

# 南海的发育机制研究：相似模拟证据<sup>\*</sup>

孙 珍<sup>①②\*\*</sup> 钟志洪<sup>③</sup> 周 蒂<sup>①</sup> 夏 斌<sup>②</sup> 丘学林<sup>①</sup> 曾佐勋<sup>④</sup> 姜建群<sup>⑤</sup>

① 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301; ② 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; ③ 中国海洋石油深圳分公司技术部, 广州 510240; ④ 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074; ⑤ 中国石油辽河油田海南油气勘探分公司, 盘锦 124010)

**摘要** 实验研究表明, 整体北东走向的初始断裂的位置大致在珠一和珠二凹陷之间的隆起带下通过, 由北北东-近东西-北东东三段组成; 南海在早期的张开可能伴随约 15°的顺时针旋转, 后期存在一期南东向的扩张伸展, 从而使西南次海盆张开; 廷贾断裂可能是南沙盘的西侧边界, 而卢帕尔断裂则可能是印支盘的东侧边界, 之间为印支地块与南沙地块发生块体分离产生的 NW 走向的裂陷带, 模拟实验中沿着这一北西向沉降带内的北西走向断裂上见到张剪花状构造, 部分东倾的断裂上见反转逆冲, 在地理位置和构造特点上与曾母盆地具有一定的可比性. 南海地区刚性构造块体的存在改变了部分断裂和裂陷带的走向, 使变形不均匀分配, 改变了局部构造样式, 南海及陆缘的裂解可能受到了古南海俯冲拖曳和/或印藏碰撞引起的地幔流动的控制和影响.

**关键词** 南海 裂解与扩张 顺时针旋转 相似模拟 刚性地块

南海在新生代处于欧亚板块、太平洋板块和印度-澳大利亚板块相互作用的交汇区. 在这种复杂的地球动力学环境中, 南海形成了丰富多彩的地质构造现象, 陆壳、过渡地壳和洋壳等多种构造单元<sup>[1,2]</sup>, 因此成为研究大陆破裂过程及其大陆破裂驱动力的天然实验室, 备受国内外学者的关注; Lister 等<sup>[3]</sup>建立的被动陆缘发育模式, 南海北部的盆地与南部的南沙地块为一对共轭大陆边缘. 面积辽阔的南海陆缘盆地是中国油气勘探的重要基地, 因此对南海演化动

力学机制的研究不仅对边缘海的研究起到促进作用, 而且对未来的油气勘探也具有重要的指导意义.

关于南海形成演化的动力学机制, 目前具有代表性的几种主要观点有:

(1) 弧后扩张机制-主动陆缘说. Karig<sup>[4]</sup>, Ben-Avraham 等<sup>[5]</sup>和郭令智等<sup>[6]</sup>提出南海是菲律宾弧的弧后扩张盆地, 与古西太平洋的洋中脊俯冲作用有关.

(2) 与古南海洋壳向南俯冲拖曳有关. Holloway<sup>[7]</sup>, Taylor 等<sup>[8]</sup>和 Hall<sup>[9]</sup>认为, 白垩纪末至古新世时, 由于

收稿日期: 2005-08-15; 接受日期: 2006-02-09

\* 中国科学院知识创新重要方向(批准号: KZCX2-SW-117-05)、国家自然科学基金青年基金(批准号: 40406012)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 40238060)、国家重大基础研究发展规划课题(批准号: G2000046702)和国家南沙专项(编号: 2001DIA50041)资助项目

\*\* E-mail: zhensun@sciso.ac.cn

古南海壳向东南俯冲于吕宋和苏禄弧之下,俯冲板块的拖曳导致了华南陆缘的伸展和南海的张开。

(3) 与印-藏碰撞和印支半岛南东向挤出作用有关。Tapponnier 等<sup>[10]</sup>, Briaies 等<sup>[11]</sup>和 Leloup 等<sup>[12]</sup>认为印度与欧亚大陆的碰撞导致印支半岛在早第三纪沿红河断裂带发生了 500~700 km 的左行位移,在其末端由于左行拉分作用使南海张开。

(4) 与地幔流有关的主动扩张模式。Tamaki<sup>[13]</sup>, Flower 等<sup>[14]</sup>和李思田等<sup>[15]</sup>根据地震层析结果、地幔地球化学和南海北部沉积盆地的多方向的伸展研究,认为在南海之下存在地幔柱和侧向地幔流,可引起南海的张开。

(5) 与东亚陆缘右行裂解有关。周蒂等<sup>[2]</sup>通过南海与日本海的比较分析后,认为南海的张开是在太平洋俯冲带后撤、印度地块向北俯冲碰撞引起地幔舌南东向流动和澳大利亚 NNW 向俯冲和碰撞的共同驱动下,东亚陆缘发生右行张裂作用的产物。

(6) Morley 模式。Morley<sup>[16]</sup>提出任何南海扩张的模式都必须考虑古南海俯冲带的存在和印支半岛的挤出作用,并指出印支半岛挤出作用与古南海俯冲带通过红河断裂相连,红河断裂沿走向转化为右旋走滑断裂,辅助完成印支半岛的挤出,推动古南海的俯冲,而古南海的俯冲导致了南海的扩张。

为了找到南海演化较合理的解释,我们对南海及邻区进行地质分析,在此基础上对南海裂解的几种模式进行讨论,确立相对合理的地质模式,设计相应的物理模拟实验进行检验,对实验结果进行相似性分析,最后以实验为辅助手段建立南海演化的模式。

## 1 地质分析

### 1.1 南海海盆

南海为一个近似菱形的海盆,海盆洋壳东宽西窄。根据南海海底磁条带的分析<sup>[11]</sup>:南海海盆北老南新,扩张脊在 32~30 Ma 发生于西北和东部次海盆,扩张方向 NW-SE(约 160°); 30~26 Ma 西北次海盆停止了扩张,扩张作用只限于东部次海盆,海盆上沉积物较厚,扩张方向近南北向; 26~24 Ma,扩张轴向南跃迁,扩张作用由东向西南由中央海盆迅速发展至

西南次海盆(图 1),此期间磁条带相互近平行,在 15.5 Ma 左右结束海盆扩张,海盆上的沉积物较薄。

### 1.2 南海北部陆缘

南海裂解期间,华南地块没有明显的位移。华南地块向南海延伸的陆缘发生了裂解,由北向南发育了 3 条北东-南西走向的裂陷带<sup>[17]</sup>,位于最北带的北部湾盆地裂陷作用最早,在晚白垩纪发育第一期裂陷<sup>[2,17]</sup>,位于中带的珠江口盆地珠一和珠三坳陷,以及琼东南盆地未钻遇晚白垩裂陷沉积,珠江口盆地揭示的最早沉积时代为早始新世<sup>[18]</sup>,而琼东南盆地裂陷作用比珠江口稍晚,南海海盆的出现就更晚<sup>[3]</sup>。断裂走向由晚白垩的北东走向(NE45°)顺时针发展至渐新世的北东东走向<sup>[19]</sup>,因此伸展应力场为顺时针旋转张应力场,伸展方向大致由 SE 发展至 SSE。

### 1.3 南海南部陆缘

海盆南侧为南沙海底高原,裂陷程度相对较弱(图 2),发育了一系列北东向的新生代盆地,如南薇盆地、礼乐盆地和安渡盆地(图 1)。南沙地块与婆罗洲地块之间为南沙海槽(巴拉望海槽),海槽南侧新生代以来发育一条向西北仰冲的逆掩推覆体,地壳被压下沉<sup>[21]</sup>,推测是古南海洋壳向婆罗洲地块俯冲以后,在中中新世(约 15.5 Ma)发生陆陆俯冲碰撞的结果<sup>[22]</sup>,此时南海扩张结束。

### 1.4 南海西侧边界断裂

大多数研究<sup>[12,23]</sup>都认可,哀牢山-红河断裂是印支地块与华南地块间的走滑变形带,根据同位素定年,左旋走滑时间最早为 44 Ma 左右<sup>[24]</sup>,快速左行走滑与冷却的时间为 33~17 Ma<sup>[12]</sup>,因此印支地块的挤出作用远远晚于南海陆缘初始裂解时间。对于印支地块的挤出边界,即红河断裂,在海上的去向一直存在争议。一些学者<sup>[25]</sup>认为越东断裂作为南海与印支地块的分界断裂,是红河断裂的延伸带;基于地形、重磁异常和其他的地质证据,万玲等<sup>[26]</sup>提出中建南断裂是红河断裂带的延伸断裂;根据莺歌海盆地的物理模拟实验,孙珍等<sup>[27]</sup>指出,由于印支地块的顺时针

