

莺歌海盆地构造演化与强烈沉降 机制的分析和模拟

孙 珍¹, 钟志洪², 周 蒂¹

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. 中国海洋石油深圳分公司技术部, 广东广州 510240

摘要: 莺歌海盆地新生代发生了快速沉降, 盆内充填了最厚达 17 km 的沉积。根据模拟实验, 印支地块或之上刚性地块的存在对莺歌海盆地的强烈沉降具有重要的贡献, 可能是造成莺歌海盆地裂陷期强烈沉降的重要原因之一。结合地质分析和物理模拟实验, 莺歌海盆地的演化大致可以分为以下 4 个主要阶段: 早期(42 Ma 以前)主要受到南海北部陆缘(主要是北部湾盆地)裂解造成的右旋转换伸展作用的影响, 但影响范围较小, 主要为莺歌海盆地西北部和东部边界。42~21 Ma 期间, 主要受控于印支地块左行走滑和顺时针旋转作用的影响, 莺歌海盆地在此期间发育了主体裂陷体系, 东侧受到右旋转换伸展应力场的叠加影响而导致沉降加强; 21~10.4 Ma 期间, 受印支地块逐渐减弱直至停止的左行走滑作用的影响, 盆地西北部在 21~15.5 Ma 期间发生局部反转褶皱, 但盆地整体进入以热沉降为主的时期; 10.4 Ma 以后, 盆地受华南地块沿红河断裂右旋走滑作用和 5 Ma 以后新一期热事件的影响。

关键词: 莺歌海盆地; 构造演化; 强烈沉降; 物理模拟。

中图分类号: P554

文章编号: 1000-2383(2007)03-0347-10

收稿日期: 2006-08-28

The Analysis and Analogue Modeling of the Tectonic Evolution and Strong Subsidence in the Yinggehai Basin

SUN Zhen¹, ZHONG Zhi-hong², ZHOU Di¹

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

2. Department of Science and Technology, Shenzhen Branch of CNOOC, Guangzhou 510240, China

Abstract: During Eocene period, rapid subsidence occurred in the Yinggehai basin where more than 17 km of sedimentary cover has been accumulated. According to the analogue modeling experiments, the rigid massif on the Indochina block could be one of the most important factors contributing to the strong subsidence and high sedimentation rate of the basin. Combined the geological analysis with analogue modeling experiments, the evolution of the Yinggehai basin could be divided into four main stages: (1) Before 42 Ma, controlled by the southeastward extension of the Beibu Gulf basin on the northern continental margin, the Yinggehai basin experienced dextral pull-apart. Bounded by NS-trending Yingxi fault, the transtensional areas mainly are the northwest part and along the eastern boundary of the basin. (2) From 42 to 21 Ma, the development of the main rift body in Yinggehai basin was mainly controlled by the southward slip and clockwise rotation of the Indochina block along the Red River fault zone, and the sedimentation was strengthened due to the sinistral transtension. In the east, the subsidence is deepened due to the dextral transtension. (3) From 21 to 10.4 Ma, the sinistral movement of the Indochina block slowed down to still. From 21 to 15.5 Ma, the northwest part of the basin began to inverse locally because of post-rift thermal subsidence of the whole basin. (4) From 10.4 Ma to present, the basin was affected by the dextral movement of the South China block along the Red River fault zone and thermal accident in a new phase at 5 Ma.

Key words: Yinggehai basin; tectonic evolution; strong subsidence; analogue modeling.

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(No. KZCX3-SW-234-3); 国家自然科学基金项目(No. 40406012).

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: zhensun@scsio.ac.cn

0 引言

莺歌海盆地是南海西北部一个北西走向的长菱形盆地,也是红河断裂海上延伸带上的第一个盆地(图 1).它向西北通过红河断裂与印藏碰撞带相连,向东与北东向的伸展裂陷带(北部湾和琼东南盆地)相接,因此莺歌海盆地的构造演化必然与印藏碰撞和红河断裂的走滑活动以及南海北部陆缘的裂陷过程密切相关,对莺歌海盆地构造演化过程的探讨将有助于我们更深入的认识东南亚新生代以来最壮观的 2 个构造系统的演化历史.而构造决定了沉积过程,莺歌海盆地自裂陷期以来的强烈沉降,导致盆地内堆积了巨厚的沉积物,最厚处达 17 km,快速充填导致盆地内发育了大规模的热泥流体底辟和超高压,造就了莺歌海盆地独特而复杂的底辟成藏系统(殷秀兰等, 2005),因此对莺歌海盆地构造演化—强烈沉降机制的研究将会对盆地的油气勘探起到重要的指导作用.

由于莺歌海盆地的巨厚沉积和强烈超压,从地震剖面上很难获得深部结构和构造的信息,因此对成盆机制的认识也存在分歧.目前主要有两种观点:一种是右旋成盆说,张启明和郝芳(1997)提出右旋拉分成盆模式,李思田和张启明(1997)进一步提出

莺歌海盆地在期间沿红河断裂、莺西断裂及马江断裂发生右旋转换伸展.之后由于地幔上涌引起盆地 NE-SW 向的伸展;另一种是左旋成盆观点,郭令智等(2001)提出莺歌海盆地主要在印支地块沿红河断裂带顺时针旋转挤出的应力背景下发育,中新世后随着印支地块运动的停止和华南地块的挤出发生了小规模右行走滑和张裂;Sun *et al.* (2003)用物理模拟结果论证了这种成盆模式的可行性.那么莺歌海盆地怎样发育和演化,盆地强烈沉降的机制是什么?下面我们根据盆地的断裂和结构分析,结合物理模拟实验探讨上述问题.

1 莺歌海盆地构造特点

1.1 莺歌海盆地的主要断裂系统

莺歌海盆地以临高隆起与西北陆上的河内盆地相隔.河内盆地是一个向南开口的 V 字形盆地,边界断裂是北西向红河断裂向海的分支,新生代最大沉积厚度约 8 km.而莺歌海盆地主要受到北西走向、北北西—近南北走向基底断裂带的控制,在盆地的西北部有 NE 向的基底断裂发育.其中北西走向断裂占主导优势,主要有盆地东侧的一号断裂带,盆地西北侧的红河断裂带的分支断裂,如红河断裂、沪江断裂、黑水河断裂,和盆地西侧的长山断裂等;北北西—近南北向的断裂有莺歌海盆地西北侧的莺西断裂等.

