

## 琼东南盆地岩石圈特征的构造模拟约束

吴哲<sup>1</sup>, 杨风丽<sup>1</sup>, 吴建勋<sup>2</sup>

(1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 2. 江苏省地球化学勘查与海洋地质调查研究院, 南京 210007)

**摘要:** 琼东南盆地是晚始新世时期发育于南海北缘的伸展性盆地。本文在利用盆地内区域2D地震资料构造解释的基础上, 运用基于弹性梁模型和挠曲均衡原理的2D构造模拟软件对琼东南盆地岩石圈结构特征进行模拟。研究发现: 琼东南盆地地区的有效弹性厚度在1~5 km, 最佳取值为3 km; 拉张因子在1.3~1.5, 其中裂后阶段反演模拟的拉张因子为1.5, 裂陷阶段正演模拟的拉张因子为1.3左右。最后对红河断裂新生代的的活动以及南海扩张运动对模拟产生的可能影响进行了分析与讨论。

**关键词:** 琼东南盆地; 有效弹性厚度; 拉张因子; 红河断裂; 岩石圈结构模拟

中图分类号: P554

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2010)04-0483-09

## Tectonic Modeling Constraints on Lithospheric Characteristics of the Qiongdongnan Basin

WU Zhe<sup>1</sup>, YANG Feng-li<sup>1</sup>, WU Jian-xun<sup>2</sup>

(1. Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Jiangsu Research Institute of Exploration Geochemistry and Marine Geology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** The Qiongdongnan basin is an extensional basin formed in Late-Eocene. In this study, based on the flexure isostasy principle and flexural cantilever model, we utilize 2D structural simulation software and calculate the effective elastic thickness value ( $T_e$ ) and the extensional factors on 2D interpreted seismic profiles. The results show that the effective elastic thicknesses vary in the range of 1-5 km, and their optimum value is 3 km. The extensional factors change between 1.3 and 1.5, about 1.5 for the post-rift period with forward modeling, and about 1.3 for the syn-rift period with inverse modeling. Finally, we discuss the possible influential factors of the activity of the Red River fault in the Cenozoic and the South China Sea spreading.

**Key words:** Qiongdongnan basin; effective elastic thickness; stretch factor; Red River fault; modeling of lithospheric structure

这一认识多年来已有效弹性厚度和拉张因子是表征伸展盆地形成机制和演化特征的二个重要参数, 受到人们的重视 (Watts, 2001; 付永涛等, 2005; 金煜和姜效典, 2002)。近几年南海成为边缘海形成演化研究的热点地区, 丁巍伟等 (2009) 通过构造平衡剖面的方法计算得出南海中北部从古新世到渐新世的拉张量为8%; 佟殿君等 (2009) 通过构造模拟研究认为琼东南盆地

整个岩石圈的伸展系数由陆架到陆坡深水盆地从1.2逐渐增大到4; 张云帆等 (2007) 认为琼东南盆地拉张因子在2~3之间, 由西南向东北变小, 与盆地走向一致; Lin和Watts (2002) 利用自由空间重力异常、考虑表面荷载和埋藏荷载的基础上计算得出南海大陆架的有效弹性厚度应该在13 km; Clift和Lin (2001) 运用响应函数方法得出南海周缘地区的有效弹性厚度在应该在10 km以

收稿日期: 2010-05-10; 修回日期: 2010-10-18

基金项目: 863计划“深水油气盆地综合评价系统及综合评价技术-1”(2006AA09A101-0202-1)资助

作者简介: 吴哲, 男, 1986年出生, 在读硕士研究生, 主要从事含油气盆地分析、盆地模拟的研究; E-mail: wuzhemelody@126.com

内,并且最好是1~3 km之间,同时根据地震剖面和测井计算得出珠江口盆地总的地壳拉张因子为1.4; Westaway (1994) 计算出珠江口盆地总的拉张因子为1.8,其中上地壳最大拉张因子为1.3; Xie (2006) 认为琼东南地区分为两期裂陷,第一期拉张因子1.2~1.6,第二期的拉张因子为1.1; 龚再升等 (1997) 计算琼东南盆地总的拉张因子为1.7~2.0。在岩石圈的有效弹性厚度模拟和计算方面,目前虽然有多种方法,如导纳法 (Watts, 2001)、谱相干函数法 (袁炳强等, 2002)、正演法 (Stewart et al., 1997; Hartly et al., 1996) 和三维空间域法 (金煜和姜效典, 2002) 等,但是从弹性梁模型和挠曲均衡原理角度对岩石圈有效弹性厚度、拉张因子进行模拟研究的还较少,尤其对于琼东南盆地这方面的研究尚未见报道。

本次研究利用琼东南盆地内区域三条地震-地质解释剖面,在盆地形成演化分析的基础上,探讨基于弹性梁模型和挠曲均衡原理的正反演模拟软件 (Flex Decomp和Stretch) (Kusznir et al., 1991),采用二维正反演相结合的模拟分析方法,对南海西北部琼东南盆地的有效弹性厚度、拉张因子等进行了定量模拟研究,以期深化对琼东南盆地形成演化的认识。