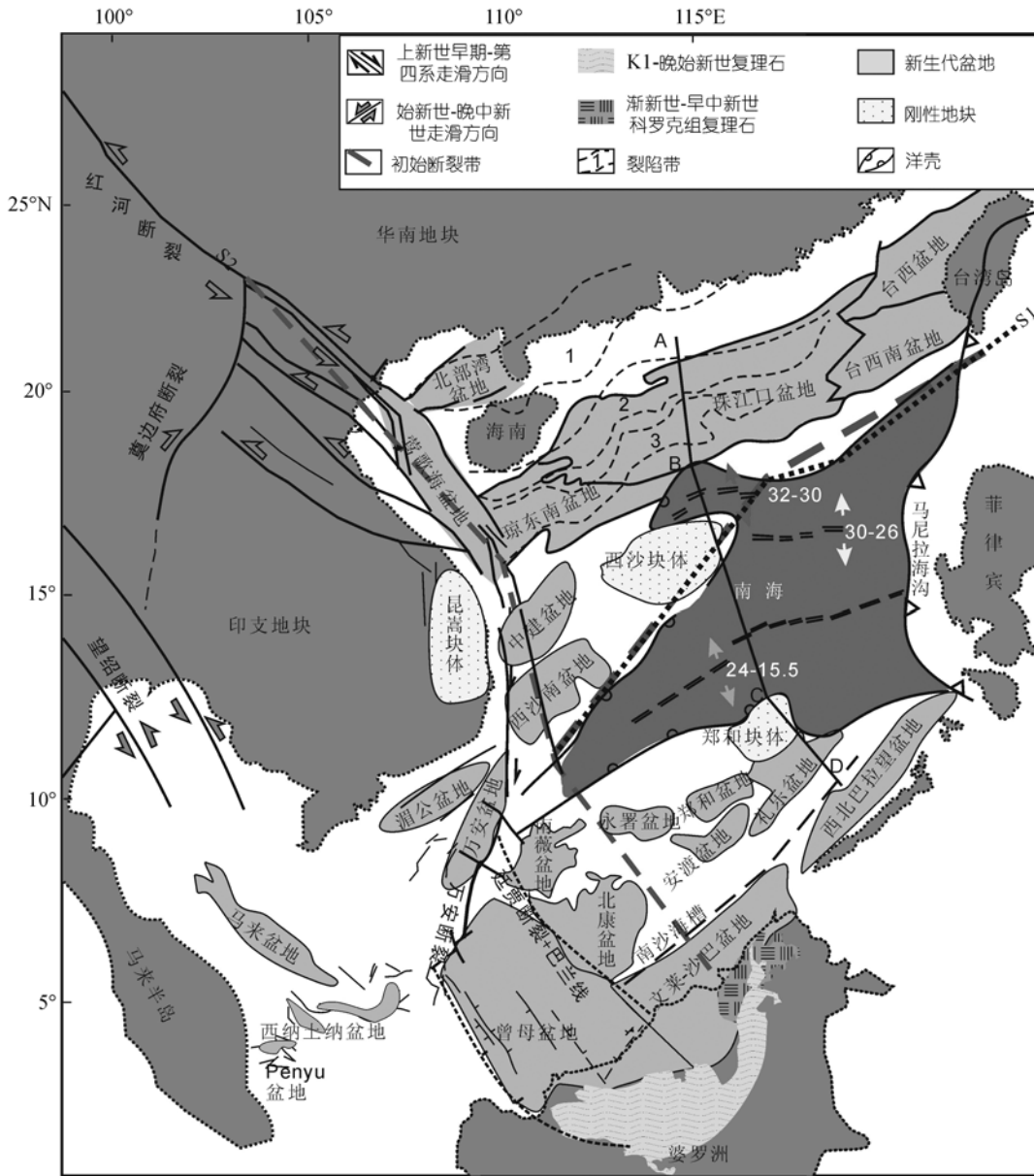


图 1 南海及邻区构造轮廓图(据周蒂等<sup>[2]</sup>和 Briaies 等<sup>[11]</sup>编制)

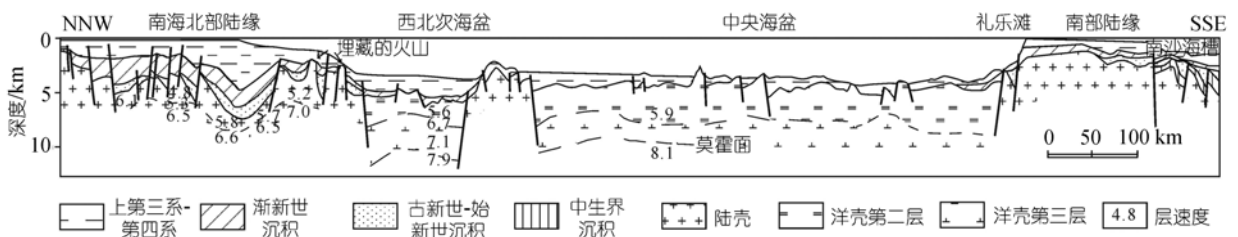


图 2 根据地震测线解释的南海北部陆缘-中央海盆-南部陆缘的地质断面<sup>[20]</sup>

断面位置见图 1 中 A~D

针旋转,红河断裂分叉为两支,一支保持原走向,另一支在顺时针转过约  $15^\circ$  的方向,而中建南断裂是初始延伸方向,越东断裂是印支地块构造运动后现在的边界断裂,之间为块体离散造成的裂陷带.再向南至南海西南部,近南北向的越东断裂,呈帚状向南散开,与 NW 向的廷贾大断裂和万安大断裂(由 NNE 向的万安东断裂+NW 向的卢帕尔断裂)相接(图 1).廷贾断裂和万安断裂都为西倾走滑断裂,具有多期的活动历史<sup>[28]</sup>.

万安大断裂走向北北东,在地形上与陆架边缘相对应,并表现为一明显的重力异常梯度带,推测该断裂向南与北西向的卢帕尔断裂相连,它限制着万安盆地向东发展<sup>[25]</sup>.

廷贾断裂位于曾母盆地北部,是一条西倾的剪切断裂<sup>[28]</sup>,向东南与巴兰线相连. Morley<sup>[16]</sup>在综合研究了与印藏碰撞的挤出作用有关的三条断裂:实阶断裂,梅平-三塔断裂和哀劳山-红河剪切带的基础上,指出只有红河断裂可能将印藏碰撞和印支半岛挤出作用与婆罗洲西北的俯冲带相连,辅助完成印支半岛的挤出,而红河断裂沿走向在南海的扩张中心以南转化为右旋走滑断裂,与巴兰线(Baram Line,也就是廷贾断裂)共同组成印支地块的东侧走滑边界.综合研究表明,廷贾大断裂的确表现出块体分界断裂的许多特点:廷贾大断裂位于曾母盆地北侧,往西北到达越东-万安大断裂附近;往东南与婆罗洲北侧的巴兰线相连接,巴兰线截止了南沙海槽的西延,且断裂东侧的巴兰三角洲地温梯度( $2.58^\circ\text{C}/100\text{ m}$ )远远小于西侧的 Luconia 碳酸盐建造( $4.36^\circ\text{C}/100\text{ m}$ )<sup>[29]</sup>.因此我们推测廷贾断裂是大的块体分界,目前表现为南沙地块与西部的曾母盆地的分界断裂.

### 1.5 南海东侧边界

南海东侧早期受到古太平洋板块俯冲后撤的影响,为一个半自由的边界,中中新世后(约 11 Ma)受到菲律宾板块的碰撞和仰冲<sup>[3]</sup>,表现为挤压边界,此时南海的伸展过程已经结束,因此模拟中不予太多考虑.

## 2 几种演化模式的合理性分析

### 2.1 古南海存在的证据

在婆罗洲拉姜群(Rajang)和科罗克群(Crocker)增生楔复合体上,向北和北西倾的构造的发育,岩浆活动及婆罗洲抬升历史都表明这里可能存在一个古南海的俯冲带<sup>[29-31]</sup>,大致在廷贾断裂以西,洋壳俯冲作用时间推断为早白垩-晚始新世(约 115~45 Ma),以东持续至中中新世,之后发生陆陆碰撞形成沙捞越造山带(45 Ma)和沙巴造山带(15 Ma).古南海俯冲模式得到了地球物理资料的支持,Rangin 等<sup>[32]</sup>的层析成像结果表明婆罗洲下存在一条长约 300 km 的板片,推测为古南海板片残留体.以上证据说明古南海曾经存在过并向南俯冲消失于婆罗洲地块下.因此,古南海海洋壳的俯冲拖曳对于南海的裂解和扩张可能是一个重要的动力.