1.2 盆地结构

莺歌海盆地表现为受北西走向和近南北走向边界断裂带控制的大型菱形断陷,长宽比约 2.5 : 1.盆地西北部的断陷结构在始新世—早渐新世表现为复杂地堑式断陷(图 2, 剖面 1),晚渐新世—早中新世沉积层序内部存在构造正反转与沉积中心迁移现象,形成了近南北向的临高隆起(钟志洪等, 2004).根据反转构造从晚渐新世到中中新世向南和向东迁移的情况推断反转作用主要是受到越南隆起沿红河断裂向东南的左旋压扭作用,其左旋走滑位错大约为 50 km(钟志洪等, 2004).自中中新世(15.5 Ma)开始,盆地内部基本上无明显的活动断层发育,主要的活动断裂发育区从盆地内部迁移至一号断裂以东.

盆地中央新近系沉积层厚度大于 6 km,古近系的构造特征在地震资料上揭示较少,因此其断陷结构特征尚不清楚.从构造图(图 1)分析,盆地整体上仍然表现为受马江边界断裂与一号边界断裂限制

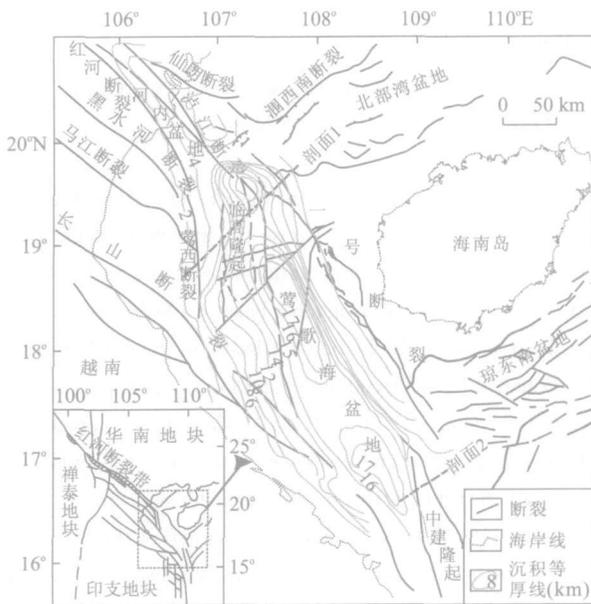


图 1 莺歌海盆地主要断裂结构和新生代沉积等厚图

Fig. 1 Major fault structures and thickness isometric of Cenozoic sedimentation in the Yinggehai basin

其中,沉积厚度等值线据 Clift and Sun (2006)

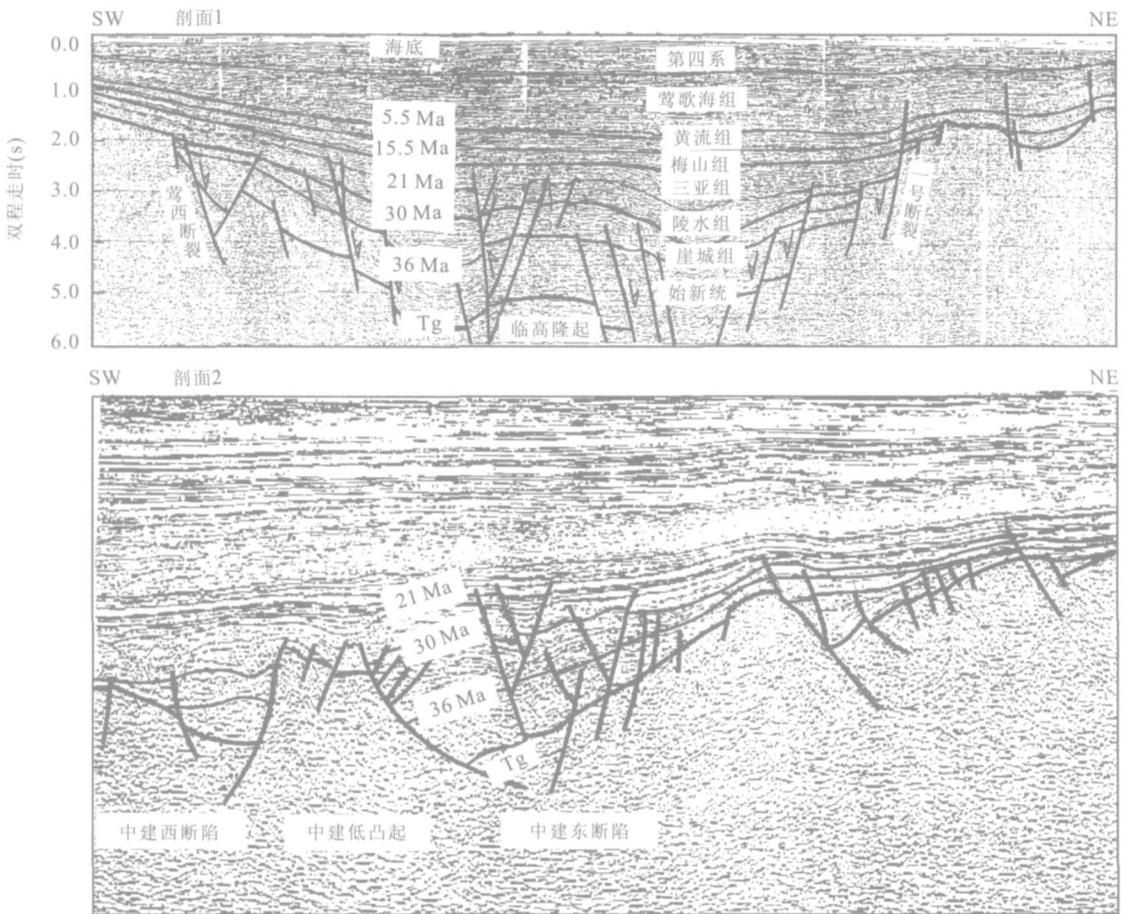


图2 莺歌海盆地的两条地震剖面

Fig.2 Two seismic profiles of the Yinggehai basin

剖面位置见图1, 其中剖面1解释据钟志洪等(2004); 剖面2解释据杨克绳(2000)

的大型北西向地堑结构. 从浅层发育的地震异常体走向判断, 大型地堑内部可能被一些北北西、近南北和北东走向的断裂复杂化(钟志洪等, 2004). 晚中新世—第四纪的沉积层序发育大量与泥岩和流体活动相关的底辟构造.