## 1 模拟原理和方法

Mckenzie (1978) 提出纯剪模型,认为大陆岩石圈在张性应力场作用下可以均匀减薄,断层活动局限于上地壳,下地壳和地幔呈塑性拉伸变形。Kusznir等 (1991) 及Kusznir和Ziegler (1992) 在Mckenzie模型的基础上添加了挠曲均衡的机制,并且考虑上地壳的脆性断裂对伸展盆地的影响作用,构建应用于伸展盆地和被动大陆边缘的弹性梁模型。模型剖面包括三个部分:由于断裂作用变形的脆性上地壳;由于纯剪塑性模式变形的韧性下地壳;由于纯剪模式变形的韧性岩石圈地幔。基于该模型的二维模拟软件,考虑了岩石圈的强度、岩石圈对于沉积荷载的响应、挠曲均衡、压实、沉积荷载、侵蚀和岩石圈的热扰动等因素的影响。相对于Airy均衡模型,只是遵循几何学上守恒原则的平衡剖面研究更具有优越性。

运用该模型进行的模拟研究可以计算出岩石

圈的拉张量、拉张因子、有效弹性厚度、基底抬升、剥蚀量和与张裂作用相关的热流值。拉张因子的计算公式为:

$$\beta = L_1/L_0 \quad (1)$$

其中上地壳的原始长度为 $L_0$ ,经伸展构造变形后的长度为 $L_1$ 。

通过挠曲回剥后的地层厚度计算公式为 (Kusznir and Ziegler, 1992):

$$Y = \left[ Y' \left( \frac{\rho_{\text{地壳}} - \bar{\rho}_c}{\rho_{\text{地壳}} - \rho_*} \right) - \Delta_{\text{海}} \left( \frac{\rho_*}{\rho_{\text{地壳}} - \rho_*} \right) + (W_d - \Delta_{\text{海}}) \right] \times \left[ \frac{(\rho_{\text{地壳}} - \bar{\rho}_c)}{\rho_{\text{地壳}} - \bar{\rho}_c + \frac{D}{E} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2} \right] \quad (2)$$

其中 $Y$ 为回剥后的厚度, $Y'$ 为回剥前的厚度, $W_d$ 为古水深的深度; $\Delta_{\text{海}}$ 为海平面的变化, $\lambda$ 的数值为盆地宽度的两倍, $D$ 为岩石圈的挠曲刚度。依据 $T_e$ 和弹性挠曲刚度 $D$ 之间的关系式可以计算得到 $T_e$ :

$$D = ET_c^3 / [12(1 - \nu^2)] \quad (3)$$

其中 $E$ 为杨氏模量, $\nu$ 为泊松比。

根据以上原理进行的盆地模拟研究包括二步,一为用挠曲回剥法恢复盆地的裂后期演化历史,二为用挠曲悬臂模型正演盆地裂陷期的演化历史,通过二者的相互结合,互相验证来再现一个伸展盆地定量的发育演化过程。整个模拟过程用两个模拟软件来实现:反演软件Flex-Decomp和正演软件Stretch。其中Flex-Decomp软件可用于对横穿盆地内的地震剖面进行去压实,恢复盆地热沉降史的模拟研究,Stretch软件不仅可以正演盆地的裂陷期阶段,同样可以模拟盆地的裂后期阶段。基于弹性梁模型和挠曲均衡原理的Flex-Decomp和Stretch模拟软件已成功地用于许多伸展盆地,如Viking Garben (Roberts et al., 1995),北海 (Roberts and Yielding, 1991, Roberts et al., 1993; Yielding, 1991, 1992; Nadin and Kusznir, 1995),东非大裂谷 (Roberts and Yielding, 1991)。

## 2 琼东南盆地形成演化特征及模拟参数的选取

### 2.1 琼东南盆地形成演化特征

琼东南盆地发育于南海北部大陆架西缘,海南岛东南海域,总体呈北东-南西向延伸(图

1), 盆地在构造演化上经历两个特征显著不同的发育阶段(表1): 晚始新世—渐新世的张裂期以及早中新世—现今的裂后期。主要发育了3组不同走向的断裂, 分别为NE, 近EW和NW向, 它们基本控制了盆地的基本形态及走向, 形成了“三拗两隆”的构造格局(龚再升, 1997)。研究中我们利用穿过琼东南盆地的三条区域基干剖面<sup>①</sup>, 东西向测线L<sub>3</sub>, 穿越琼东南盆地的中央凹陷和北礁隆起区, 北西—南东向的两条测线L<sub>1</sub>和L<sub>2</sub>, 穿越中央凹陷带、北礁隆起区和南部拗陷带(图2)。地震剖面的反射特征表明(图3a): 反射界面T<sub>6</sub>以下为地垒—地堑式的构造样式, 表现为盆地的裂陷发育期, T<sub>6</sub>界面以上表现为拗陷发育期的构造样式, 同时界面上、下地层具明显的角度关系, 在中央凹陷带以外均可见明显的大幅度削蚀或侵蚀现象。