### 2.2 弧后扩张模式

南海东北部在晚中生代发育 NE 向褶皱带和火山弧,以及 NW 向左行压扭断裂(图 3).周新民和李武显<sup>[33]</sup>认为,晚中生代的挤压应力场与太平洋的低角度俯冲作用有关,他们指出低角度俯冲时间为中晚侏罗纪,而从早白垩(K1)开始,太平洋俯冲带开始后撤,俯冲速率下降,伴有少量玄武岩和花岗岩的红色陆相碎屑弧后盆地开始在陆上发育.根据婆罗洲上

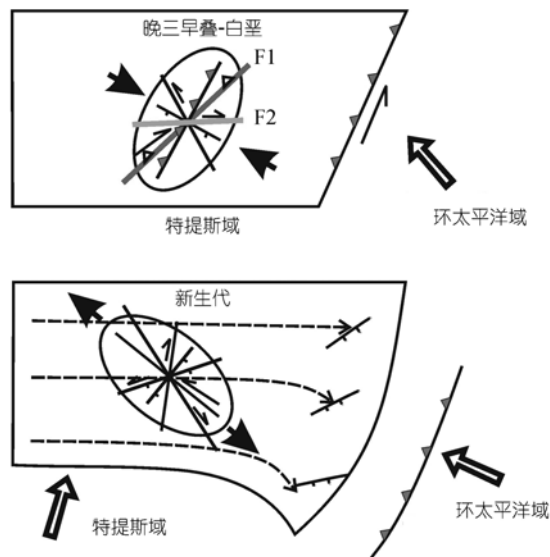


图 3 南海北部陆缘中新代应力状态与断裂活动<sup>[3]</sup>

揭示的拉姜群海相复理石的年代,古南海在早白垩开始向东南俯冲,由于古南海与太平洋在空间上重叠,运动时间和方式上存在继承性,那么古南海很可能是从古太平洋裂离的一个残留洋,并且从晚白垩开始发生向南俯冲。根据重、磁和广角地震图件的分析解释,周蒂等<sup>[34]</sup>在南海北部从西北次海盆到台西南盆地追索到深海盆北缘存在一段大致 NE45°走向的东亚陆缘中生代俯冲增生带,与东北侧的南日本-琉球群岛-台湾存在的晚侏罗世-早白垩世的俯冲增生带和西南侧的北巴拉望俯冲增生杂岩带正好相接。由此可见,古太平洋的俯冲带伴随南海的张开发生了错断,部分留在了南海北部,部分和南沙地块一起被推到了现今的南海以南。因此可以推断南海的实际扩张带(甚至陆缘伸展初始断裂带)与古俯冲带斜交。因此,我们有理由相信南海陆缘在早白垩以后发生了从主动陆缘向被动陆缘的转变,但转变时间不很确切,如果根据古南海俯冲的时代来定义,那么时间为早白垩纪;如果根据珠江口盆地花岗岩停止大规模侵入的时代<sup>[35]</sup>,推测晚白垩(约 70 Ma)以后完成了从主动陆缘向被动陆缘的转变,因此,弧后扩张不应是南海陆缘裂解和海底扩张的主要动力。对南海北部和南部边缘盆地的研究也趋向于支持南海的被动陆缘成因<sup>[20,36]</sup>;根据 Lister 等<sup>[3]</sup>建立的被动陆缘发育模式,南海北部的盆地与南部的海底高原为一对共轭被动大陆边缘,是伴随南海扩张的裂陷作用发育的,南海北部陆架及海底扩张表现为由东向西推进的“剪刀式张开”<sup>[17]</sup>。

### 2.3 印支地块挤出与侧向地幔流

南海的发育与印支地块挤出作用之间的确存在很多相似的表现:如在运动方式上,都存在顺时针旋转,且 Briais 等<sup>[11]</sup>认为南海扩张期间旋转极的位置与印支地块挤出的旋转极一致;时间上,红河断裂带在转换伸展变形机制下发生的快速左行走滑与冷却的时间(33~17 Ma),与南海的迅速扩张(32~16 Ma)时代比较接近<sup>[12]</sup>,南海扩张和结束时间滞后 1 Ma。但南海北部的裂陷带走向由晚白垩的北东走向(NE45°)顺时针发展至始新世的北东东走向(NE60°)和渐新世的近东西向(NE70°)<sup>[37]</sup>,顺时针旋转角度达 25°左右;磁

条带分析表明,南海海盆的扩张由 32~30 Ma 期间的北北西向变为 30~26 Ma 期间的近南北向,根据西南次海盆盆缘与洋中脊的夹角,推断南侧盘又顺时针旋转了 15°左右。而印支半岛在晚始新世(多数学者认为约 35 Ma 后<sup>[12,38,39]</sup>)开始发生顺时针旋转挤出,Le Pichon<sup>[40]</sup>在假设亚洲内所有的新生代走滑运动都是围绕某一极轴进行的基础上,推算的印支地块的旋转极位于(11°N, 95°E),旋转角度大致为 15°~25°<sup>[41,42]</sup>。因此,印支地块的挤出作用远远晚于南海陆缘初始裂解时间,顺时针转过的角度也小于南海地区,这说明南海发育的印支半岛挤出成因说<sup>[10]</sup>不成立,南海的发育与印支地块的挤出作用属于两个独立的动力系统,但之间可能存在一定的相互作用。

目前还无法判断侧向地幔流说能否成立。因为根据 Lee 和 Lawver<sup>[43]</sup>的研究,印度地块向青藏的俯冲开始于晚白垩世,时间上与南海表现为被动陆缘裂解的时间接近。但值得置疑的是,印藏碰撞引起的地幔侧向流动为何能够很快导致南海陆缘向南的伸展和裂解,而促使印支地块向南东挤出却需要滞后 30 Ma 左右? 因此我们推测侧向地幔流不可能是控制南海陆缘裂解和海底扩张的唯一动力学因素。

### 2.4 综合分析

根据以上几方面的分析讨论,弧后扩张和印支半岛挤出作用不是南海陆缘裂解的主要驱动力,南海裂解的主要动力来自古南海的向南俯冲拖曳和/或地幔侧向流动拖曳力。因此前面提到的第一、第三种观点不太合理,第六种观点中认为印支地块挤出推动古南海俯冲的说法与印支地块挤出时间晚于古南海俯冲时间相矛盾。南海裂解表现为与印支地块挤出相独立的变形系统,是一个从被动陆缘伸展发展为边缘海盆的过程,陆缘张裂期和海盆扩张早期(32~26 Ma)受到顺时针旋转张应力的控制,24~15.5 Ma 期间海盆扩张经历北西-南东向扩张后结束发育,推测婆罗州 24 Ma 左右开始的逆时针旋转阻止了古南海俯冲的顺时针旋转。由于南海北部陆缘盆地揭示的最早裂陷沉积为晚白垩世,并且由于晚白垩世以后的几个裂陷幕和海底扩张的时代以及断裂发育特点研究相对较清楚<sup>[11,37,44]</sup>,因此,我们的模拟实验

主要探讨晚白垩-中中新世期间从被动陆缘伸展发展至海盆期间的变形情况。

### 3 物理模拟模型及边界条件设定

#### 3.1 模拟实验的前提和假设

模拟实验和地质调查表明,早期的构造事件通常会由于破裂和岩浆作用而导致岩石圈强度的降低和软弱带的形成,在新的构造事件下,激活老的软弱破碎带要比产生新的破裂容易得多。因此新的张裂活动通常会沿着早期的软弱带(如造山带、缝合带、断裂带等)发育。南海东北部在晚中生代发育NE向褶皱带和火山弧,以及NW向左行压扭断裂。这些断裂在之后的新生代变形中可能被激活,控制新的变形(图3)。