盆地南部表现为垒堑式裂隙结构(图2, 剖面2), 中建低凸起位于剖面中央, 边界断裂上见到花状构造, 剖面上见30~21 Ma期间地层发生轻微褶皱和反转, 强度自西向东减弱. 21 Ma以后, 中建隆起西侧无明显构造活动.

盆地北部与南部构造上略有差异, 在30 Ma以前为转换伸展阶段; 30~15.5 Ma为构造反转期; 15.5以后为构造平静期. 但盆地整体在21 Ma以后断裂活动明显减弱变少, 进入以热沉降为主的阶段.

1.3 新生代沉积厚度和莫霍面

莺歌海盆地发育了巨厚的新生代沉积, 最厚处达17 km, 存在南北2个深沉降中心(图1). 在盆地

西北部, 受南北向莺西断裂影响, 厚度等值线呈近南北走向, 盆地中南部等值线呈北西走向. 莫霍界面等值线分布具有类似的形态(图3), 盆地西北部的Moho等深线长轴呈近南北走向, 盆地中南部的Moho等深线长轴呈北西走向. 盆地边界断裂处基本上对应于莫霍面24 km的等值线. 在盆地中央, 新生代沉积最厚处达17 km, 此处莫霍面埋深约22 km, 地壳只有约5 km厚(龚再升等, 1997).

1.4 盆地沉降史

根据沉降史分析(龚再升等, 1997), 盆地经历了3期由快到慢的沉降过程(图4): 第一沉降幕的快速沉降期发生在50~45 Ma, 盆地西北部913393剖面最大沉降速率达550 m/Ma, 而盆地中部最大沉降速率可达700 m/Ma, 构造沉降速率达350 m/Ma(张启明, 1999); 之后沉降变慢, 在36~28 Ma期间沉降速率最低, 从30 Ma左右开始, 盆地西北部出现构造反转(郭令智等, 2001). 28~21 Ma(T70~

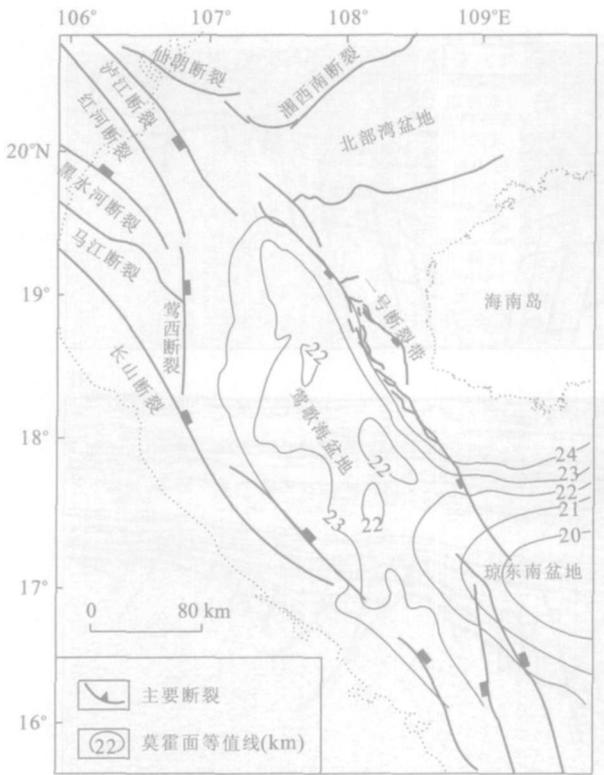


图 3 莺歌海盆地 Moho 面深度等值线图(据龚再升等编制, 1997)

Fig. 3 Moho isometric in the Yinggehai basin

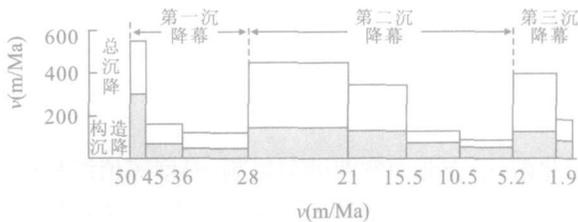


图 4 莺歌海盆地 913393 剖面沉降速率(龚再升等, 1997)
ig. 4 Subsiding rate on Profile 913393 of the Yinggehai basin

T60)期间出现第二快速沉降期, 最大沉降速率达 500 m/Ma, 构造沉降速率达 150 m/Ma, 之后沉降速率降低, 但 21~15.5 Ma 期间总沉降速率仍高达 350 m/Ma, 推测与该时期盆地整体进入热沉降期以及红河断裂仍有活动有关, 15.5 Ma 后沉降速率迅速降低. 5.2 Ma 左右出现第三期快速沉降, 总沉降速率高达 400 m/Ma, 但构造沉降速率只有 100 m/Ma 左右. 这一期的快速沉降可能受热事件影响较大, 推测南海北部转入主动裂谷阶段(钟志洪等, 2004).

2 盆地构造演化和强烈沉降机制的分析与物理模拟

2.1 物理模拟实验简介

地球上发育的张裂或挤压构造系统很少是纯正向(即应力方向与构造带走向垂直)的裂谷带或挤压带, 这是因为大部分地质体都经历了多期活动的历史, 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, 在新构造事件下, 激活老的软弱破碎带通常要比产生新的破裂带容易得多, 老的先存结构相互连接, 成为应力应变的集中带, 控制新一期构造带的位置、走向和构造样式. 因此构造活动通常会选择在最薄弱的带上发生, 这个带被称为先存软弱带.

实验模型由放置在刚性底板上有有机材料硅酮(韧性层)和各种颜色互层(每层厚约 0.5 cm)的石英砂(脆性层)构成(Davy and Cobbold, 1991; Tron and Brun, 1991). 刚性底板按照先存软弱带剪开, 构成变形的动力载体.