## 2.2 模拟过程及关键参数的选取

运用Stretch软件进行正演模拟首先需要输入模型属性和断裂属性, 然后进行裂陷期的回剥分析和特征编辑, 模拟过程还包括一些属性分析, 如伸张因子、热流值、弯曲量、重力值计算等, 需要选用不同的参数与实际情况相比较、调整, 其基本流程如图2所示。运用Flex-Decomp软件进行反演模拟过程包括地层模型建立、地层数据输入、回剥分析、敏感性测试、拉平剖面、沉陷历史、基底恢复、演化历史分析等, 其中可以将正演模拟中所得到的 $\beta$ 值导出并导入反演模拟, 作为敏感性参数测试的参考限制。

模拟过程中关键参数选取的合理性是模拟结果准确性的保证, 关键的模拟参数包括岩石圈属性和沉积属性、断裂以及倾角的选取等, 本次研

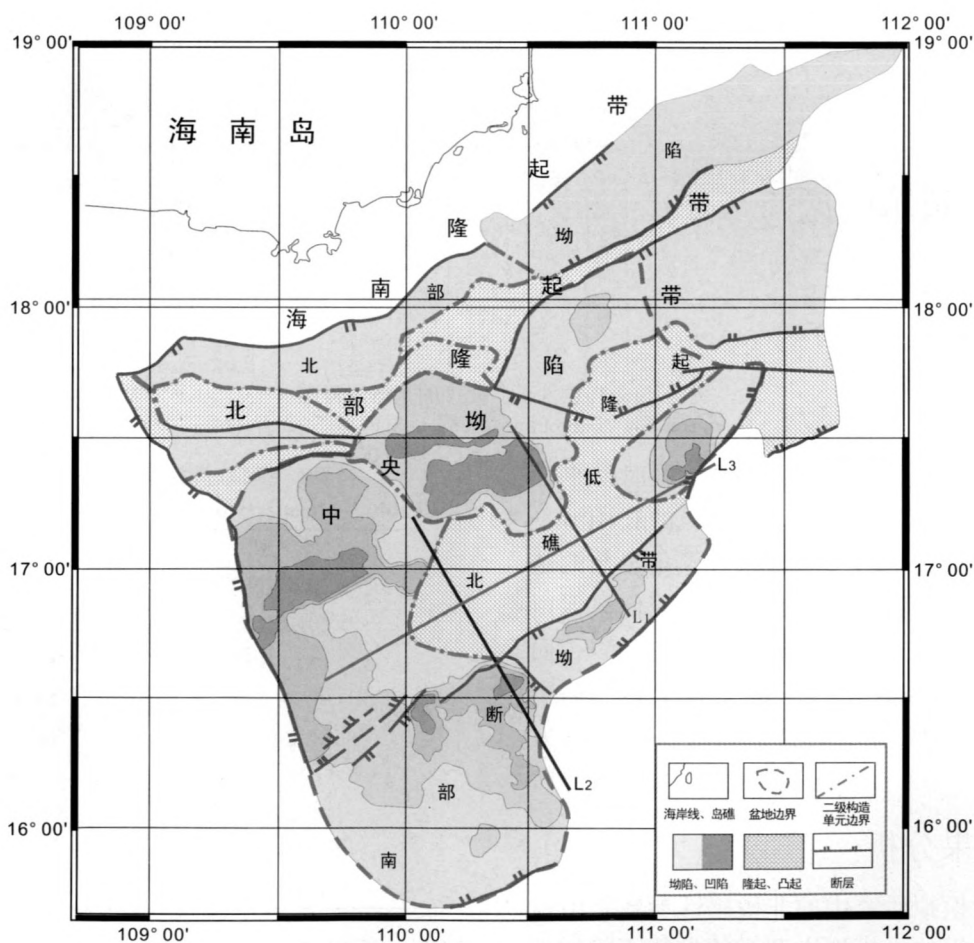


图1 琼东南盆地构造区划图

Fig. 1 Regional geological setting of the Qiongdongnan basin

<sup>①</sup> 资料来自无锡石油地质研究所内部报告.

表1 琼东南盆地的地层特征表 (据谢文彦等, 2008修改)  
Table 1 Stratigraphic characteristics of the Qiongdongnan basin