南海北部陆缘的分块特点和断裂体系与裂陷带走向斜交的特点说明南海的裂解可能受前新生代基底软弱带(命名为S1)的控制,而基底软弱带的走向基本与裂陷带的走向一致,这里假设南海海盆的北部边界断裂的走向为基底软弱带方向(图1中S1黑色虚线),设置模型1(图4);结合洋中脊的走向,我们还将S1细化为三段(图1中S1黑色点线),设置模型2(图4),以对比不同初始断裂设置造成的构造样式的变化。由于印支地块和郑和隆起为古老的刚性地块,他们位于初始边界断裂附近,在南海发展期间他们基本未发生明显的变形,为了探讨地壳这种横向不均一性对变形的影响,我们在模型1的基础上增加了两个高强度构造块体的设置,即模型3(图4)。根据海盆向西南次海盆收敛的情况,我们推测旋转极的位置可能在西南次海盆两边界断裂的交点附近。印支地块南东向走滑的边界断裂(命名为S2)设定为沿红河断裂-中建南断裂<sup>[45]</sup>-古廷贾断裂(假设廷贾断裂在南海裂解前的大致位置,与中建南断裂相接,走向与现在的廷贾断裂成逆时针旋转15°方向),旋转极的设置参考莺歌海盆地物理模拟,设置在印支地块左侧一较远的位置以保证模拟实验中大部分段在旋转移动时处于张剪状态<sup>[45]</sup>。引起南海张开的应力方向应为南东-南南东向,由于应力主要来自古南海俯冲的拖曳力和或地幔侧向流动的拖曳力,因此这里简化为在东南盘上施加一个向东南的拉张力。

两条初始断裂(S1和S2)将研究区分为三块。由于强裂陷作用主要发生于始新世及以后,因此实验中第一阶段南东向伸展设置考虑较弱,即东南盘先向NE135°方向运动2cm,模型1和模型3中没有考虑第一阶段的南东向伸展;之后东南和西南盘同时向NE160°方向运动,且边移动边作顺时针旋转,旋转角度约15°左右,在走滑位移达10cm左右时,东南盘向NE135°方向运动和西南盘向NE160°方向运动。基底软弱带和加载的设置见图4。模拟实体与地质体的对应关系见表1。

#### 3.2 模型的边界条件设定

南海是一个受限的边缘海,发育期间,北侧的华南地块基本上未发生明显的位移,因此,北侧边界为固定边界;东侧早期为一个半自由的边界,中中新世后的挤压状况发生在南海扩张过程结束后,因此东侧边界设为自由边界,不受强约束;南侧,在中中新世南海发育结束前,古南海洋壳俯冲和/或地幔侧向流动产生的拖曳力使南海伸展,因此在南侧盘上施加一个旋转拉张力,且设为自由边界;南海的西侧边界为走滑边界,印支地块沿边界断裂旋转走滑,他与南海地区的变形相互影响,莺琼复合区的构造发育是很明显的一个证据<sup>[41]</sup>。因此,模型中必须在西侧考虑印支地块的挤出作用,才能获得对南海演化的更全面合理的认识。由于物理模拟实验无法考虑热的影响,实验结果反映的只是构造变形的结果。

#### 3.3 模拟实验材料及参数使用

由于实验条件的限制,本模拟采用脆-韧双层模型。干燥松散的粒状砂用以模拟脆性的上地壳和同构造沉积,用非牛顿体的有机泥模拟韧性下地壳。砂和有机泥以及刚性古地块的力学参数见表1。假设南海发育前为正常地壳,因此脆韧材料层厚度比按照2:1设置<sup>[46,47]</sup>。这里砂层厚2cm,韧性有机泥厚1cm,与地质体的比例为1:10<sup>6</sup>;平面上,实验模型与地质体的比例为1:5×10<sup>6</sup>。为进行比例模拟,地质上南海的半扩张速率约为2.5cm/a,实验中控制在4cm/a左右(地质上相当于2cm/a),即实验与南海实际扩张全速率的比例约为1:10<sup>6[11]</sup>。

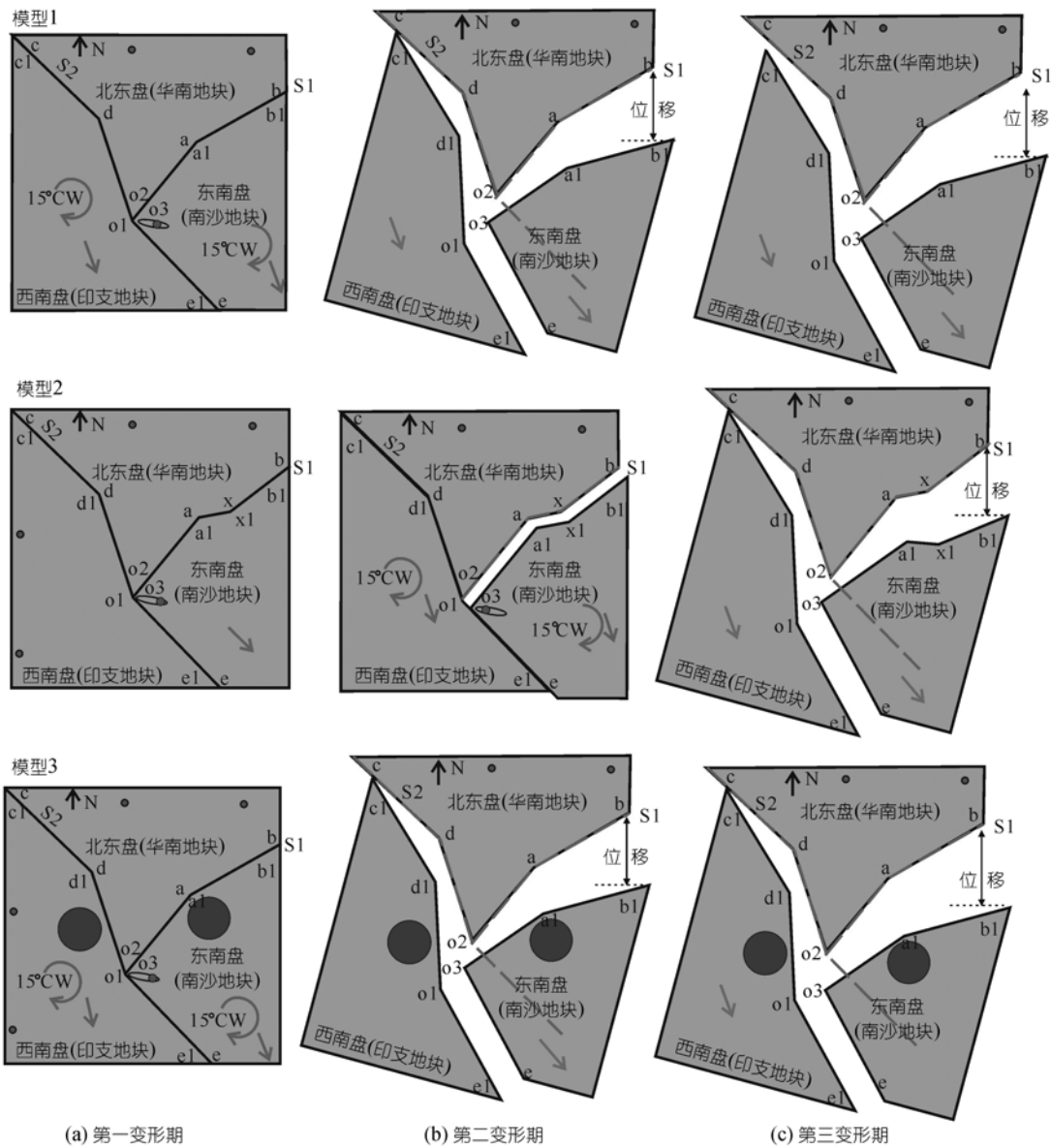


图 4 南海模拟模型的设置与加载状况图

表 1 模拟与地质体类比参数表

模拟对象	对应地质体
S1(o+a+b)	控制南海发育的基底软弱带(oa 段走向 40°, ax 段走向 75°, ab 段或 xb 段走向 60°)
S2(c+d+e)	印支地块走滑初始边界(红河断裂+中建南断裂+古廷贾断裂, 走向分别为 135°, 160°, 和 130°)
西南侧盘	印支地块
北东侧盘	华南地块
南东侧盘	南沙地块
上地壳及同构造沉积	松散石英砂, 粒径 200~300 μm, 内摩擦角 30°~32°
韧性下地壳	有机泥, 25°C 时黏度 10 <sup>4</sup> ~10 <sup>5</sup> Pas, 黏度随变形增加降低
刚性块体(如昆嵩、郑和)	高黏度有机泥, 25°C 时黏度约为 10 <sup>9</sup>



为观察变形, 砂有黄、白和橙红色三种, 白色和黄色砂层相间(每层厚约 0.5 cm)平铺在有机泥上构成变形前地壳, 最上一层为白色砂. 模拟材料放置在刚性底板上, 刚性底板厚 0.5 mm, 按照初始软弱带剪开, 构成变形的动力载体. 模拟材料的范围超过基底断裂的范围. 变形的过程中, 沉降区用有颜色的石英砂充填以保护断层变形. 实验完成后, 用水喷湿模型, 剖面进行观察.