变形前脆性层和韧性层的厚度比设为 2 cm : 1 cm(假设为正常地壳)(Davy and Cobbold, 1991; Tron and Brun, 1991). 模型与地质体尺寸的比例尺为 10^{-6} . 干燥的石英砂常被用来模拟脆性的上地壳, 密度在 1.4 g/cm^3 左右, 粒径从 $200 \sim 300 \mu\text{m}$; 室温下($25 \text{ }^\circ\text{C}$)硅酮的粘度大约 $10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 密度 1.3 g/cm^3 , 是一种非牛顿流体, 用于模拟韧性变形的下地壳. 变形的过程中, 沉降区用有色石英砂充填. 实验完成后, 用水喷湿模型, 切剖面进行观察.

2.2 莺歌海盆地构造演化机制分析和模拟

(1)莺歌海盆地构造演化机制分析. 如前所述, 关于莺歌海盆地的演化目前有右旋成盆说和左旋成盆说两种观点. 到底哪一种观点正确? 莺歌海盆地究竟经历了怎样的演化历史呢?

根据板块汇聚速率变化曲线(郭令智等, 2001), 印度与欧亚板块自晚古新世开始发生弧-陆软碰撞, 42 Ma 左右进入陆陆接触的硬碰撞阶段(Lee and Lawver, 1995). 目前同位素方法揭示的红河断裂上最早的压剪运动为 42 Ma(Wang *et al.*, 2001). 多数学者根据 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果, 认为红河断裂于 35 Ma 以后开始活动(Harrison *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 1998; Leloup *et al.*, 2001). Gilley *et al.* (2003)根据高温同构造变质岩中石榴

石的放射性年龄, 提出红河断裂的走滑活动大约开始于 34 Ma. 而莺歌海盆地最早的沉积为始新世, 甚至更早(孙家振等, 1995; 张启明, 1999), 那么莺歌海盆地 42 Ma 以前, 甚至 34 Ma 以前裂陷作用的动力是什么呢?

根据构造环境推断, 有 2 种可能: (1) 由印藏碰撞所导致的印支地块左旋挤出作用. 同位素记载的是矿物冷却至一定封闭温度的时间, 因此同位素定年通常滞后于断裂活动的真实年龄, 尤其是在红河断裂早期处于压扭条件下, 断裂带上矿物的折返比较慢, 同位素确定的时间比断裂带活动的时间可能滞后较长, 所以红河断裂可能较早就开始了左旋走滑, 造成莺歌海盆地的左旋拉分; (2) 南海北部陆缘裂解对莺歌海盆地产生的右旋转换伸展应力场. 根据对南海北部陆缘的研究(茹克, 1988; 朱伟林和江文荣, 1998), 北部湾盆地最早一期裂陷活动发生在晚白垩纪(约 65 Ma), 之后还发生了珠琼运动一幕(49 Ma 开始)和珠琼运动二幕(39 Ma 开始)共 3 期大的被动陆缘伸展裂解运动, 莺歌海盆地可能受到南海北部陆缘伸展导致的南东向右旋转换伸展应力控制发生了始新世的裂陷活动.

实际上无论第一种情况是否成立, 我们都应该考虑莺歌海盆地东侧北部湾盆地伸展作用对莺歌海盆地构造发育的影响, Sun *et al.* (2003) 对第一种情况已进行了模拟实验研究并进行了细致的讨论, 证明了其可行性, 同时也指出存在不完全吻合之处, 如盆地西北部未发育清晰的近南北向断裂, 早期的沉降中心走向为北北西, 与莺盆的近南北向有出入; 本文将考察第二种情况. 即先经历北部湾伸展导致的右旋转换伸展作用, 再经历它与印支地块顺时针左旋转换伸展的共同作用, 通过物理模拟实验来观察在此过程中莺歌海盆地的变形特点.

(2) 莺歌海盆地构造演化机制物理模拟. 根据莺歌海盆地的发育特点及其与北部湾盆地的接触关系, 模型中设置 2 条先存软弱带 (F_1 和 F_2) (图 5, A1), 分别为控制莺歌海盆地发育和控制北部湾盆地发育的先存软弱带. 根据 Yang and Basse (1993) 的研究, 印支地块新生代发生了约 15° 的顺时针旋转; 因此 F_1 应为现今盆地走向逆时针旋转了 15° 后的走向; F_2 断裂的初始走向设置为 $NE45^\circ$, 即北部湾盆地早期断裂(如涠西南断裂)主走向具体参数见表 1. 模型中 1 cm 相当于地质上 10 km, 即模型与地质体大小的比例设为 5×10^{-7} . 刚性底板被分为 3

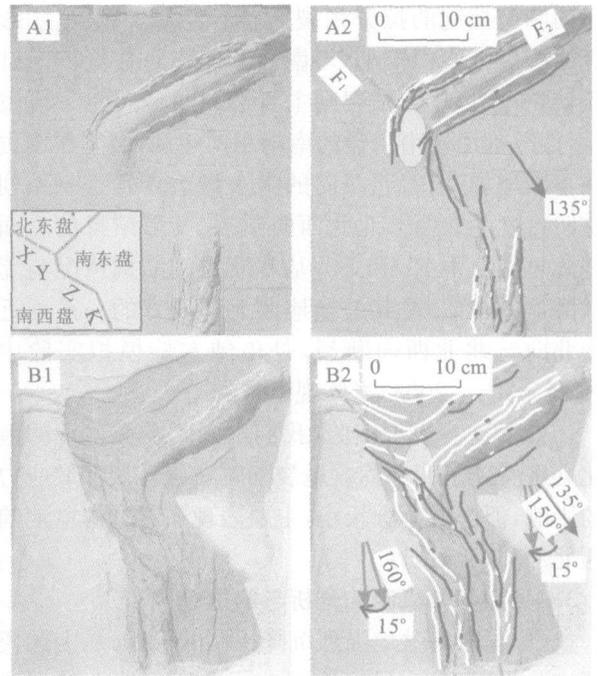


图 5 莺歌海盆地先右旋后左旋转换伸展作用下变形的表面图

Fig. 5 Surface view of the experiment after dextral transtension and sinistral transtension in turn 其中, A2、B2 分别为 A1、B1 的解释结果, 虚线指示底板