地层年代	地层	年龄 (Ma)	反射界面	地层特征		沉积环境	构造演化	
				孔隙度 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )			
第四系	全新统	1.64	T <sub>2</sub>	50.96	2.66	滨海、浅海	裂后阶段	
	更新统							乐东组
新近系 (N)	上新统 (N <sub>2</sub> )	5.2	T <sub>3</sub>	53.33	2.67	浅海、半深海		
	中新统 (N <sub>1</sub> )	晚 (N <sub>1</sub> <sup>3</sup> )	10.4			T <sub>4</sub>		滨海、浅海、盆底扇
		中 (N <sub>1</sub> <sup>2</sup> )	16.3			T <sub>3</sub>		滨海、浅海、三角洲
代古近系 (E)	渐新统 (E <sub>3</sub> )	早 (E <sub>3</sub> <sup>2</sup> )	29.3	T <sub>7</sub>	2.69	滨海、浅海、半深海		裂陷阶段
		早 (E <sub>3</sub> <sup>1</sup> )	35.4	T <sub>8</sub>		滨海、河流、湖泊、沼泽		
	始新统 (E <sub>2</sub> )	38.6	T <sub>E</sub>	2.68	湖泊、冲积扇、扇三角洲			
前第三系								

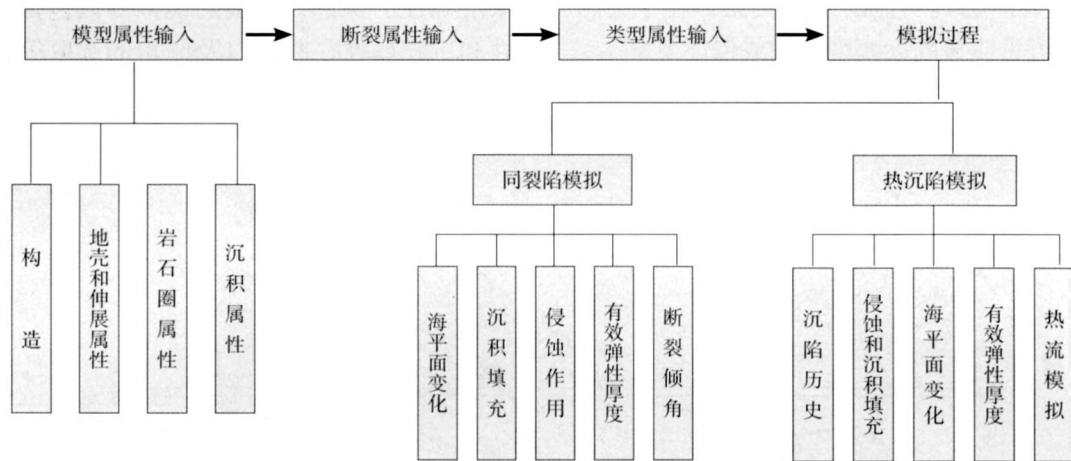


图2 Stretch软件正演模拟的基本流程图  
Fig. 2 The basic flow chart of forward modeling with Stretch software

究中统一采用 (表2) 的参数设置, 同时海平面变化的速率和大小以Haq等 (1987) 的长期海平面变化曲线为根据。对于断裂以及倾角参数的选取, 在模拟过程中为了使问题简化, 我们只保留了对盆地结构和构造起主要控制作用的断裂, 而对于与此相伴生的一些三、四级小断裂则忽略不计, 对断裂面的倾角则采取多点求平均值的方法。

### 3 模拟结果分析

本次定量模拟研究中的非敏感性参数是由地震反射剖面获得的, 模拟中调试的参数不仅作为结果来分析, 同时也有一些定量限制: 如古水深、沉降量等。对于作为敏感性参数的随机变量  $\beta$  值和  $T_e$  值, 由于模拟分析中存在不确定性和多

表2 模拟过程中所用的参数取值

Table 2 Property parameters used in the modeling

参数名称	参数取值
上地壳脆弱性层厚度	15 km
原始地壳厚度	32 km
地幔密度	3.3 g/cm <sup>3</sup>
地壳密度	2.8 g/cm <sup>3</sup>
水密度	1.0 g/cm <sup>3</sup>
岩石圈温度	1333.0 °C
热扩张系数	3.28 × 10 <sup>-5</sup>
泥岩孔隙度	50.7e <sup>-0.0089Z</sup>
砂岩孔隙度	40.03e <sup>-0.0004Z</sup>

解性, 所以研究中采取的约束性条件有: 前人利用不同方法在研究琼东南盆地以及周边地区所得到的拉张因子和有效弹性厚度数值; 尽可能多的进行不同参数值配置的调试, 利用输入数据与地