## 4 模拟结果分析

### 4.1 模型 1 模拟结果

观察平面变形图(图 5), 沿着北西向和北东向的基底软弱带, 发育了两个方向的裂陷系. 北西向的裂

陷系由北西向断裂所围陷, 垂向沉降小, 沿走向沉降不连续分布; 北东向裂陷系由北东和北东东向断裂围陷而成, 从北向南随着南沙盘(东南侧盘)的向南运动, 先后发育了四个北东走向的沉降带 1, 2, 3, 4. 由于南沙盘的顺时针旋转作用, 4 个沉降带都表现为东宽西窄, 第 2, 3 和第 4 沉降带表现出明显的东深西浅, 但第 1 沉降带表现为西深东浅, 推测受到北西向断裂影响. 由于模拟实验中无法考虑岩浆涌出——固结形成洋壳的过程, 这里假设从北向南发育的第 1 和第 2 个沉降带对应于珠一—琼东南和珠二坳陷, 第 3 和第 4 个沉降带为南海海盆(简单对应关系见图 5). 从图 B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> 和图 6 的剖面我们可以看到, 第 3 个和第 4 个沉降带构成相对宽而深的近菱形的带, 在东段被短

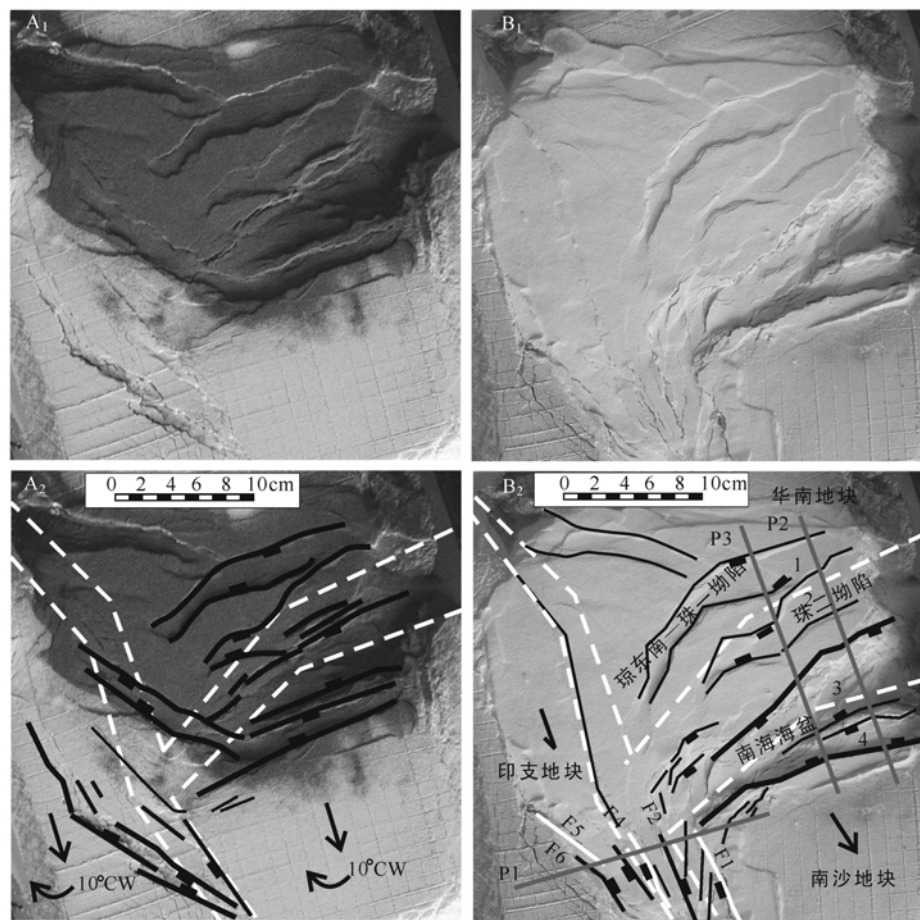


图 5 模型 1 模拟实验变形过程表面图(A<sub>1</sub>,B<sub>1</sub>)及解释线图(A<sub>2</sub>,B<sub>2</sub>)

A 为印支盘和南沙盘分别顺时针转过 10° 时的表面变形样式, B 为顺时针转过 15° 后向东南运动 2 cm 后的变形结果. 图中线段 P1, P2 和 P3 给出剖面的位置, 剖面结果见图 6; 虚线指示刚性底盘上初始断裂变形后的位置, 箭头指示底盘运动方向, 实线为断裂, 黑色矩形指示断裂的下降盘, 图中代号下同



小的高起分隔，西段连接为一个整体，发育稍晚于 1, 2 沉降带。无论在边界断裂走向、盆地形态还是发育顺序都与南海海盆相似，但缺少对应西北次海盆的沉降带。由于印支地块与南沙地块之间的差异运动，它们之间形成一套NW走向的沉降系统，在地理位置和构造特点上与曾母盆地具有一定的可比性。

观察和对比剖面结果(图 6)，在横切印支地块与南沙地块之间北西向裂陷带的 P1 剖面上，F1 和 F5 两条断裂长期活动，对应着底板的离散边界，它们之间是板片差异运动形成的复杂垒堑结构，在位置上类似于曾母盆地东侧的廷贾断裂和西侧的卢帕尔断裂，之间部分北西走向断裂(如 F2 和 F4)上见张剪花状构造，表明断裂具有剪切性质；部分东倾的断裂由于南东盘(南沙地块)的顺时针旋转挤压，发育了轻微的反转逆冲(图 6, P1 剖面中白色箭头所示)，在地理位置和构造特点上与曾母盆地具有一定的可比性。

P2 剖面上，位于最北部的第 1 沉降带看上去更像一个半地堑，边界断裂不对称，宽度也较小，这与

珠一、珠三坳陷的构造情况接近。南部的 2, 3, 4 沉降带形态上更像复式的地堑，由相对对称的边界断裂构成，宽度也较大，这些特点与珠二坳陷和琼东南盆地的中央坳陷类似。

在位于 P2 剖面以西的 P3 剖面上，第 1 沉降带比其在东侧 P2 剖面上表现对称些。构造位置相似的实验剖面 P3 与相应的地质剖面(图 2)在基本结构上比较相似(图 6)：模拟下地壳的韧性有机泥在坳陷两侧边界断裂下明显上隆，且总体上自北西向南东逐渐减薄，在第 3 裂陷带下减薄最大，在没有实时充填同裂陷期沙层以保护变形的东侧边界(图 5)，第 3 裂陷带内的泥(下地壳)已经被拉断，因此假设从第 3 裂陷带开始为洋盆是合理的；完全发育的裂陷带北侧窄，向南逐渐加宽(第 3 沉降带>第 2 沉降带>第 1 沉降带)，裂陷深度也逐渐增加，根据同张裂充填的厚度可以判断，早期的张裂中心在北侧(第 1, 2 沉降带，这里第一期同构造充填砂层-桔红色砂 O 的厚度最大)，之后张裂中心向南跃迁至第 3 沉降带，说明在单向拉伸应力场下，地壳的裂陷带(或沉降带)以一定的间隔向伸