表 1 莺歌海盆地构造演化模拟模型参数

Table 1 Modeling parameters used in the tectonic evolution experiment of Yinggehai basin

模拟对象	实验参数
NW 走向初始软弱带 (F_1)	自北向南分四段 X, Y, Z, K, 走向分别为 $NW 300^\circ - NW 345^\circ - NW 300^\circ - NW 340^\circ$
NE 走向初始软弱带 (F_2)	走向 $NE45^\circ$
上地壳及同构造沉积	松散石英砂, 粒径 $200 \sim 300 \mu m$, 内摩擦角 $30^\circ \sim 32^\circ$, 密度 $1.4 g/cm^3$
韧性下地壳	红色硅酮, $28^\circ C$ 时粘度 $10^5 Pa \cdot s$, 密度 $1.44 g/cm^3$

块, 其中北东盘代表华南地块, 在整个变形过程中保持不动, 南东盘代表北部湾南部地块, 南西盘代表华南地块. 根据北部湾的断裂发育历史研究(朱伟林和江文荣, 1998), 加载设置为: 第一步受到右旋转换伸展应力场控制, 南东盘向 $SE135^\circ$ 伸展约 2 cm, 第二步向 $SE150^\circ$ 方向顺时针旋转约 15° 并走滑位移 10 cm; 同时南西盘向 160° 方向走滑并顺时针旋转约 15° , 走滑位移约为 12 cm.

模拟实验表明, 当受到右旋转换伸展应力场控制时, 沿着北北西走向的 Y 段初始软弱带出现近南

北向断裂控制的拉分张裂区(图 5, A2 中灰色阴影区), 张裂区面积较小. 当南西盘向南东左旋顺时针旋转挤出时, 拉分张裂则主要沿北西走向的 Z 段发生, 西北部由于南东盘的南南东向运动, 裂隙作用也在不断增加, 沿着北西向的南东盘边界发育一系列左阶排列的北西—北北西向断裂. 变形结果的表面样式见图 5 中 B1 和 B2, 基本断裂和结构情况与莺歌海盆地相似. 尤其是盆地西北部发育的一系列近南北向—北北西向断裂, 是单纯左旋模拟实验中 (Sun *et al.*, 2003) 未体现出来的.

根据这一模拟实验, 我们推断莺歌海盆地的演化必定受到了北部湾盆地裂陷时右旋转换伸展应力的影响, 但影响范围较小, 主要表现在莺歌海盆地的西北部和东部边界.

2.3 强烈沉降机制的分析与物理模拟

(1) 莺歌海盆地强烈沉降机制的分析. 从上述模拟实验可以看出, 尽管作用在莺歌海盆地上的走滑位移大于北部湾的伸展位移, 但北部湾盆地的垂向沉降规模远大于莺歌海盆地, 这一模拟结果与地质情况相差较远. 根据地球物理结果, 莺歌海盆地内部裂陷期沉积达 6 000 m 以上, 最大厚度大于 9 000 m (龚再升等, 1997). 而北部湾盆地裂陷期厚度最大只有 5 000 m 左右. 沉降速率分析表明(图 4), 莺歌海盆地在 50 ~ 45 Ma 期间为快速沉降期, 第二快速沉降期的最大沉降速率达 500 m/Ma, 尽管后期构造沉降所占的比重将越来越小, 但构造沉降速率仍达 150 m/Ma 以上; 北部湾盆地最大沉降速率为 500 m/Ma, 构造沉降速率不到 150 m/Ma (龚再升等, 1997); 珠江口盆地珠一坳陷除恩平 17 洼外, 第一张裂期(始新世)的沉降速率大部分小于 400 m/Ma, 第二张裂期(渐新世)的沉降速率大部分小于 300 m/Ma (陈长民等, 2003); 因此莺歌海盆地的沉降速率远大于北部湾盆地和珠江口盆地珠一坳陷. 我们推测除高的热沉降作用以外, 一定有其他原因导致莺歌海盆地的巨厚沉积充填和高裂陷期沉积速率.

根据刚性古构造地块在变形中作用的模拟(孙珍等, 2006), 我们发现刚性构造地块(如昆嵩地块、郑和地块)将导致垂向沉降变形作用在刚性构造块体附近加剧. 这是因为刚性地块不变形, 导致应变面积减小, 从而使一定量的应变全部集中在邻近的区域上. 印支地块是由古老块体组成的 (Tran *et al.*, 2001), 新生代变形期间未发生明显减薄, 不同于南海北部陆缘的热软化特征 (Clift *et al.*, 2002), 推测

印支地块的刚性特征可能是导致莺歌海盆地高沉降速率的原因. 另外还可能有 3 种解释: (1) 莺歌海盆地初始裂陷的时间早于 50 Ma, 造成 50 ~ 45 Ma 期间平均沉降速率估算过高; (2) 之前和同期受到右侧南海陆缘南东向伸展裂陷的右旋应力场影响; (3) 莺歌海盆地具有较厚的脆性地壳(后面详细讨论).

到底是哪种或哪几种原因, 我们先作个简单的分析: 根据定年结果, 未发现红河断裂在 42 Ma 前走滑的证据, 而根据 2.2 节中的模拟实验, 北部湾盆地裂陷时导致莺歌海盆地发生右旋转换伸展, 因此莺歌海盆地可能从晚白垩—古新世就开始裂陷作用, 计算沉降速率时使用了缩短的沉降时间可能是造成第一张裂期(50 ~ 45 Ma) 沉降速率异常高的原因. 由于莺歌海盆地的定年存在不确定性, 所以第一种解释可能有一定的合理性, 但只限于解释 45 Ma 以前的高沉降速率, 无法解释之后仍然偏高的沉降速率和巨厚裂陷期充填的原因.

根据 2.2 节中的模拟实验, 右旋转换伸展对莺歌海盆地的影响范围较小, 主要影响了盆地西北部和东部边界, 而莺歌海盆地沉降速率最大和沉积最厚的区域位于盆地中南部, 因此第二种解释不太合理.

