pa·s. 具有牛顿流体特征的糖浆用于模拟软流圈,其密度为 1.4 g·cm⁻³,粘度约 10² Pa·s. 实验材料的参数见表 1. 对于上地幔的材料,曾使用高粘

度高密度的硅酮,但破裂很难发生. 经过多种材料的试用后,选择不变形的轻塑料板来模拟上地幔,塑料板按照先存断裂的方式被剪开,这种设置方式类似于以前在准三维实验中使用的薄金属板(Tron and Brun, 1991; Sims *et al.*, 1999). 此外,本实验也需要有强度的板来作为应力传递的介质. 正常和减薄的模型中,脆韧材料的厚度比分别为 2 cm : 1 cm 和 0.5 cm : 1 cm(图 3a,3b). 南海周围的刚性地块具有老的地壳,但并不像克拉通那样老,用粘度大的红色硅酮贴在正常下地壳上来增加下地壳的强度,用于模拟刚性地块(图 3c,3d,3e).

2.2 模型设置与比例尺

地质学家们普遍认为,岩石圈的伸展过程为一个热动力学过程,它通常发生在已变形且结构上存在各向异性的岩石圈上. 因此,裂隙结构并不是随意发生的,通常会沿着古造山带、古缝合带分布,避开强度大的克拉通地区(Dunbar and Sawyer, 1988; Versfelt and Rosendahl, 1989). 流变结构的各向异性将导致应变的集中并控制裂谷的发育位置和结构样式,影响整个岩石圈的演化(Tommasi and Vauchez, 2001; Ziegler and Cloetingh, 2004). 由早期构造活动产生的先存软弱带常位于下地壳和上地幔中(Allemand and Brun, 1991; Corti *et al.*, 2003). 根据南海北部陆缘裂陷带以及南海扩张脊走向的变化(图 1 中的黄色虚线),模型中的先存软弱带可分为 X、Y 和 Z 三段,走向分别为 NE45°、

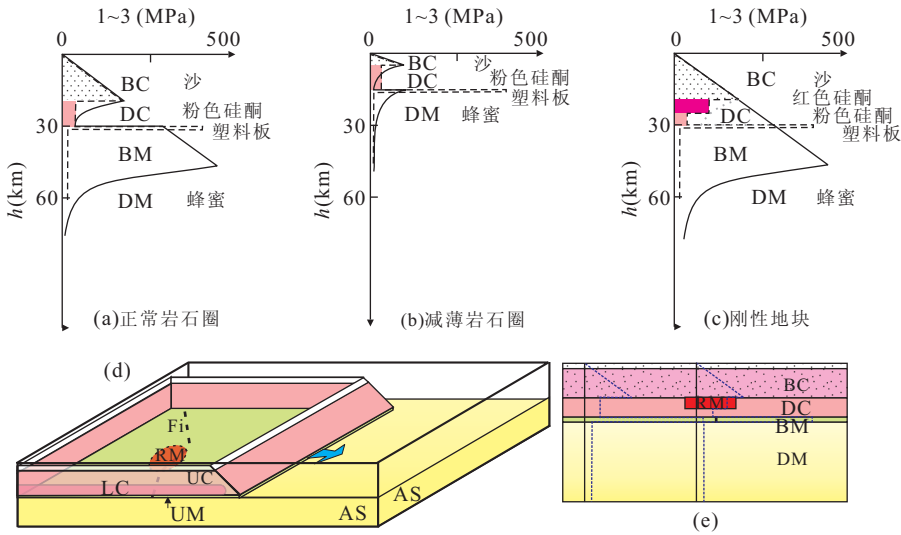


图 3 正常(a)和减薄(b)岩石圈及刚性地块(c)的理论(黑实线)与实验中(虚线)的初始流变结构剖面,初始模型设置 (d,e)
Fig. 3 Initial model setup, initial strength profiles of normal, thinned and rigid massif in nature (solid line) and experiment (dash line)

BC. 脆性地壳;DC. 韧性地壳;BM. 脆性地幔;DM. 韧性地幔;RM. 刚性地块;缩写字母的含义在以后的图片中相同

表 1 实验材料与对应地质体的参数特征

Table 1 Parameters of the analogue materials and the natural counterpart

实验材料与地质体分层	密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	流变学特征	内摩擦角($^{\circ}$)
沙	1 200		莫尔—库仑准则	$\mu=0.6$
上地壳	2 600~2 800			
沙+粉色硅酮	1 200	10^4	指数定律	
正常下地壳	2 800~2 900	$10^{20} \sim 10^{24}$		
蜂蜜	1 400	10^2	牛顿流变定律	
软流圈	3 200~3 300	10^{19}		
沙+红色硅酮	1 200	10^5	指数定律	
刚性地块的下地壳	2 800~2 900	$10^{20} \sim 10^{24}$		

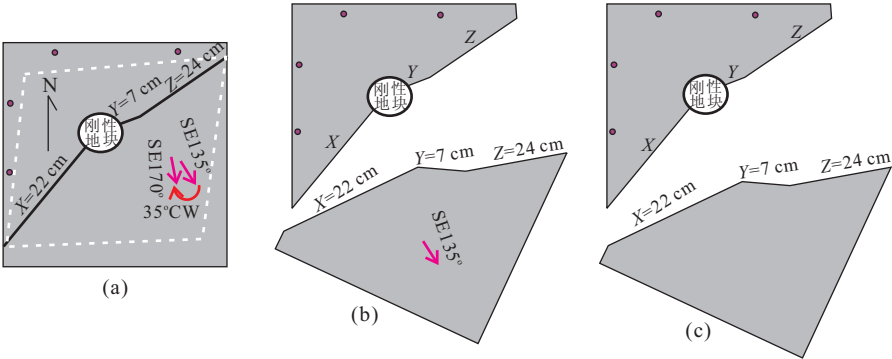


图 4 塑料底板在加载前(a)和两期加载作用后(b,c)的表面样式图

Fig. 4 Surface view of the plastic boards before (a) and after two stages of deformation (b, c)
在白色虚线范围内,底板上喷洒有滑石粉.箭头指示伸展方向,板片北部和西部的实心圆点为固定点