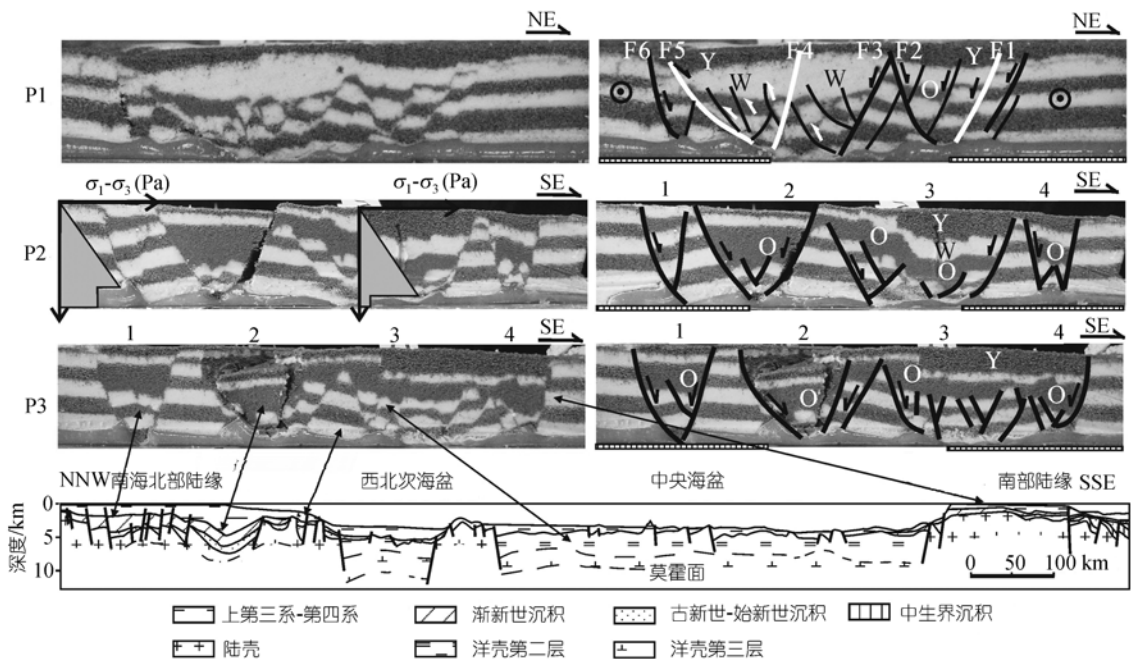


图 6 模拟实验结果剖面图及其与地质剖面结构对比分析

地质剖面位置见图 1，结构见图 2。实验剖面位置见图 5；O-橙红色同构造充填，W-白色同构造充填，Y-黄色同构造充填。剖面上标示的材料应力参数的变化为示意性(据实测有机材料黏度变化值)，说明有机泥的强度随伸展作用而降低。有机泥下竖线充填区指示刚性底板的位置

展的方向顺次发育, 上下地壳均减薄直至地壳破裂和洋壳出现. 对于未变形区, 北侧的韧性有机泥基本未减薄, 而南侧(南沙地块)的韧性层发生了较明显的减薄, 与地质上被动陆缘上盘的下地壳减薄大比较一致<sup>[1]</sup>.

综合平面和剖面结果, 在第一加载期, 由于南侧盘的顺时针旋转作用, 第 3 和第 4 沉降带西端浅而窄, 与北侧的北西向沉降带在尾端相接, 推测此时期西南次海盆还未张开. 在第二加载期的南南东向伸展应力场下, 第 3 和第 4 沉降带西端的垂向沉降才迅速加剧, 并与北侧的北西向沉降带明显分开. 因此推测西南次海盆是在第二扩张期张开的. 在北西向裂陷系上, 第一加载期主要发育与基底断裂斜交的张剪断裂; 而在第二加载期, 沿着北西向的初始断裂主要发育与基底断裂近平行的走滑断裂, 尤其在南段, 发育几条近相互平行的北西向断裂. 值得注意的是, 北

东向的裂陷系中, 底盘上基底断裂的位置与表面上大断裂的位置和走向不完全一致.

## 4.2 模型 2 模拟结果

在第一期南东向伸展应力作用下(图 7(a)), 沿整个北东走向的 S1 初始断裂带出现裂陷, 断裂发育与初始断裂带走向斜交, 沿走向三段结构清晰, 中间段裂陷作用最强. 随着第二加载期东南侧盘的顺时针旋转(图 7(b)), 裂陷作用明显表现为东强西弱、东宽西窄、东深西浅. 在第三加载期南南东向伸展作用下(图 7(c)), 沿 S1 初始断裂带西端的垂向沉降才迅速加剧, 裂陷作用均匀分布. 总体上来说, 本实验中沿 S1 和 S2 初始断裂的主要变形特点与模型 1 比较相似, 但走向上多了一段近东西向的转折, 与南海北部陆缘盆地的走向在白云凹陷处出现一段近东西向转折和洋中脊的走向的三段式变化比较一致.

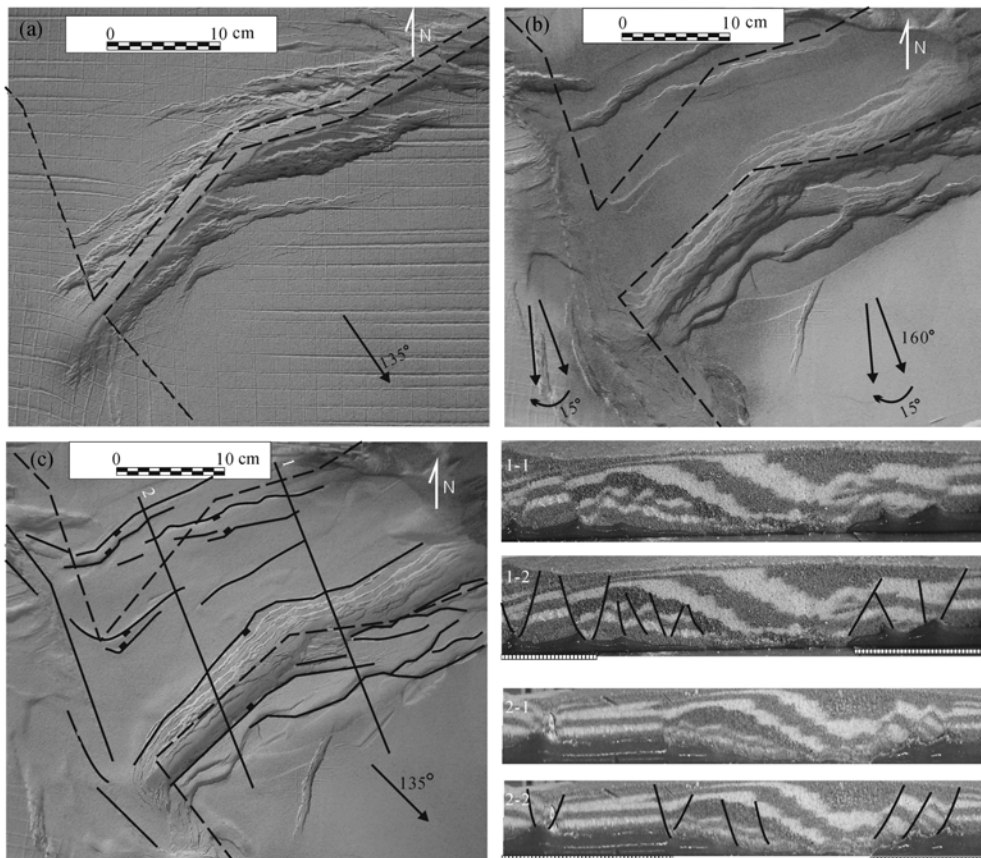


图 7 模型 2 模拟实验变形过程表面和剖面结构图

### 4.3 模型 3 模拟结果

与模型 1 相似，沿着北东走向的 S1 初始断裂，自北向南发育了 3 条北东走向的沉降带，最南面的近似菱形的沉降带在形态和断裂特点上与南海海盆相似；沿着北西走向的 S2 初始断裂发生走滑和离散(图 8)。由于刚性构造块体(昆嵩、郑和)的存在，断裂在经过构造核附近时按照构造核的形态发生了弧形弯曲。

北西走向的沉降系统主要受到昆嵩块体的影响，由于昆嵩块体的弱变形，其北侧和东侧沉降急剧增加，沉降强度明显大于实验 1 和实验 2。昆嵩块体的南侧，断裂和沉降带沿着昆嵩块体的弧形边界弯转成北东向之后变为北西向，与万安断裂和廷贾断裂比较相似。