根据 Petrunin and Sobolev (2006) 对狭窄拉分盆地的三维热动力模拟计算, 在走滑位移和断层摩擦系数一定的条件下, 拉分盆地的沉积厚度主要受控于脆性层(上地壳)的厚度, 脆性层厚度越大, 盆地最大沉积厚度就越大; 死海 17 Ma 以来的裂陷沉积为 8 km, 现今盆地下的脆性层厚度为 20 ~ 22 km, 最大处达 27 km; 阿迦巴湾盆地 (the Gulf of Aqaba basin) 具有最大 5 km 的沉积厚度, 盆下脆性层厚度为 12 km. 莺歌海盆地裂陷期最大沉积厚度为 9 km, 按照 Petrunin and Sobolev (2006) 的计算, 盆下应有至少 20 ~ 22 km 左右的脆性层厚度, 即使假设裂陷期沉积只有 5 km 是由地壳减薄引起的, 壳下的脆性地壳厚度也应有 12 km 左右, 但现今盆地下地壳的总厚度不过 5 ~ 12 km; 而且根据 Petrunin and Sobolev (2006) 的计算, 脆性地壳和上地幔之间必须存在几千米的韧性层作为拆离带, 拉分盆地才能形成, 因此第三种解释不能成立, 即莺歌海盆地不具有足够厚的脆性地壳来形成现在莺歌海盆地的厚裂陷沉积. 那么印支地块的刚性地块作用能否成立呢? 让我们来做一个实验分析.

(2) 莺歌海盆地强烈沉降机制的物理模拟实验分析. 与 2.2 节中的模型相比, 本模型的范围扩大到

表 2 设置刚性地块的模型参数

Table 2 Parameters used in the experiment with rigid massif

模拟对象	实验参数
NW 走向初始软弱带(F ₁)	自北向南分 3 段 X, Y, Z, 走向分别为 NW315°, NW340°, NW310°
NE 走向初始软弱带(F ₂)	自西向东分两段 K, L, 走向分别为 NE40°, NE60°
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°, 密度 1.4 g/cm ³
韧性下地壳	红色硅酮 28 ^o 时粘度 10 ⁵ Pa · s 密度 1.44 g/cm ³
刚性古构造地块	黑色硅酮, 28 °C 时粘度约为 10 ⁹ Pa · s

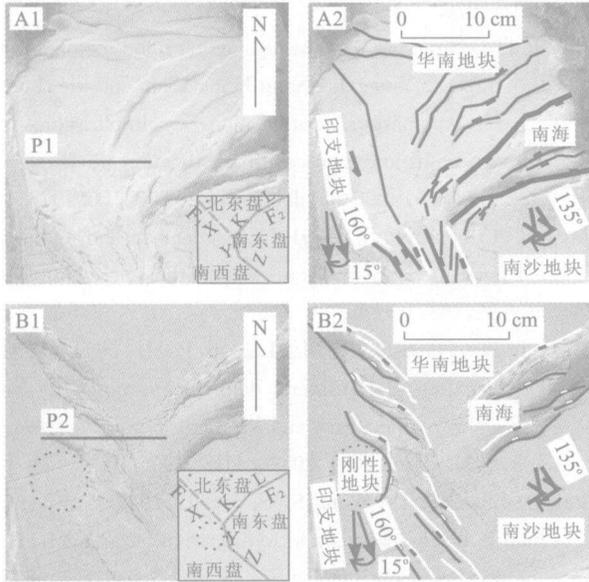


图 6 印支地块上未设置(A1, A2)和设置了刚性构造地块(B1, B2)情况下表面变形样式的对比

Fig. 6 Surface view comparison between model without and with rigid massif on Indochina block

A2、B2 分别为 A1、B1 的解释结果, 虚线椭圆指示刚性地块的位置, 白色实线为南倾断裂, 黑色实线为北倾断裂, 箭头指示地块运动方向

整个南海和印支东部地区, 以便考虑刚性的印支地块对莺歌海盆地沉降作用的影响。模型中设置了两条初始软弱带 F₁ 和 F₂, 将模型分为 3 块, 北东盘代表华南地块, 南东盘代表南沙地块, 南西盘代表印支地块, 具体参数见表 2。两个模型的参数设置和加载方式一致, 且印支盘上的加载方式与 2.2 节中的模拟实验相同, 只是在模型中增加了一个圆柱状的刚性地块(图 6 中 B1, B2), 刚性地块镶嵌在下地壳内, 因此设置刚性地块的区域具有较薄的韧性下地壳和正常上地壳, 代表较冷和强度较大的地壳。对比 2 个实验可以发现, 当印支地块上沿着走滑边界存在较

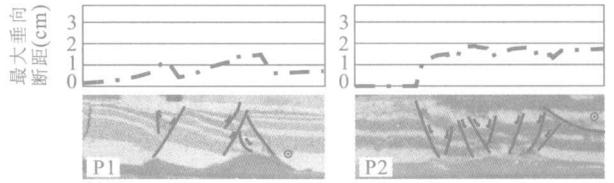


图 7 印支地块上未设置(P1)和设置了刚性构造地块(P2)情况下最大垂向断距分布对比

Fig. 7 Maximum vertical offset along profile of models without (P1) or with (P2) rigid massif

黑色实线代表断层, 箭头指示断层运动方向; 剖面位置见图 6 中 P1 和 P2

刚性的地块时, 刚性地块的不变形导致邻区应变面积减小和应变集中, 从而导致刚性地块北部和东部以及南部的变形作用都明显增强, 裂陷作用的垂向沉降增加约 1/3, 且沉降区面积也明显增加(图 7)。断裂形态明显受刚性地块形态的影响, 如伴随印支地块的南东向顺时针旋转走滑, 在刚性地块北部, 弧形的地块边界导致菱形深裂陷带的发育。而在未设置刚性地块的模型中, 北西向初始软弱带的北部和中部裂陷作用较弱。