NE70°以及 NE55°(图 4)(孙珍等,2006). 为了减小小塑料板的边界效应,笔者在模型的中央部位喷洒了滑石粉,使硅酮的主体可以自由滑动.但塑料板的边缘保持干净以使硅酮黏附,从而使塑料板发挥应力载体的作用.根据华南在新生代未发生明显位移的演化特点,将模型的北盘固定.考虑到南海演化期间,太平洋板块表现为向东南的后撤,因此东侧边界设置为自由边界.南侧盘在第 1 阶段作 SE 向伸展,伸展应力从 SE135°顺时针旋转到 SE170°.第 2 阶段,南侧盘只作 SE 向伸展.

模拟材料厚度与地壳的厚度比例大致为 10^{-6} .南海的半扩张速率为 2.5 cm/a(Briais *et al.*, 1993).根据 Davy and Cobbold(1991),模型的长度只有地质体的 10^{-6} 大小,实验所用时间应是地质时间的 10^{-11} ,实验的变形速率约为 5 cm/hr.

2.3 物理模型的局限性

虽然三维模型有利于观察软流圈流动对断层发育的影响,模拟实验仍有许多不足之处.例如,热传导和新形成洋壳的固结无法考虑,从而将导致下列问题:(1)岩石圈不会因为沉积物的充填而加固,因此自然界中的裂陷分带在三维模拟实验中很难观察

到;(2)无法观察到扩张脊的跃迁,因为破裂一旦开始,扩张将在最初的破裂处不断地发展下去;(3)模型中无法模拟岩浆过程,而岩浆过程被认为是大陆伸展从张裂向破裂推进过程中一个重要的控制因素.

3 模拟结果

3.1 正常厚度的均一模型

这个模型是由层状设置的沙和硅酮组成的,脆性层和韧性层的厚度比为 2 cm : 1 cm,用来模拟发育在正常厚度岩石圈上的盆地.

当做 SE 向伸展时(图 5a1 和 5a2),受 NE 向断裂所围绕的 NE 向裂谷带开始发育.在裂陷区域的北部,多数断层南倾,南部的多数断层北倾.大断裂长度达 10 cm(地质上相当于 100 km)以上,垂向断距接近 1 cm.裂陷带大致呈 NE 走向的线状裂谷,对基底离散带走向的变化不敏感.随着伸展应力场从 SE135°顺时针旋转至 SE170°,NEE、EW 及 NW 走向断裂发育(图 5b1、5b2、5c1 和 5c2).受硅酮和

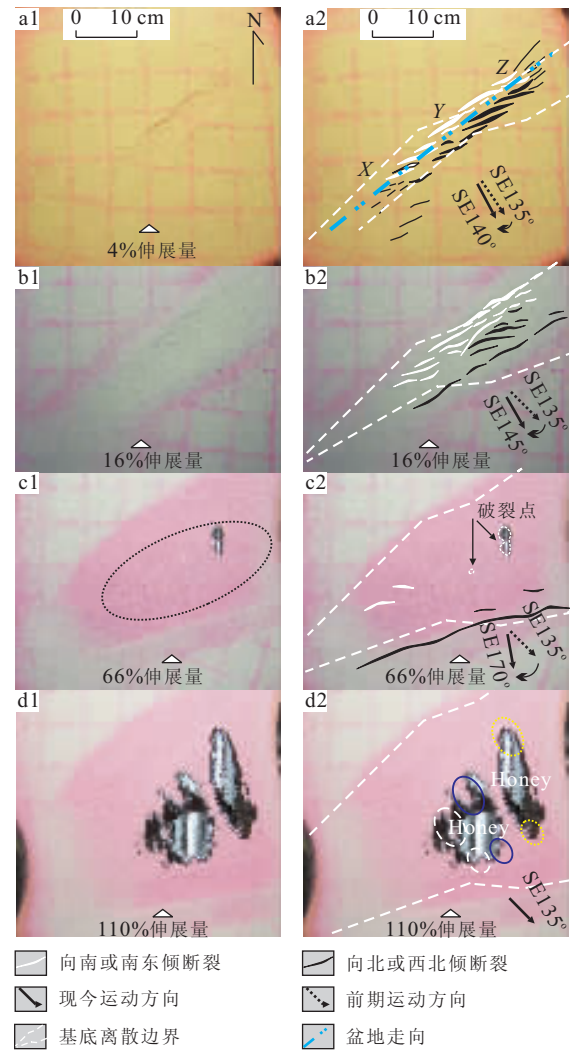


图 5 正常厚度均匀模型实验结果(a1、b1、c1、d1)与相应的构造解释图(a2、b2、c2、d2)(图例下同)

Fig. 5 Surface view of experiment (a1, b1, c1, d1) and with line drawings (a2, b2, c2, d2) of normal homogenous lithosphere model

每张图片底部的伸展量为三角形所指示的区域处的伸展量,用相同线条(虚线、实线或点线)圈定的区域为共轭边缘,指示符号在后面的图片中都相同

蜂蜜韧性流动的影响,断层逐渐变缓(图 5c1、5c2 和 5d1、5d2),尤其是靠近破裂区域处的断裂(图 5c1 中的黑色虚线圈内),只有张裂区的边界断裂仍比较发育.

在模型中点经历了 66%左右的伸展量时,破裂开始以点状形式出现,最早破裂的点位于模型中部,而不是伸展量最大的东部.当伸展方向为 SE170°时,扩张区域的长轴呈近 NS 走向(图 5c1 和 5c2);若伸展方向为 SE 向时,扩张区域迅速向西南传递,扩张区域长轴变为 NNW 和 NW 向,与伸展方向大

致平行.破裂区域的共轭边缘或者表现为对凹,或者表现为对凸(图 5d2).随着伸展过程的进行,破裂点逐渐生长合并为一个连续的扩张区域(图 5d1 和 5d2).