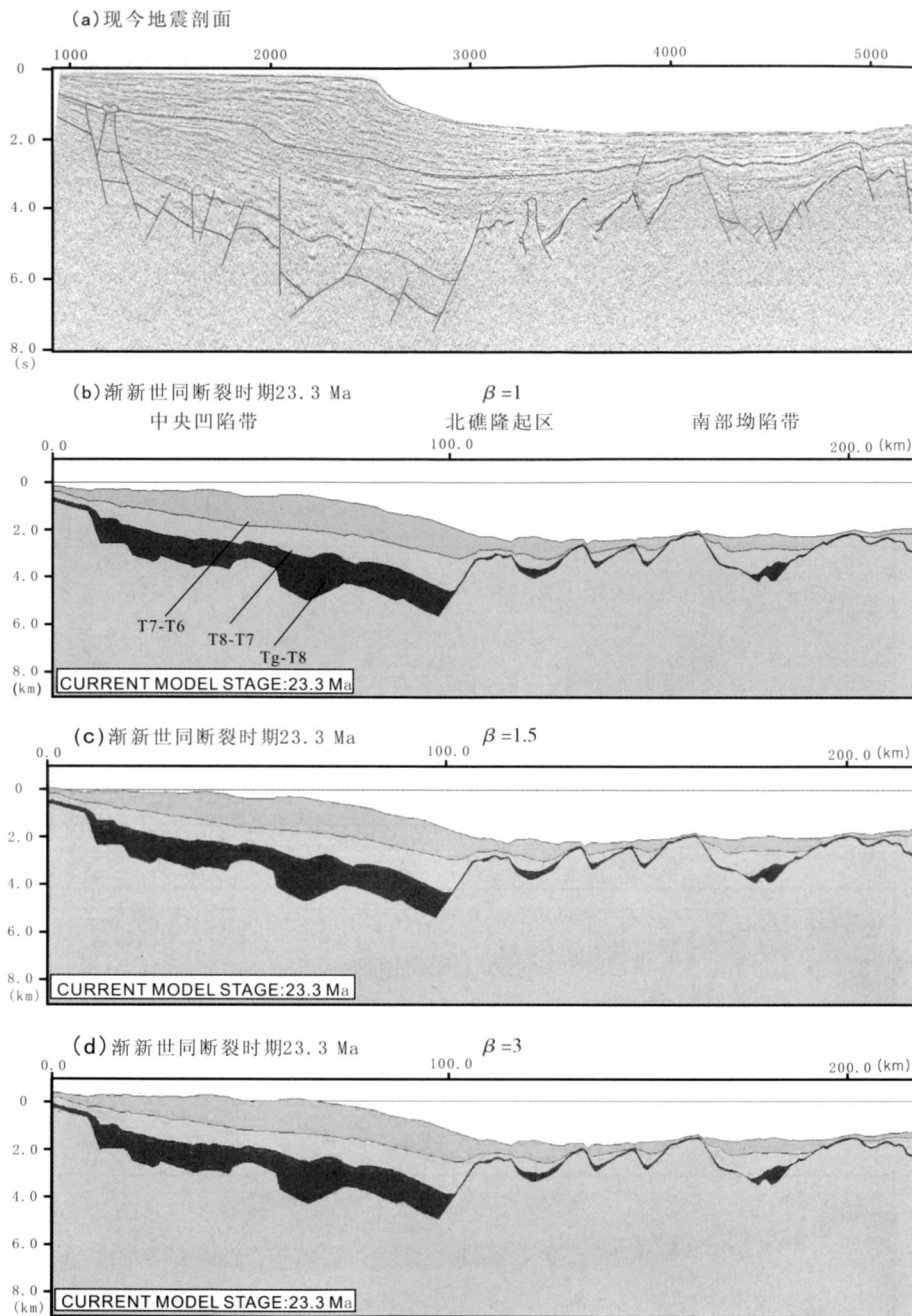


图3 测线 $L_1$ 拉张因子的计算 ( $\beta=1, 1.5, 3$ )  
 Fig. 3 Calculated stretching factors of the survey line  $L_1$  ( $\beta=1, 1.5, 3$ )

层出露海平面高度或者沉降量的关系，运用最小二乘法进行快速的拟合；正反演结合相互验证、互相约束。通过各种不同条件的有效制约，以期得到最合理的模拟结果。

### 3.1 拉张因子的计算

图3显示了当有效弹性厚度取值为3 km,  $\beta$  分别取值为1, 1.5, 3, 其它属性参数取值相同时的模拟结果。

由图3可以发现，当拉张因子为1.0时，中央凹陷带地层仍在海平面以下 150 m，当拉张因子为 1.5时，地层位于海平面附近，当拉张因子为3.0时地层出露海平面以上260 m；当拉张因子为1.0时，南部拗陷带地层在海平面以下1800 m，当拉张因子为1.5时，地层在海平面以下1400 m，当拉张因子为3.0时，地层在海平面以下1200 m。显然采用不同  $\beta$  值进行反演模拟得到结果的主要区别在于

盆地的整体沉降程度不同，虽然实际地质情况中  $\beta$  不可能是一个常量，同一个地区不同区域的拉张因子也不同，但总的来看，当  $\beta=1.5$  的时候，反演的基底最接近现实情况，即北缘大部分地区已经接近海平面，表现为中新世初期的大陆边缘状态，沉积相从陆相向浅海相转变。

对琼东南盆地三条剖面进行裂后期的回剥反演模拟，发现盆地东部的模拟结果相对较为理想，而西部存在一定的异常，反演结果的深度相对现实情况较深，当提高拉张因子数值后，可以使异常地区接近地质情况，说明西部的拉张因子

比东部大，推测可能是由于红河断裂新生代的活 动对琼东南盆地产生了一定伸展作用的影响。

### 3.2 有效弹性厚度的计算

图4显示当拉张因子为1.5，有效弹性厚度分别取值为1 km，3 km，10 km，截取模拟地质剖面最左端存在差异的一部分在横向上放大4倍，其它属性参数取值相同时的模拟结果。