根据上述对比实验, 我们发现印支地块或之上刚性地块的存在对莺歌海盆地的强烈沉降具有重要的贡献, 可能是莺歌海盆地裂陷期强烈沉降和高沉降速率的重要原因之一。

3 结论

3.1 主要结论

(1) 莺歌海盆地早期(42 Ma 以前)主要受到南海北部陆缘(主要是北部湾盆地)裂解造成的右旋转换伸展作用的影响, 但影响范围较小, 主要为莺歌海盆地西北部和东部边界。

(2) 莺歌海盆地新生代发生了快速沉降, 盆内充填了最厚达 17 km 的巨厚沉积, 根据模拟实验, 印支地块或之上刚性地块的存在对莺歌海盆地的强烈沉降具有重要的贡献, 可能是造成莺歌海盆地裂陷期强烈沉降和高沉降速率的重要原因之一。

3.2 莺歌海盆地构造演化阶段

结合我们早期对莺歌海盆地的模拟研究(Sun *et al.*, 2003; 孙珍等, 2003; Sun *et al.*, 2004), 莺歌海盆地的演化大致可以分为以下 4 个主要阶段:

(1) 右旋转换伸展阶段(> 42 Ma)。根据板块运动资料, 印藏碰撞在晚古新世开始, 但红河断裂上最

早的左行走滑记录出现在至少 42 Ma 以后。南海北部陆缘至少从晚白垩纪就开始南东向伸展裂隙, 北部湾盆地开始发育(茹克, 1988; 朱伟林和江文荣, 1998), 北部湾盆地以南地块的南东向运动导致莺歌海盆地整体北西走向的初始断裂经历了右旋的走滑拉分, 莺歌海盆地进入裂陷期。裂陷作用主要受到近南北向断裂的控制, 裂陷面积较小。裂陷区主要位于现今莺歌海盆地的西北部。

(2) 主要受控于印支地块左行旋转走滑作用的裂陷阶段(42~21 Ma)。42 Ma 以后, 印支地块向南东方向被顺时针旋转挤出, 印支地块的挤出方向约为 160°(洪汉净等, 1998), 莺歌海盆地在左旋拉分应力场控制下发育了主体裂陷体系, 印支地块(或之上的昆嵩地块等)的刚性构造性质导致莺歌海盆地的快速裂陷和急剧沉降, 东侧受到右旋转换伸展应力场的叠加影响加剧了盆地的沉降。30 Ma 之后, 印支地块停止顺时针旋转, 盆地西北部受印支地块的南南东向挤压逐渐开始反转。

(3) 印支地块左行走滑逐渐停止阶段(21~10.4 Ma)。21 Ma 之后, 莺歌海盆地南部的断裂活动已基本停止, 盆地北部的构造反转仍在继续进行, 直至 15.5 Ma 左右才完全停止, 盆地西北部在此期间发生局部反转褶皱。推断此期间红河断裂带的左行走滑逐渐变缓至停止, 根据弥度等变质岩带位错情况, Leloup *et al.* (1993) 提出 23~18 Ma 之间红河断裂带左旋滑移仅 15~20 km, 莺歌海盆地在 21~15.5 Ma 期间构造沉降速率降至 100 m/Ma 左右, 推测莺歌海盆地整体从 21 Ma 开始已进入热沉降为主的时期, 但总沉降速率仍高达 350 m/Ma, 推测红河充足物源造成的快速的沉积充填带来的压实沉降、负载沉降等因素对总沉降速率贡献较大。

(4) 受右旋走滑运动和热事件影响的新一期构造活动期(10.4 Ma)。尽管陆上的证据表明, 在约 5 Ma 后, 红河断裂才开始表现出明显的右旋走滑(Allen *et al.*, 1984), 但北部湾盆地北部和西北部在中中新世以后, 就已开始发生反转褶皱, 根据卷入褶皱的地层的变形情况和褶皱变形自北西向南东减弱的情况, 推测反转大致发生在 10.4 Ma 左右, 反转挤压的应力来自华南地块沿红河断裂的右行走滑(谢文彦等, 2007)。5 Ma 以后, 莺歌海和琼东南盆地出现新一期的热活动, 莺琼交接区沉降规模最大, 导致沉积跨过分界断裂和隆起, 将两盆地连接为一个盆地。

References

- Allen, C. R., Gillespie, A. R., Han, Y., et al., 1984. Red River and associated faults, Yunnan Province, China: Quaternary geology, slip rates and seismic hazard. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95: 686–700.
- 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, 43–76 (in Chinese).
- Clift, P. D., Lin, J., Barckhausen, U., 2002. Evidence of low flexural rigidity and low viscosity of lower continental crust in the South China Sea. *Mar. Pet. Geol.*, 19: 951–970.
- Clift, P. D., Sun, Z., 2006. The sedimentary and tectonic evolution of the Yinggehai-Song Hong basin and the southern Hainan margin, South China Sea: Implications for Tibetan uplift and monsoon intensification. *J. Geophys. Res.*, 111(B6): B06405. doi: 10.1029/2005JB004048.
- Davy, P., Cobbold P. R., 1991. Experiment on shortening of a 4-layer model of the continental lithosphere. *Tectonophysics* 188: 1–25.
- Gilley, L. D., Harrison, T. M., Leloup, P. H., et al., 2003. Direct dating of left-lateral deformation along the Red River shear zone, China and Vietnam. *J. Geophys. Res.*, 108, 2, 2127, doi: 10.1029/2001JB001726.
- Gong, Z. S., Li S. T., Wang S. S., et al., 1997. Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea. Science Press Beijing, 81–89 (in Chinese).
- Guo, L. Z., Zhong Z. H., Wang, L. S., et al., 2001. Regional tectonic evolution around Yinggehai basin of South China Sea. *Geological Journal of China Universities*, 7 (1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Harrison, T. M., Leloup, P. H., Ryerson, F. J., et al., 1996. 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*. Cambridge Univ. Press New York, 208–226.
- Hong, H. J., Li, T., Guo, S. M., et al., 1998. Research on tectonic composite of the Yinggehai and the Qiongdongnan basin and its relation with oil & gas. Report of China Offshore Oil Nanhai West Corporation (in Chinese).
- Lee, T. Y., Lawver, L. A., 1995. Cenozoic plate reconstructions of Southeast Asia. *Tectonophysics* 25: 8–138.
- Leloup, P. H., Arnaud, N., Lacassin, R., et al., 2001. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE

- Asia. *J. Geophys. Res.*, 106: 6683—6732.
- Leloup P. H., Harrison T. M., Ryerson, F., et al., 1993. Structural, petrological and thermal evolution of a Tertiary ductile strike-slip shear zones, Diancang Shan, Yunnan. *J. of Geophys. Res.*, 98: 6715—6743.
- Li S. T., Zhang Q. M., 1997. Basin forming mechanism and its dynamics types. In: Gong, Z. S., Li S. T., Wang, S. S., et al., eds., Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea. Science Press Beijing, 111—121 (in Chinese).
- Petrumin, A., Sobolev, S. V., 2006. What controls thickness of sediments and lithospheric deformation at a pull-apart basin? *Geology*, 34(5): 389—392 doi: 10.1130/G22158.1.
- Ru K., 1988. The development of superimposed basin on the northern margin of the South China Sea and its tectonic significance. *Oil and Gas Geology*, 9(1): 12—18. (in Chinese with English abstract).
- Sun, J. Z., Li L. B., Yang, S. G., et al., 1995. Evolution of transform-extension in Yinggehai basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20(3): 243—249 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Zhong Z. H., Zhou D., et al., 2003. Deformation mechanism of the Red River fault zone during Cenozoic and the experimental evidences related to Yinggehai basin Formation. *Journal of Tropical Oceanology*, 22(2): 1—9.
- Sun, Z., Zhong Z. H., Zhou, D., et al., 2004. Experimental constraints on Cenozoic development of Ying-Qiong basin in NW South China Sea. In: Clift, P. D., Wang, P. X., Kuhnt, W., et al., eds., Continent-ocean interactions within East Asian marginal seas. AGU Monograph Series 149, Washington D. C., 109—120.
- Sun, Z., Zhou, D., Zhong, Z. H., et al., 2003. Experimental evidence for the dynamics of the formation of the Yinggehai basin, NW South China Sea. *Tectonophysics*, 372: 41—58.
- 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 (Series D)*, 49(10): 1053—1069.
- Tran, N. N., Yuji, S., Kentaro, T., et al., 2001. First SHRIMP U—Pb zircon dating of granulites from the Kontum massif (Vietnam) and tectonothermal implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19: 77—84.
- Tron, V., Brun, J. P., 1991. Experiments on oblique rifting in brittle-ductile systems. *Tectonophysics* 188: 71—84.
- Wang J. H., Yin, A., Harrison, T. M., et al., 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 188: 123—133.
- Wang P. L., Lo, C. H., Lee, T. Y., et al., 1998. Thermo-chronological evidence for the movement of the Ailao-shan-Red River shear zone: A perspective from Vietnam. *Geology*, 26: 887—890.
- Xie, W. Y., Sun, Z., Zhang, Y. W., et al., 2007. The dynamic and hydrocarbon accumulation analysis of the inversion structures on the northern marginal basins of the South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences* (in press, in Chinese with English abstract).
- Yang K. S., 2000. Prediction of forming evolution and type of reservoir of Yinggehai basin. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 7(2): 4—11 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z., Basse, 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: 525—552.
- Yin X. L., Ma, Y. S., Feng, X. Y., et al., 2005. Thermal stresses and their effects during the deep hot fluids penetrating upward in DF-1 diapiric area, Yinggehai basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 83—88 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q. M., Hao, F., 1997. Evolution and hydrocarbon system in Ying-Qiong basin. *Science in China (Series D)*, 27(2): 149—154 (in Chinese).
- Zhang, Q. M., 1999. Evolution of Yinggehai-Qiongdongnan basin and its tectonic-thermal mechanics. *Natural Gas Industry*, 19(1): 12—19 (in Chinese with English abstract).
- Zhu W. L., Jiang, W. R., 1998. Relation between fractures and hydrocarbon reservoirs in Weixinan sag. *Acta Petroleum Sinica*, 19(3): 6—11 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Z. H., Wang L. S., Xia B., et al., 2004. The dynamics of Yinggehai basin formation and its tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 78(3): 302—309 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈长民, 施和生, 许仕策, 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, 43—76.

- 龚再升, 李思田, 王善书, 等, 1997. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社, 81—89.
- 郭令智, 钟志洪, 王良书, 等, 2001. 莺歌海盆地周边区域构造演化. 高校地质学报, 7(1): 1—12.
- 洪汉净, 李涛, 虢顺民, 等, 1998. 莺—琼盆地构造复合及其与油气关系的研究. 中海石油西部公司研究报告.
- 李思田, 张启明, 1997. 盆地形成机制及其动力学类型. 龚再升, 李思田, 王善书, 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, 111—121.
- 茹克, 1988. 南海北部边缘叠合式盆地的发育与其大地构造意义. 石油与天然气地质, 9(1): 21—31.
- 孙家振, 李兰斌, 杨世恭, 等, 1995. 转换—伸展盆地—莺歌海盆地的演化. 地球科学——中国地质大学学报, 20(3): 243—249.
- 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 等, 2003. 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, 22(2): 1—9.
- 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), 36(9): 797—810.
- 谢文彦, 孙珍, 张一伟, 等, 2007. 南海北部陆缘盆地新生代反转构造动力学与成藏分析. 地球科学——中国地质大学学报, 待刊.
- 杨克绳, 2000. 莺歌海盆地几个地质问题的探讨. 断块油气田, 7(2): 4—11.
- 殷秀兰, 马寅生, 冯向阳, 等, 2005. 莺歌海盆地东方 1—1 底辟区深部热流体穿层的热应力及其效应. 地球科学——中国地质大学学报, 30(1): 83—88.
- 张启明, 1999. 莺琼盆地的演化与构造—热体制. 天然气工业, 19(1): 12—19.
- 张启明, 郝芳, 1997. 莺—琼盆地演化与含油气系统. 中国科学(D), 27(2): 149—154.
- 钟志洪, 王良书, 夏斌, 等, 2004. 莺歌海盆地成因及其大地构造意义. 地质学报, 78(3): 302—309.
- 朱伟林, 江文荣, 1998. 北部湾盆地涠西南凹陷断裂与油气藏. 石油学报, 19(3): 6—11.