3.2 减薄的均一模型

该模型也是由层状设置的沙和硅酮组成的,脆性层和韧性层的厚度比为 0.5 cm : 1 cm,用来模拟发育在热减薄岩石圈上的盆地.

当做 SE 向伸展时(图 6a1 和 6a2),NE 和 NEE

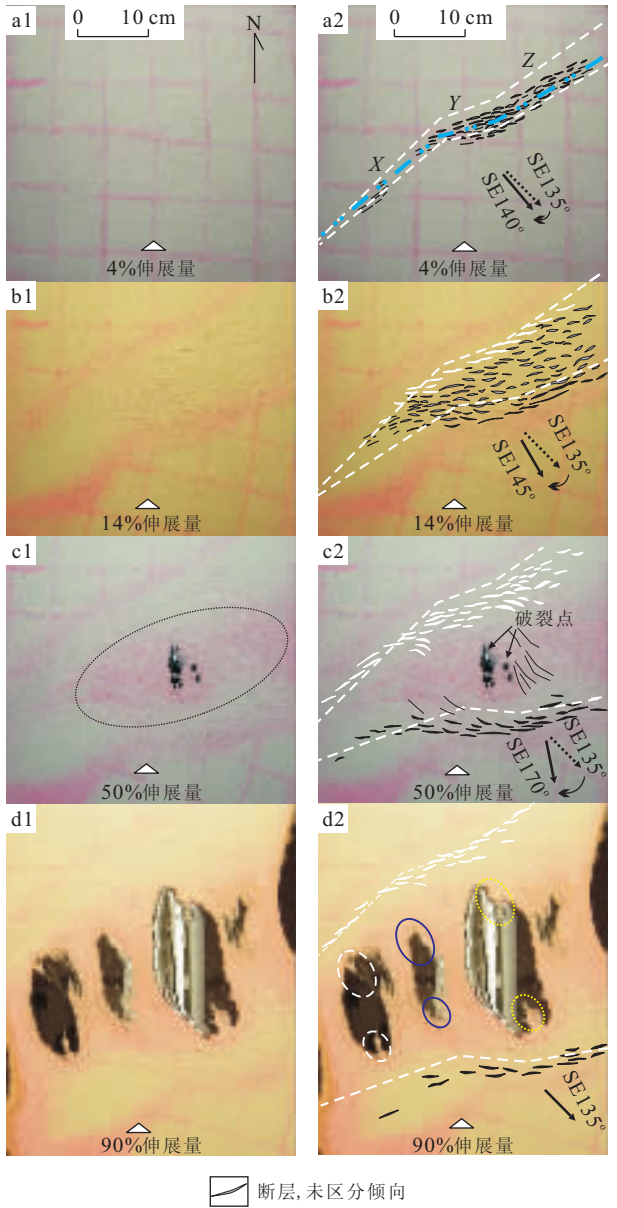


图 6 减薄的均匀模型变形结果表面图(a1、b1、c1、d1)和解释图(a2、b2、c2、d2)

Fig. 6 Experimental (a1, b1, c1, d1) and interpreted (a2, b2, c2, d2) surface view of thinned homogenous lithosphere model

走向的断裂发育. 与正常厚度的均匀模型相比, 裂陷带的走向对基底离散带的走向变化反应敏感, 表现出三段式的变化特征. 断层短小, 平均为 2 cm 左右 (地质上相当于 20 km 左右), 垂向断距小, 约 0.2 cm 左右, 但断层数量较多. 裂陷带北部断裂多数南倾, 南部多数断裂北倾. 受顺时针旋转伸展应力场的控制, 发育有 NEE、EW 和 NWW 走向断层 (图 6b1、6b2、6c1 和 6c2). 受硅酮和糖浆韧性流动的影响, 断层变平, 尤其是靠近破裂区域处 (图 6c1 黑色虚线框内). 靠近扩张发生的中央区, NW-NS 走向的断层或者流动迹线发育, 与伸展方向近平行.

在模型中点经过了约 50% 的伸展后 (图 6c1 和 6c2), 破裂开始以孤立点状出现, 仍然是在模型中段最早发生破裂. 共轭破裂点也表现出对凹或者对凸 (图 6d2). 伴随伸展作用, 破裂点变大并互相连结为一个连续的扩张区 (图 6d1 和 6d2). 扩张区的长轴与伸展应力方向大致平行.

3.3 正常厚度不均一模型

该模型不同于均一模型的地方, 是在离散带附近设置了一个高粘度的块体, 用以模拟中—西沙刚性地块对海盆演化的影响. 在伸展过程中, 高粘度块体表现为台地样式, 南北和东侧为陡崖式断裂, 高粘度块体的弱伸展导致其周围地区快速减薄, 并发育

了 2 个深槽 (图 7 中的 NT 和 ST). 当南侧盘不断向南运动并远离高粘度地块时, 破裂开始在离散带中段的东部转折点附近发生 (图 7a1 和 7a2), 这时模型中部的伸展量只有 28% 左右. 在伸展量达到 30% 左右时, 南部的深槽开始出现破裂. 尽管破裂以孤立点状出现, 但破裂的区域基本上沿着高粘度块体南侧的深槽发育. 高粘度块体向破裂区域凸出, 其共轭边缘则凹向扩张区.