从图中可以发现，当  $T_e$  为10 km 时从中央凹陷区最北端一直到20 km 处都出露海平面，显然不符合实际的地质情况。而  $T_e$  为1 km 或3 km 的时候，只有中央凹陷区的一部分地层有出露，大多数地

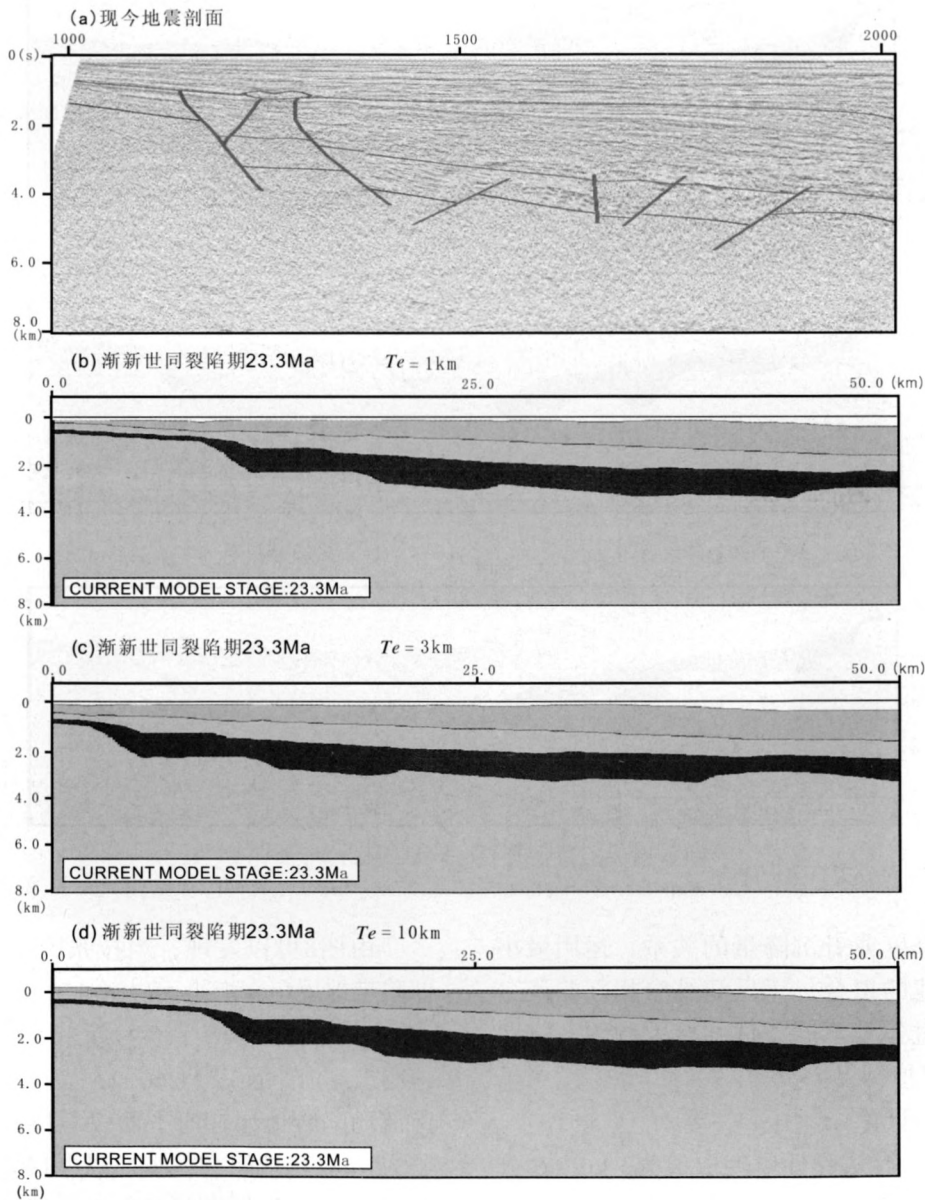


图4 测线  $L_1$  有效弹性厚度的计算 ( $T_e=1, 3, 10$ )  
 Fig. 4 Calculated effective elastic thicknesses of the survey line  $L_1$  ( $T_e = 1, 3, 10$ )

层都在海平面以下或者接近海平面，表征了大陆边缘的形态。从模拟结果可以看出，有效弹性厚度不会对盆地任何部位的沉降产生影响，只会引起盆地区域形态的变化。Robert等（1995）在研究北欧大陆边缘内的一些盆地时提出3 km的有效弹性厚度比较实用于大陆边缘环境。本次反演结果也证实了这个结论，最后得到的有效弹性厚度为3 km只是一个接近客观实际情况的平均值，比较符合琼东南盆地发育特征。