北东向裂陷带主要受郑和块体的影响，沉降带的南边界出现弧形断裂。由于本实验中第二期加载时，东南侧盘先向东南运动 5 cm，受郑和块体的影

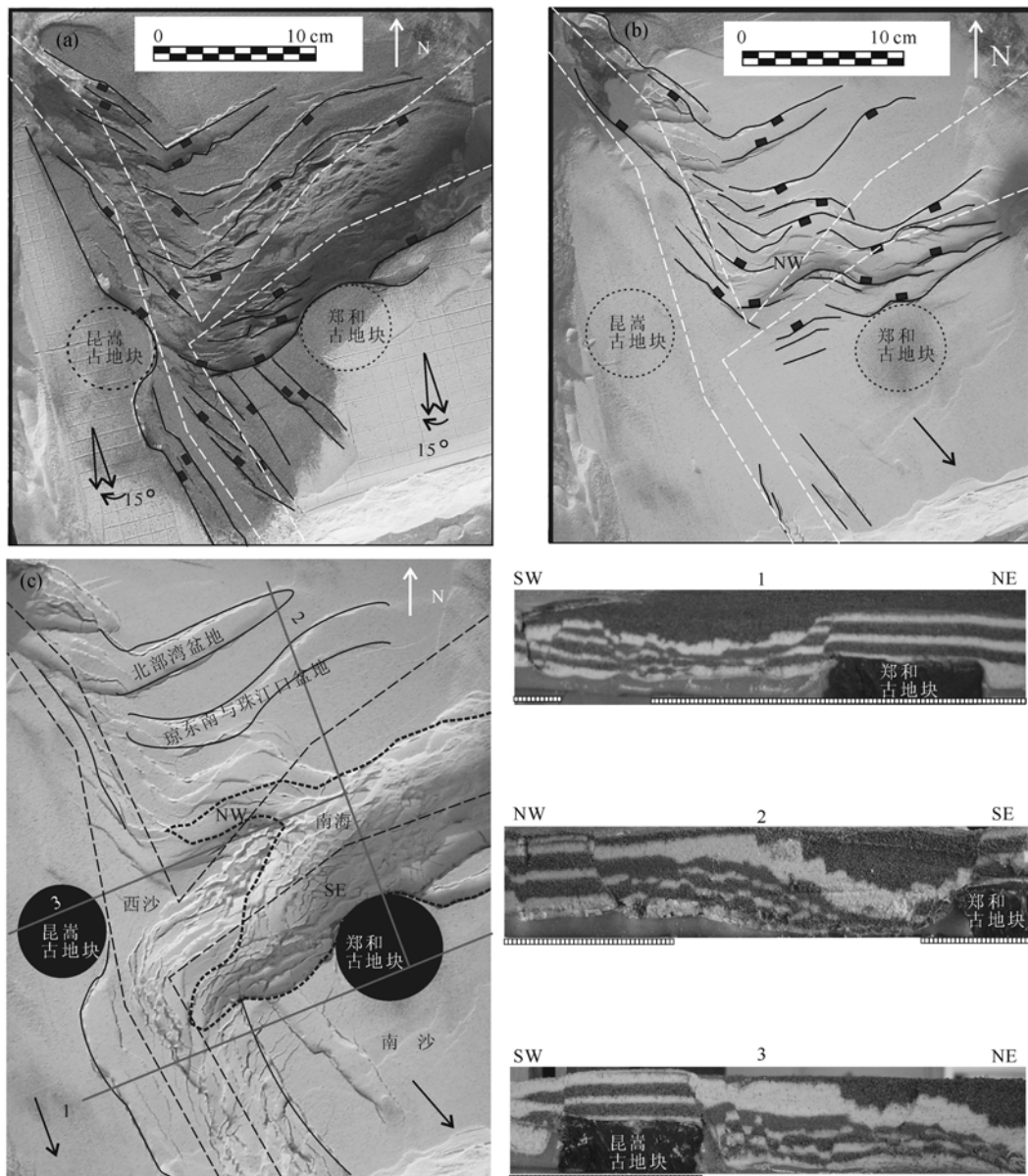


图 8 模型 3 模拟实验变形过程表面和剖面结构图

响,北东向裂陷带‘NW’向西延伸时方向发生了变化,从东侧的北东走向变为在郑和块体北西侧的北西走向,再向西又转为北东向(图 8(b));之后伴随东南侧盘继续向南南东运动,另一北东走向深裂陷带‘SE’发育(图 8(c)),在裂陷带“NW”和“SE”之间以及昆嵩块体东侧发育了一向东尖灭的凸起,与中西沙地块形态相似.之后西南侧盘向南南东的走滑对这一构造格局改变不大.目前还不能确定这种运动方式是不是中西沙隆起形成的原因,因为地质研究表明中西沙地块也表现为较刚性的块体,在新生代裂陷作用较弱.

剖面结构表明,位于离散板块边界上的刚性构造块体的存在使附近的韧性层迅速减薄,并导致断层的角度急剧变陡(图 8,剖面 2 和 3).

总体上,该实验与实验 1 在主要裂陷结构特点上表现相似,但刚性构造块体的存在改变了部分断裂和裂陷带的走向,导致附近断裂倾角变陡和韧性下地壳迅速减薄,使变形不均匀分配,改变了局部构造样式.

## 5 模拟结果的相似程度分析与讨论

### 5.1 物理模拟的可靠性分析

陆壳裂解和洋壳形成的过程是一个热动力学过程.由于无法考虑液体地幔涌出和之后的固结过程,本实验中未考虑软流圈地幔的设置,而是单纯观察力学变形情况下,裂陷带发育与洋盆在形态和结构上的相似性,从而来推断南海发育的控制因素,因此本实验建立在简化的假设基础之上,具有很大的推测性,只能作为认识力学变形过程的辅助依据,在一级构造的尺度上借鉴使用.

另外,由于南海地区构造复杂,处于中新世代的构造活动区域,因此关于南海形成演化的观点很多.随着南海探测和研究程度的逐渐提高,一些观点(如弧后扩张说等)越来越显示出与地质事实不相符,因此本实验设计中未加考虑.但我们曾对‘挤出说’进行了验证,也对多种初始断裂(S1 和 S2)走向设计、配置方式、加载方式进行了分步模拟,在反复对比基础上,认为上述三个模拟实验在裂陷发育顺序、裂陷几何形态、边界断裂性质和剖面上隆凹结构等方面与南海及

围区的地质情况基本相似,因此以上述实验为主要参考依据,建立对南海演化历史的认识.

### 5.2 模拟结果分析

对比实验结果与地质现象,我们可以推断实验 2 中设置的三段式的北东走向初始断裂与地质情况更接近;南海地区岩石圈的各向异性(软弱带和刚性块体的存在)控制了南海的构造演化和局部构造样式的变化;印支地块沿着与 S2 相似的路径向南南东顺时针挤出滑动,与北东向的裂陷带相互影响,共同控制了南海及邻区晚白垩-中中新世的构造格局.

但实验结果也存在与地质情况不一致的地方,如:模拟实验 1 和 2 中未发育与西北次海盆相似的裂陷,裂陷带 1, 2 的走向与珠一和珠二坳陷不完全一致,我们推测可能是实验材料的各向同性与地质上岩石圈各向异性之间的差距引起的.实验结果还存在与模拟假设不一致的地方,如实验中变形后南海海盆北缘边界断裂的位置(图 5 中的粗黑实线)和底盘上基底断裂 S1(白色虚线)的位置和角度不完全一致,因此本实验中假设的基底断裂的位置(图 1 中)可能不准确,推测地质上 S1 的初始位置大致在珠一和二坳陷之间的隆起带下,如同模拟实验结果所反映的,而不是模拟前假设的南海海盆的北缘断裂的位置.由于南海发育过程中,南沙盘向婆罗地块下的俯冲和婆罗地块的旋转等地质过程将会使南海南侧和西南侧的构造进一步复杂化,因此本模拟实验中南海海盆南侧的表面变形和 NE 走向的剖面上的构造可能会与地质情况有较大出入.

## 6 结论

根据上述的模拟实验和讨论,我们有以下几点主要认识:

(1) 整体北东走向,由北北东-近东西-北东东三段组成的初始断裂控制了南海地区北东走向裂陷带和南海的发育,陆缘张裂期和南海的扩张早期伴随着东南侧拉伸盘的顺时针旋转,旋转角度大约  $15^\circ$ ,从而导致南海扩张作用东早西晚,扩张程度东强西弱;最后一期的北西-南东向扩张,最终导致了西南次海盆的张开.