4 讨论

4.1 破裂方式

根据上述各模拟实验, 笔者发现破裂过程 (超慢速扩张洋盆除外) 基本上表现出如下特征: (1) 破裂开始以孤立点状出现, 这些破裂点逐渐生长变大, 并互相连接成一个连续的扩张区. 因此, 破裂过程表现出更大的粘性特征, 与上地壳的脆性破裂明显不同. 这使得洋壳区的边界形态与海岸线的形态明显不一致; (2) 共轭边缘常具有对称的形态, 向洋盆方向或者对凸或者对凹. 当扩张脊上发育有刚性地块时, 扩张区域的形态明显受到刚性地块外形的影响; (3) 扩张区域的长轴方向对区域应力方向反应敏感, 与区域应力方向大致平行; (4) 与减薄的均一模型和不均一模型相比, 正常厚度的均一模型在破裂前需要更多的伸展量; (5) 受硅酮 (下地壳) 和蜂蜜 (软流圈) 流动的影响, 断层倾角变缓, 尤其是靠近破裂的区域.

4.2 从陆架到陆坡的张裂样式

模拟实验表明, 初始地壳的脆性上地壳层越薄, 发育的断裂就越短, 垂向断距也越小, 裂陷带走向变化对基底离散带走向变化的反应也越敏感. 这说明断裂样式和裂谷带走向变化与岩石圈的热状态和流变分层有关.

在南海的北部陆缘, 张裂结构从陆架向陆坡变化很大. 陆架区盆地主控断层长且垂向断距大, 裂陷单元以半地堑和强不对称地堑为主, 断层数量少 (图 2, L1). 裂陷带走向 NE, 无明显走向变化, 与正常厚度均匀模型相似, 推测陆架区盆地发育在正常厚度的岩石圈之上. 在陆坡区, 长边界断裂较少, 大部分内部断裂较短, 垂向断距较小, 裂陷带走向变化明显, 与 3.2 节中介绍的减薄的均一模型相似. 推测陆坡区比陆架区在裂陷初期具有相对热而薄的岩石圈, 这种流变结构的差异与岩石圈伸展和地幔上涌有关, 地幔上涌最高点位于未来破裂点附近, 南海北

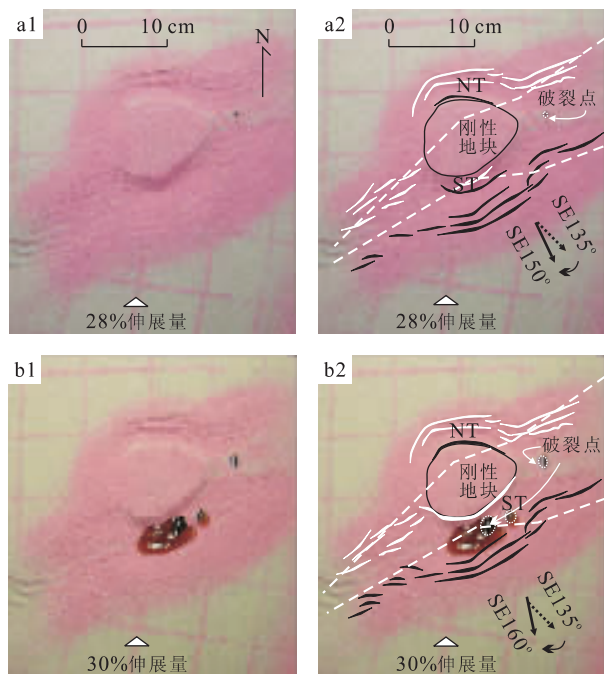


图 7 正常厚度不均一模型的变形结果表面图(a1, b1)和解释图(a2, b2)

Fig. 7 Experimental (a1, b1) and interpreted (a2, b2) surface view of normal inhomogeneous lithosphere

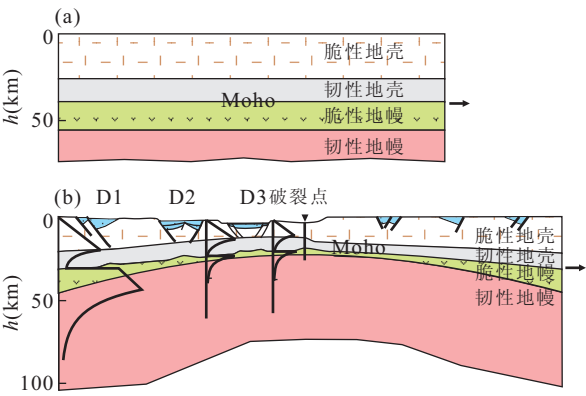


图 8 陆缘张裂、地幔上涌及相应的流变结构变化模式
Fig. 8 Schematic model for the continental rifting, mantle uprising and associated rheological profiles

部陆缘的岩石圈表现出向扩张脊方向变热,从而导致陆架和陆坡岩石圈初始流变结构的差异,进而导致张裂样式的差异. 这一现象可能也是造成陆坡区出现异常高热沉降的因素之一. 此前 Xie *et al.* (2006) 提出晚期的岩浆活动和动力地貌是造成南海北部陆缘,尤其是陆坡的重要因素. 南海北部陆缘南倾断裂占主导和南部陆缘北倾断裂占主导的构造现

象与模拟实验也比较一致,推测与地幔向破裂点的抬升大趋势有关. 裂隙带之下响应地壳减薄的局部地幔抬升与前面的抬升大趋势相比,只是地幔的次级抬升(图 8).