### 3.3 正演模拟分析

正演模拟是利用岩石圈的性质以及主控断裂的性质来正演盆地的演化过程，通过建立地层模型，输入测线 $L_1$ 的13条控制断裂属性，将盆地从基底断

裂发育时期正演至渐新世23.3 Ma，即裂陷阶段结束。如图5所示，模拟过程以地震剖面测线 $L_1$ 裂陷期不整合面作为边界分三次模拟：Tg-T8，T8-T7，T7-T6。相对Tg-T8裂陷作用后产生独立的半地堑构造样式，后两期裂陷作用使该地区显现出中央凹陷带、北礁隆起区、南部拗陷区的构造格局。在第二次裂陷作用以后，原来相对独立的半地堑互相连接形成南北相对的拗陷区，此时沉积中心位于北礁低隆起区北侧。三期裂陷作用的拉张因子都在1.0~1.1之间，并且受断裂作用控制，拉张因子的极值都出现在北礁隆起区和南部拗陷区。图5d的蓝线为裂陷期总的拉张因子，范围在1.1~1.3之间。根据弹性梁模型正演模拟的拉张因子代表脆性上地壳的伸展

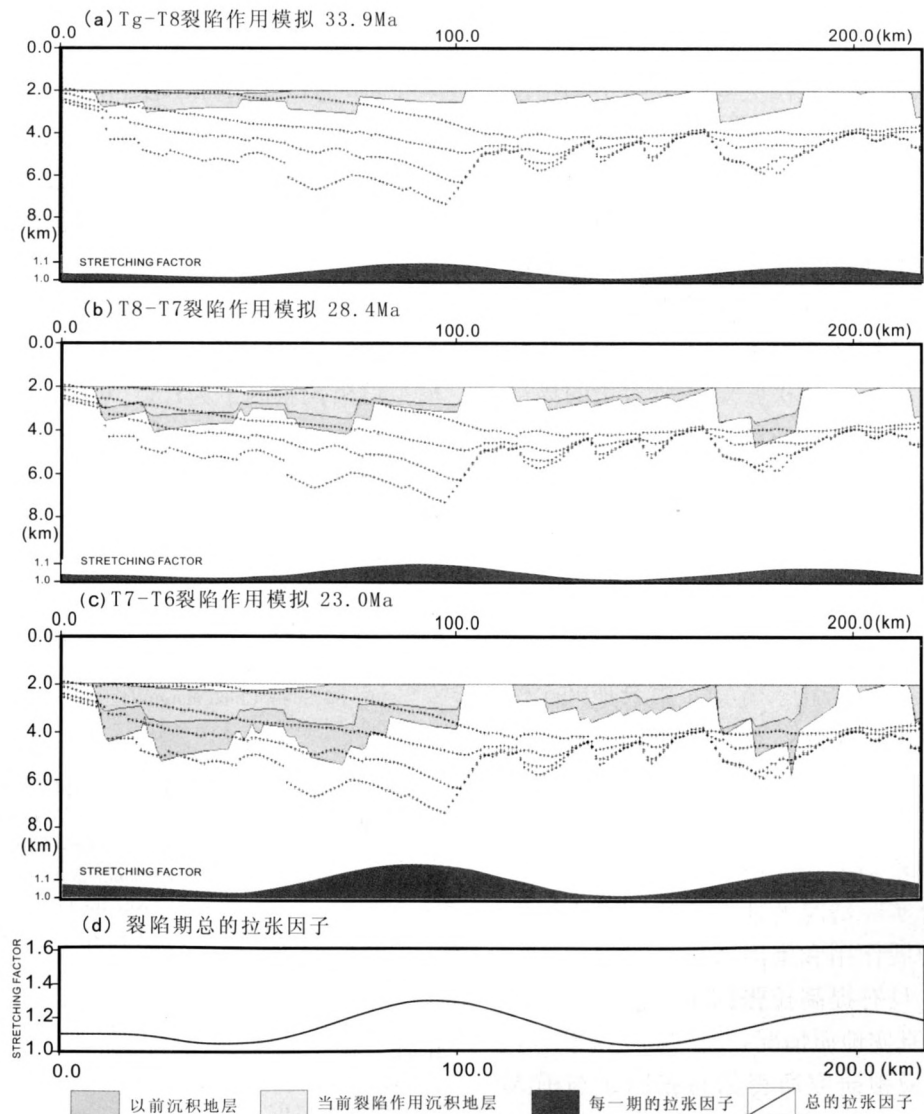


图5 测线 $L_1$ 正演模拟结果  
Fig. 5 Forward modeling results of the survey line  $L_1$

程度,反演模拟中的拉张因子反映整个岩石圈伸展程度,正演模拟结果中的拉张因子能够与地形的起伏有很好的对应关系,可以发现由中央凹陷带到北礁隆起区拉张因子从1.3减少到1.1,由北礁隆起区到南部拗陷区拉张因子从1.1增大到1.3,拉张因子从隆起区到拗陷区逐渐增大。同时通过对比每一次裂隙作用模拟结果中加入剥蚀作用前后的岩石圈的形态和盆地的形态,结合实际地震剖面,发现在模拟过程中加入50%剥蚀量最为恰当,此时北郊隆起区接近海平面,出现陆缘的陆相、湖相、三角洲沉积。