(2) 西倾的廷贾断裂可能是南沙盘的边界, 而卢帕尔断裂则可能是印支盘的边界, 之间为块体分离产生的裂陷带, 这一北西向沉降带内的北西走向断裂上见张剪花状构造, 部分东倾的断裂上见反转逆冲, 在地理位置和构造特点上与曾母盆地具有一定的可比性。

(3) 南海地区局部刚性构造块体, 如郑和块体和昆嵩块体的存在改变了部分断裂和裂陷带的走向, 导致附近断裂倾角变陡和韧性下地壳迅速减薄, 使变形不均匀分配, 改变了局部构造样式。

**致谢** 李家彪研究员所提出建设性修改意见, 臧绍先教授在南海形成动力学的探讨和实验设置方面提出了有益建议; 另外, 本研究受到王宽诚教育基金会国际会议项目资助, 并在第32届世界地质大会上进行了口头报告, 在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 龚再升, 李思田, 等编. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社, 1997
- 2 周蒂, 陈汉宗, 吴世敏, 等. 南海的右行陆缘裂解成因. 地质学报, 2002, 76(2): 180—190
- 3 Lister G S, Etheridge M A, Symonds P A. Detachment models for the formation of passive continental margins. *Tectonics*, 1991, 10(5): 1038—1064
- 4 Karig D E. Origin and development of marginal basins in the Western Pacific. *J Geophys Res*, 1971, 76: 2542—2561
- 5 Ben-Avraham Z, Uyeda S. The evolution of the China basin and the Mesozoic Paleogeography of Borneo. *Earth Planet Sci Lett*, 1973, 18: 365—376
- 6 郭令智, 施央申, 马瑞士. 西太平洋中、新生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成及演化. 地质学报, 1983, 57(1): 11—21
- 7 Holloway N H. The North Palawan block, Philippines: its relation to the Asian mainland and its role in the evolution of the South China Sea. *Am Assoc Petrol Geol Bull*, 1982, 66(9): 1355—1383
- 8 Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea basin. In: Hayes D E, eds. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands*, part 2. Washington D C: AGU Geophys. Monogr Ser, 27, 1983, 23—56
- 9 Hall R. Reconstructing Cenozoic SE Asia. In: Hall R, Blundell D J, eds. *Tectonic Evolution of Southeast Asia*. Geol Soc London, Spec Publ, 1996, 106. 203—224
- 10 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. *Nature*, 1990, 243: 431—437[DOI]
- 11 Briaux A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading in the South China Sea: implications for the Tertiary Tectonics of Southeast Asia. *J Geophys Res*, 1993, 98(B4): 6299—6328
- 12 Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, et al. New constraints on the structure, thermochronology and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE Asia. *J Geophys Res*, 2001, 66: 1083—6732.
- 13 Tamaki K. Upper mantle extrusion tectonics of Southeast Asia and formation of the western Pacific back-arc basins. Workshop: Cenozoic Evolution of the Indochina Peninsula, Hanoi/Do son, Abstract with Program, 1995, 89
- 14 Flower M F J, Tamaki K, Hoang N. Mantle extrusion: a model for dispersed volcanism and DUPAL-like asthenosphere in east Asia and the western Pacific. In: Flower M F J, Chun S L, Lo C H, et al, eds. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. AGU, *Geodynamics* 27, 1998. 67—88
- 15 李思田, 杨甲明. 关于南海及其边缘盆地形成的地球动力学背景的讨论. 见: 龚再升, 李思田等著. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社, 1997. 122—128
- 16 Morley C K. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia. *Tectonophysics*, 2002, 347: 189—215[DOI]
- 17 Ru K, Zhou D, Chen H Z. Basin evolution and hydrocarbon potential of the northern South China Sea. In: Zhou D, Liang Y B, Zeng C K, eds. *Oceanology of China Seas*. Dordrecht: Kluwer Acad Publ, 1994, 2. 361—372
- 18 秦国权. 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), 2000, 14(1): 21—28
- 19 李平鲁. 珠江口盆地构造结构及演化. 中国海上油气(地质), 1989, 3(1): 11—18
- 20 Yan P, Zhou D, Liu Z. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 2001, 338: 1—21[DOI]
- 21 金庆焕, 李唐根. 南沙海域区域地质构造. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(1): 1—8
- 22 Hazebroek, H P, Tan D N K. 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, 1993, 33: 195—210
- 23 Tapponnier P, Peltzer G, Armijo P. On the mechanics of the collision between India and Asia. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 1986, 19: 115—157
- 24 吴海威, 张连生, 嵇少丞. 红河-哀牢山断裂带-喜山期陆内大型左行走滑剪切带. 地质科学, 1989, (1): 1—7
- 25 吴进民. 南海地质构造演化的若干问题. 见: 陈颢, 王水, 秦蕴珊等主编. 寸丹集-庆贺刘光鼎院士工作 50 周年学术论文集. 北京: 科学出版社, 1999. 61—72
- 26 万玲, 姚伯初, 吴能有. 红河断裂入海后的延伸及其构造意义. 南海地质研究(12), 北京: 地质出版社, 2000. 22—32
- 27 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 等. 红河断裂带的新生代变形机制及莺歌海盆地的实验证据. 热带海洋学报, 2003, 22(2): 1—9

- 28 钟广见, 吴进民, 王嘹亮. 南海西南走滑断裂特征及其与油气的关系. 青岛海洋大学学报, 1995, 25(4): 495—502
- 29 Hutchison C S. Geological evolution of South-East Asia. Geol Soc Malays, Kuala Lumpur, 1996. 368
- 30 Sandal S T. The Geology and Hydrocarbon Resources of Negara Brunei Darussalam. Brunei Shell Petroleum/ Brunei Museum, Syabas Bandar Seri Begawan, Brunei Darussalam, 1996. 243
- 31 Hutchison C S, Bergman S C, Swauger D A, et al. A Miocene collisional belt in north Borneo: uplift mechanism and isostatic adjustment quantified by thermochronology. J Geol Soc (London), 2000, 157: 783—793
- 32 Rangin C, Spakman W, Pubellier M, et al. Tomographic and geological constraints on subduction along the eastern Sundaland continental margin (South-East Asia). Bull Soc Geol Fr, 1999, 170: 775—788
- 33 周新民, 李武显. 中国东南部晚中生代火成岩成因: 岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式. 自然科学进展, 2000, 10(3): 240—247
- 34 周蒂, 王万银, 王家林, 等. 地球物理资料所揭示的南海东北部中生代俯冲增生带. 中国科学, D 辑, 2006, 36(3): 209~218
- 35 陈长民, 施和生, 许仕策, 等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件. 北京: 科学出版社, 2003
- 36 Hutchison C S. Marginal basin evolution: the southern South China Sea. Mar Pet Geol, 2004, 21: 1129—1148[DOI]
- 37 朱伟林, 江文荣. 北部湾盆地涠西南凹陷断裂与油气藏. 石油学报, 1998, 19(3): 6—11
- 38 Wang P L, Lo C H, Lee T Y, et al. Thermochronological evidence for the movement of the Ailao Shan-Red River shear zone: A perspective from Vietnam. Geology, 1998, 26: 887—890[DOI]
- 39 Harrison T M, Leloup P H, Ryerson F J, et al. Diachronous initiation of transtension along the Ailao Shan-Red River shear zone, Yunnan and Vietnam. In: Yin A, Harrison T M, eds. The Tectonic Evolution of Asia. New York: Cambridge Univ Press, 1996. 208—226
- 40 Le Pichon X. Résumé des Cours et Travaux. Annuaire du College de France 1987~1988, Paris, 1988
- 41 Yang Z, Basse J. Paleomagnetic study of Permian and Mesozoic sedimentary rocks from Northern Thailand supports the extrusion model for Indochina. Earth Planet Sci Lett, 1993, 117: 525—552[DOI]
- 42 Chen Y, Courtillot V. Widespread Cenozoic (?) remagnetization in Thailand and its implication for the India-Asia collision. Earth Planet Sci Lett, 1989, 93: 113—122[DOI]
- 43 Lee T Y, Lawver L A. Cenozoic plate reconstructions of Southeast Asia. Tectonophysics, 1995, 251: 8—138
- 44 李平鲁. 珠江口盆地构造特征与油气聚集. 广东地质, 1994, 9(4): 21—28
- 45 Sun Z, Zhou D, Zhong Z, et al. Experimental Evidence for the Dynamics of the Formation of the Yinggehai Basin, NW South China Sea. Tectonophysics, 2003, 372(1-2): 41—58[DOI]
- 46 Davy P, Cobbold P R. Experiment on shortening of a 4-layer model of the continental lithosphere. Tectonophysics, 1991, 188: 1—25[DOI]
- 47 Tron V, Brun J P. Experiments on oblique rifting in brittle-ductile systems. Tectonophysics, 1991, 188: 71—84[DOI]