4.3 西北次海盆发育动力学

在 3.3 节的不均一模型中,高粘度块体的不变形导致邻区变形较集中,从而导致其北缘和南缘深裂陷槽的发育. 不均一模型比均一模型需要更少的伸展量即可以进入破裂阶段,高粘度地块的形状决定了深裂陷槽及之后靠近它的扩张区的走向变化. 在西北和西南次海盆之间,刚性的中—西沙地块的存在造成了岩石圈流变结构的横向不均一性. 西北次海盆表现为沿着中—西沙地块北部边缘形态弯曲发育,因而笔者推测西北次海盆可能由中—西沙地块北缘深裂陷槽破裂而成(图 9b). 与实验不同的是,自然界中上涌的岩浆在到达海底后会固结,使岩石圈加固. 随着南侧离散边界的向南迁移,扩张脊也在不断南移,当离散边界位于中—西沙地块之下时,中—西沙的弱变形阻止了扩张脊的向西延伸而停留在中—西沙地块以东. 当南侧离散边界移动到中—

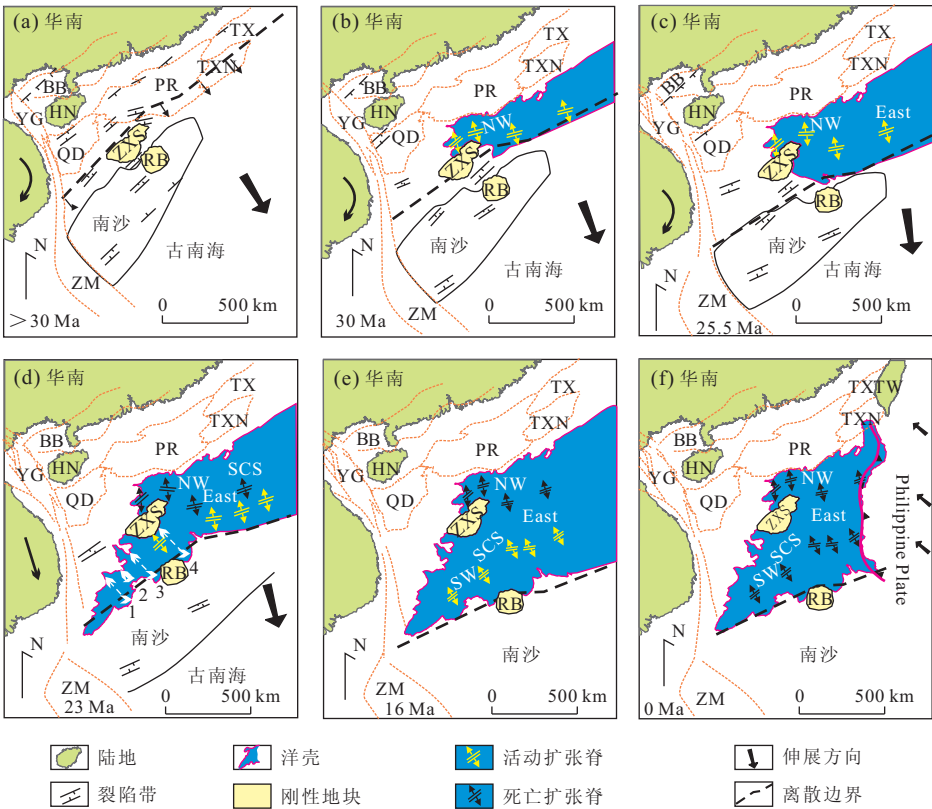


图 9 南海扩张历史模式

Fig. 9 Schematic figure showing the spreading history of the South China sea

BR 北部湾盆地; HN. 海南岛; QD. 琼东南盆地; PR. 珠江口盆地; TXN. 台西南盆地; TX. 台西盆地; ZXS. 中—西沙地块; LB. 礼乐地块; TW. 台湾

西沙地块以南的时候,扩张脊将迅速向西扩展.从不均一模型的结果来看,模拟实验无法与自然界的演化过程一一对应.对破裂过程控制明显的岩浆或热变化过程,在模拟实验中的缺失将会制约实验结果完全应用到自然界中.

4.4 西南次海盆共轭边缘确认

根据模拟实验可知,岩石圈破裂通常以点状出现,导致共轭边界发育初期表现为对凹或对凸,随着海盆不断扩张,其边缘形态可能会逐渐被沉积充填物模糊化.西南次海盆扩张时代晚,海盆窄,远离周围大陆,因此其边缘形态保存较好,方便对比.根据海盆自西南向东北张开的 V 字形特点,推测了 4 个共轭边缘点(图 9d 中的 1、2、3、4 双向箭头指示的点),1、2 和 3 号可能为相对均匀地壳破裂产生的对凹或对凸的共轭点,4 号则可能是受中—西沙刚性地块控制的共轭点,表现为中—西沙地块向海盆凸出,而对侧的边缘向海盆凹进.

4.5 南海最早的扩张年龄

在上一节的 3 个模拟实验中,破裂总是首先出现在转折段,而不是伸展程度最高的东段.即使存在高粘度块体,破裂也是首先出现在中间转折段.东部设为自由边界可能导致物质的流动,使破裂延缓.但边界效应不是决定因素,在早期的准三维模拟中(孙珍等,2005,2006),材料不易发生流动,笔者同样观察到转折段变形最强.这一现象与 Corti *et al.* (2003)的认识比较一致,他们提出构造转折带由于岩浆活跃和下地壳软弱等原因常成为变形集中的地区.根据裂谷带和扩张脊的走向变化特点,中间转折段对应于珠江口盆地的中部白云凹陷发育处,白云凹陷沉积了超过 11 km 厚的沉积物(Huang *et al.*, 2005),全地壳拉张因子达 1.8~4.0,而西侧和东侧的张裂区,沉积厚度不足 6 km,全地壳拉张因子小于 1.8(张云帆等,2007).

根据 ODP1148 站位和珠江口盆地 P33 井的定年结果,邵磊等(2004,2005)提出珠江口盆地在早渐新世前后(大约 30 Ma)结束裂陷作用;Clift *et al.* (2002)认为盆地张裂作用持续至 25 Ma 左右.在澎湖隆起、台西南和台西盆地(在台湾分别叫台南和台西盆地)解体不整合的时代大致为 30 Ma(Lin *et al.*, 2003),这些地区正好位于 Hsu *et al.* (2004)识别的南海洋壳磁条带的北部和东北部,而这些盆地的沉积历史与 Hsu *et al.* (2004)解释的 37 Ma 最早扩张时代并不一致,仍需要进一步的验证.南海从 30 Ma 左右开始扩张的解释(Briais *et al.*, 1993)与

北部盆地解体不整合发生在 30 Ma 左右的解释似乎更加一致.

5 南海的构造演化历史

综合物理模拟实验和陆缘盆地的演化历史以及 Briais *et al.* (1993)的定年结果,将南海的构造演化总结为 4 个主要阶段(图 9).

5.1 晚白垩世—早渐新世 (30 Ma 以前)

该时期(图 9a),南海地区主要经历了陆缘的伸展裂陷.根据盆地中发育的断裂体系,伸展应力场从 SE135°变化至 SE170°,顺时针旋转了 35°.孙珍等(2006)提出伸展应力主要来自古南海向婆罗洲的俯冲.南北陆缘上发育了 NE 和 NEE 走向的裂陷带,断层的走向从早渐新世前的 NE 向变为之后的近 EW 向.伴随区域伸展和地幔的抬升,未来破裂点处的地幔抬升最高、最热,这就造成原始流变分层的变化和陆架陆坡盆地张裂样式的变化,裂陷带下发生了次级的地幔抬升.在海盆北部陆缘,多数为南倾断裂,海盆南部陆缘多为北倾断裂.中—西沙地块的存在使其南北两侧的区域快速减薄,发育成两个深裂陷槽,其走向和形态明显受到刚性地块影响.其他的刚性地块,如郑和、礼乐和海南岛可能也会影响附近地区的张裂或破裂.

5.2 早—晚渐新世 (30~25.5 Ma)

大约在 30 Ma 前后,陆壳开始在东部次海盆发生破裂,沿着中西沙北侧的深裂陷槽,西北次海盆也开始扩张(图 9b).在扩张区的北部,裂后层序开始在珠江口、台西和台西南盆地披覆发育.在扩张区域以西和以南,张裂作用在伸展应力作用下继续进行.随着离散边界的不断南移,扩张脊也在不断南迁.由于中—西沙刚性地块的弱变形,扩张脊在地块以东不断向南迁移,但向西无法继续延伸.

5.3 早—中中新世 (23~16 Ma)

25.5~23 Ma 期间扩张脊跃迁的原因尚不清楚,但 23 Ma 后,老扩张脊被废弃,新扩张脊在南侧形成,并向西延伸至西南次海盆.笔者推测西南次海盆是沿着中—西沙地块南侧的深裂陷槽发育而成(图 9d).位于西南次海盆北侧的北部湾和琼东南盆地停止伸展裂陷,进入裂后热沉降期.南部陆缘盆地的裂陷作用仍在继续(金庆焕和李唐根,2000),直至中中新世南沙与婆罗洲地块发生陆陆碰撞(Hutchinson, 1996)(图 9e).Taylor and Hayes(1983)和孙

珍等(2006)认为南海扩张在中中新世的突然停止与陆陆碰撞有关。而 Tapponnier *et al.* (1986)认为南海扩张的停止与红河断裂左行走滑作用停止有关。海盆边界形状的不规则,推测与粘性破裂方式和刚性地块(如中—西沙、礼乐地块等)的影响有关。

5.4 中中新世—现在(16~0 Ma)

随着菲律宾海板块向北西的快速运动(Hall, 2002),南海的东部开始俯冲到菲律宾海板块以下(图 9f),南海东北部表现出断块抬升和剥蚀作用,台湾在 10 Ma 以后开始出现造山运动(Lin *et al.*, 2003)。俯冲作用使南海的面积不断缩小,导致南海东北陆缘的地质信息比较模糊。要想认清南海的完整演化历史,仍有许多工作有待开展。

6 结论

南海的张裂过程和破裂方式一直是广泛关注的科学问题。通过地质分析和 3 套物理模拟实验的对比,本文探讨了陆架—陆坡的张裂特征及其控制因素,探讨了地壳的破裂方式,主要结论如下:

(1)模拟实验表明,断裂样式和裂谷带的走向与岩石圈的热状态和流变分层密切相关。对比模拟结果与陆缘的断层样式,推测与陆架区相比,陆坡区由于伸展作用在张裂初期可能就具有一个热减薄的岩石圈。受下地壳(硅酮)和软流圈(蜂蜜)韧性流动的影响,断层越是靠近扩张区,倾角越是变得平缓。

(2)实验表明,正常厚度各向均一的岩石圈比已发生热减薄的或横向不均一的岩石圈需要更多的伸展量,才发生破裂。破裂首先以点状出现,这些点不断扩大并互相连接形成连续的扩张区。共轭边缘常具有对称的形状,向海盆方向对凹或者对凸。当离散边界附近有刚性块体时,扩张区域的边界会明显受到地块边缘形态的影响。通过模拟实验,推测破裂过程可能以较粘性的方式进行。洋壳边界的不规则形态既受到上涌岩浆的控制,也受到扩张区域附近刚性地块的影响。

(3)澎湖、台西南和台西盆地的钻井和沉积历史表明,南海最早的破裂作用可能始于 30 Ma 左右。破裂首先发生在东部和西北次海盆,根据模拟实验,西北次海盆的扩张可能沿着中—西沙地块北部深裂陷槽发育。随着离散边界的向南迁移,扩张脊也向南迁移。由于中—西沙地块的弱变形,向南迁移的扩张脊只限于刚性地块的东侧。23 Ma 左右,新的扩张脊

出现并沿着中—西沙地块南侧的深裂陷槽向西快速扩展。

(4)根据地质信息和模拟实验,本文将南海的演化分为 4 个主要阶段:晚白垩至早渐新世的张裂阶段、早渐新世—中中新世的两期海底扩张和中中新世以后的海盆关闭阶段。

References

- Allemand, P., Brun, J. P., 1991. Width of continental rifts and rheological layering of the lithosphere. *Tectonophysics*, 188(1-2): 63-69.
- Briaies, A., Patriat, P., Tapponnier, P., 1993. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading in the South China sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia. *J. Geophys. Res.*, 98(B4): 6299-6328.
- Brun, J. P., Buck, R., McClay, K., et al., 1999. Narrow rifts versus wide rifts: Inferences for the mechanics of rifting from laboratory experiments. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 357(1753): 695-712.
- Carter, N. L., Tsenn, M. C., 1987. Flow properties of continental lithosphere. *Tectonophysics*, 136(1-2): 27-63.
- Chen, C. M., Shi, H. S., Xu, S. C., et al., 2003. The condition of oil and gas reservoir formation in the East of Pearl river Mouth basin. Science Press, Beijing, 1-31 (in Chinese).
- Clift, P., Lin, J., 2001. Preferential mantle lithospheric extension under the South China margin. *Marine and Petroleum Geology*, 18(8): 929-945.
- Clift, P., Lin, J., Barchhausen, U., 2002. Evidence of low flexural rigidity and low viscosity lower continental crust during continental break-up in the South China sea. *Marine and Petroleum Geology*, 19(8): 951-970.
- Corti, G., Bonini, M., Conticelli, S., et al., 2003. Analogue modelling of continental extension: A review focused on the relations between the patterns of deformation and the presence of magma. *Earth-Science Reviews*, 63(3-4): 169-247.
- Corti, G., Bonini, M., Innocenti, F., et al., 2001. Centrifuge models simulating magma emplacement during oblique rifting. *Journal of Geodynamics*, 31(5): 557-576.
- Davy, P., Cobbold, P. R., 1991. Experiments on shortening of a 4-layer model of the continental lithosphere. *Tectonophysics*, 188(1-2): 1-25.
- Dunbar, J. A., Sawyer, D. S., 1988. Continental rifting at pre-existing lithospheric weaknesses. *Nature*, 333(2):

- 450—452.
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Smith, A. G., 2004. A geologic time scale 2004. Cambridge University Press, UK.
- Hall, R., 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific; Computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(4): 353—431.
- Hazebroek, H. P., Tan, D. N. K., 1993. Tertiary tectonic evolution of the NW Sabah continental margin. In: Teh, G. H., ed, Proceedings of the symposium on tectonic framework and energy resources of the western margin of Pacific basin. *Bull. Geol. Soc. Malaysia*, 33: 195—210.
- Hsu, S. K., Yeh, Y. C., Doo, W. B., et al., 2004. New bathymetry and magnetic lineations identifications in the northernmost South China sea and their tectonic implications. *Marine Geophysical Researches*, 25 (1—2): 29—44.
- Huang, C. J., Zhou, D., Sun, Z., et al., 2005. Deep crustal structure of Baiyun sag, northern South China sea revealed from deep seismic reflection profile. *Chinese Science Bulletin*, 50(11): 1131—1138.
- Hutchison, C. S., 1996. The ‘Rajang accretionary prism’ and ‘Lupar Line’ problem of Borneo. In: Hall, R., Blundell, D., eds, Tectonic evolution of Southeast Asia. *The Geological Society of London, Special Publications*, 106: 247—262.
- Jin, Q. H., Li, T. G., 2000. Regional geologic tectonics of the Nansha sea area. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Kang, X. D., Zhao, W. C., Pan, Z. G., et al., 1994. Study on architecture of sequence stratigraphic framework of Beibuwan basin. *Earth Science—Journal of China University Geosciences*, 19(4): 493—502 (in Chinese with English abstract).
- Keep, M., 2003. Physical modelling of deformation in the Tasman orogenic zone. *Tectonophysics*, 375 (1—4): 37—47.
- Kirby, S. H., 1983. Rheology of the lithosphere. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 21(6): 1458—1487.
- Li, P. L., 1994. Structural features and oil-and-gas accumulation in Pearl River Mouth basin. *Guangdong Geology*, 9(4): 21—28 (in Chinese with English abstract).
- Lin, A. T., Watts, A. B., Hesselbo, S. P., 2003. Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the South China sea margin in the Taiwan region. *Basin Research*, 15 (4): 453—478.
- Lu, B. Q., Xu, G. Q., Wang, H. G., et al., 2002. Sea floor spreading recorded by drowning events of Cenozoic carbonate platforms in the South China sea. *Chinese Journal of Geology*, 37(4): 405—414 (in Chinese with English abstract).
- Mart, Y., Dauteuil, O., 2000. Analogue experiments of propagation of oblique rifts. *Tectonophysics*, 316 (1—2): 121—132.
- Pubellier, M., Cobbold, P. R., 1996. Analogue models for the transpressional docking of volcanic arcs in the western Pacific. *Tectonophysics*, 253, doi: 10.0040—1951.
- Qin, G. Q., 2000. Investigation to the stratigraphy and construction of the comprehensive geologic columnar section of Cenozoic formation in Pearl River Mouth basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 14(1): 21—28 (in Chinese with English abstract).
- Ranalli, G., 1995. Rheology of the earth (2nd edition). Chapman & Hall, London, 413.
- Ranalli, G., Murphy, D. C., 1987. Rheological stratification of the lithosphere. *Tectonophysics*, 132(4): 281—295.
- Ru, K., 1988. The development of a superimposed basin on the northern margin of the South China sea and its tectonic significance. *Oil & Gas (Geology)*, 9(1): 22—31.
- Shao, L., Lei, Y. C., Pang, X., et al., 2005. Tectonic evolution and its controlling for sedimentary environment in Pearl River Mouth basin. *Journal of Tongji University (Natural Science) (China)*, 33 (9): 1177—1181 (in Chinese with English abstract).
- Shao, L., Li, X. H., Wang, P. X., 2004. Sedimentary record of the tectonic evolution of the South China sea since the Oligocene—Evidence from deep sea sediments of ODP site 1148. *Advance in Earth Sciences*, 19 (4): 539—544 (in Chinese with English abstract).
- Sims, D., Ferrill, D. A., Stamatakis, J. A., 1999. Role of a ductile decollement in the development of pull-apart basins; Experimental results and natural examples. *Journal of Structural Geology*, 21(5): 533—554.
- South China Sea Institute of Oceanology, 2000. Tectonic evolution and dynamics of the Nansha area (Dangerous ground) in South China sea. Research Report of ‘95’ National Important Scientific Project (in Chinese).
- Sun, Z., Pang, X., Zhong, Z. H., et al., 2005. Dynamics of Tertiary tectonic evolution of the Baiyun sag in the Pearl river Mouth basin. *Earth Science Frontiers*, 12 (4): 489—498 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Zhong, Z. H., Zhou, D., et al., 2006. Research on the dynamics of the South China sea opening; Evidence from analogue modeling. *Science in China (Ser. D)*, 49 (10): 1053—1069.

- Tapponnier, P., Peltzer, G., Armijo, R., 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia. *The Geological Society London, Special Publications*, 19(1): 113.
- Taylor, B., Hayes, D. E., 1983. Origin and history of the South China sea basin. In: Hayes, D. E., ed., *The tectonic and geologic evolution of Southeast Asian seas and islands*. *American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 27: 23—56.
- Tommasi, A., Vauchez, A., 2001. Continental rifting parallel to ancient collisional belts: An effect of the mechanical anisotropy of the lithospheric mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 185: 199—210.
- Tron, V., Brun, J. P., 1991. Experiments on oblique rifting in brittle-ductile systems. *Tectonophysics*, 188 (1—2): 71—84.
- Versfelt, J., Rosendahl, B. R., 1989. Relationships between pre-rift structure and rift architecture in Lakes Tanganyika and Malawi, East Africa. *Nature*, 337: 354—357.
- Xie, W. Y., Sun, Z., Zhang, Y. W., et al., 2007. The fault activity of Qiongdongnan basin and its kinematic analysis. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 27(1): 71—78 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Muller, R. D., Li, S. T., et al., 2006. Origin of anomalous subsidence along the northern South China Sea margin and its relationship to dynamic topography. *Marine and Petroleum Geology*, 23(7): 745—765.
- Yang, Z., Besse, J., 1993. Paleomagnetic study of Permian and Mesozoic sedimentary rocks from northern Thailand supports the extrusion model for Indochina. *Earth and Planetary Science Letters*, 117(3—4): 525—552.
- Yao, B. C., Wan, L., Liu, Z. H., et al., 2004. Tectonic dynamics of Cenozoic sedimentary basins and hydrocarbon resources in the South China sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(5): 543—549 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q. M., Hao, F., 1997. Evolution and petroleum system of the Ying-Qiong basin. *Sciences in China (Ser. D)*, 27(5): 149—154.
- Zhang, Y. F., Sun, Z., Zhou, D., et al., 2007. The Cenozoic stretching feature of the northern continental margin of South China sea and its dynamic significance. *Science in China (Ser. D)*, 37(12): 1—8 (in Chinese).
- Zhong, Z. H., 2000. The dynamics and hydrocarbon accumulation of Ying-Qiong basin, west of South China sea [Dissertation]. Nanjing University, Nanjing (in Chinese).
- Zhou, D., Ru, K., Chen, H. Z., 1995. Kinematics of Cenozoic extension on the South China sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region. *Tectonophysics*, 251(1—4): 161—177.
- Ziegler, P. A., Cloetingh, S., 2004. Dynamic processes controlling evolution of rifted basins. *Earth-Science Reviews*, 64(1—2): 1—50.

附中文参考文献

- 陈长民, 施和生, 许世策, 等, 2003. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件. 北京: 科学出版社.
- 金庆焕, 李唐根, 2000. 南沙海域区域地质构造. 海洋地质与第四纪地质, 20(1): 1—8.
- 康西栋, 赵文翠, 潘治贵, 等, 1994. 北部湾盆地层序地层格架及其内部构成. 地球科学——中国地质大学学报, 19(4): 493—502.
- 李平鲁, 1994. 珠江口盆地构造特征与油气聚集. 广东地质, 9(4): 21—28.
- 吕炳全, 徐国强, 王红翌, 等, 2002. 南海新生代碳酸盐台地淹没事件记录的海底扩张. 地质科学, 37(4): 405—414.
- 南海海洋研究所, 2000. 南海南沙地区构造演化与动力学. “95”国家重大科学项目研究报告.
- 秦国权, 2000. 珠江口盆地新生代地层问题讨论及综合柱状剖面图编制. 中国海上油气(地质), 14(1): 21—28.
- 邵磊, 李献华, 汪品先, 等, 2004. 南海渐新世以来构造演化的沉积记录——ODP1148 站深海沉积物中的证据. 地球科学进展, 19(4): 539—544.
- 邵磊, 雷永昌, 庞雄, 等, 2005. 珠江口盆地构造演化及对沉积环境的控制作用. 同济大学学报(自然科学版), 33(9): 1177—1181.
- 孙珍, 庞雄, 钟志洪, 等, 2005. 珠江口盆地白云凹陷新生代构造演化动力学. 地学前缘, 12(4): 489—498.
- 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 等, 2006. 南海的发育机制研究——相似模拟证据. 中国科学(D辑), 36(9): 797—810.
- 谢文彦, 孙珍, 张一伟, 等, 2007. 琼东南盆地断裂构造特征与成因机制分析. 海洋地质与第四纪地质, 27(1): 71—78.
- 姚伯初, 万玲, 刘振湖, 等, 2004. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源. 地球科学——中国地质大学学报, 29(5): 543—549.
- 张云帆, 孙珍, 周蒂, 等, 2007. 南海北部陆缘新生代地壳减薄特征及其动力学意义. 中国科学(D辑), 37(12): 1609—1616.
- 钟志洪, 2000. 南海西部莺琼盆地构造形成机制与油气聚集研究[博士论文]. 南京: 南京大学.