图5中虚线为反演模拟的结果,通过对比可以发现剖面北部模拟的结果基本与现实状况一致,而在北礁低隆起及其南部始终存在一个明显的异常,并且从剖面北段向南段异常逐渐变大,最大误差接近1 km,如此巨大并且分布不均衡的差异,原因可能与在模拟过程中忽略南海扩张对盆地的影响有关。根据前人对南海地区岩石圈的研究结果表明在南海海盆底部有明显的地幔物质上涌现象,并且上涌现象由边缘到海盆逐渐变明显(施小斌,2000),这与模拟结果中误差的变化趋势一致。由于模拟软件不支持局部加入拉张量,故难以估计南海海盆扩张对盆地演化的局部定量影响。为了解决这一问题,模拟中我们通过提高拉张因子的数值大小,使模拟结果接近于真实地质情况。

## 4 讨论及结论

### 4.1 有关问题讨论

1) 在反演模拟过程中,在琼东南盆地的东部与北部的模拟结果与实际情况吻合较好,而在盆地西部的反演模拟结果相对实际情况水深总是较深,在北礁低隆起及其南部的正演模拟结果与实际情况存在一个差别由北向南逐渐增大的趋势,推测这些不吻合实际情况的地方与忽略考虑红河断裂新生代的伸展作用和南海海盆扩张作用等因素的影响有关,只有提高拉张因子数值,才能使异常地区接近于真实地质情况。

2) 将本次模拟研究所得的拉张因子与前人运用构造平衡剖面方法所得拉张因子进行比较,运用构造平衡剖面方法所得的拉张因子不足以在

模拟过程中将渐新世裂隙阶段的基底恢复至海平面,这是因为构造平衡剖面只是依据几何学守恒的原则进行地层的回剥计算,没有考虑去压实、岩石圈强度等因素,所以运用平衡剖面所得到的拉张因子与基于弹性梁模型和挠曲均衡原理的模拟软件所得到的拉张因子存在差异。将构造平衡剖面的研究结果作为模拟过程中的一种参考性约束可以使结果更为合理。

3) 在模拟过程中,我们发现软件本身还存在一些局限性,如不能局部加入参数取值,只能对整个剖面加入统一的参数值,裂隙次数只能取2次以内等,软件本身存在的这些问题都会造成模拟结果与实际情况存在误差,这些缺陷还望在今后软件的开发中得到完善。

### 4.2 结论

1) 通过运用Flex-Decomp和Stretch构造模拟软件对琼东南盆地进行正反演相结合的研究发现琼东南盆地地区的有效弹性厚度在1~5 km的范围内,最佳值为3 km,表征大陆边缘环境。

2) 主要控制盆地形成发育的裂隙阶段的拉张因子均值在1.5左右,才能形成与实际情况相符合的裂后阶段热沉降效果。其中对裂后阶段的反演模拟得出拉张因子为1.5,对裂隙阶段的正演模拟得出总的拉张因子在1.1~1.3,由中央凹陷带到北礁隆起区拉张因子从1.3减少到1.1,由北礁隆起区到南部拗陷区拉张因子从1.1增大到1.3,拉张因子从隆起区到拗陷区逐渐增大。

### References:

- Clift P D and Lin J. 2001. Preferential mantle lithospheric extension under the South China margin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 18: 929-945.
- Ding Weiwei, Li Mingbi, He Ming, et al. 2009. Cenozoic tectono-sedimentary evolution in the middle part of northern continental shelf-slope region, South China Sea [J]. *Geological Journal of China Universities*, 15(3): 339-350. (in Chinese with English abstract)
- Fu Yongtao, Fan Shouzhi and Shi Xiaobin. 2005. Geological interpretation of the lithosphere effective elastic thickness [J]. *Chinese Journal of Geology*, 40(4): 585-593. (in Chinese with English abstract)
- Gong Zaisheng, Li Sitian, Xie Taijun, et al. 1997. Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation in the Continental Margin, South China Sea [M]. Beijing: Science Press: 89-92. (in Chinese)
- Haq B U, Hardenbol J and Vail P R. 1987. Chronology of fluctuating sea level since the Triassic (250 million years to present) [J]. *Science*, 25: 1156-1167.
- Hartly R, Watts A B and Fairhead J D. 1996. Isostasy of Africa [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 137: 1-18.



- Jin Yu and Jiang Xiaodian. 2002. *Lithosphere Dynamics* [M]. Beijing: Science Press: 18(26): 113-129. (in Chinese)
- Kusznir N J and Ziegler P A. 1992. The mechanics of continental extension and sedimentary basin formation: A simple-shear/pure-shear flexural cantilever model [J]. *Tectonophysics*, 215: 117-131.
- Kusznir N J, Marsden G and Egan S S. 1991. A flexural cantilever simple shear/pure shear model of continental extension [J]. *Geological Society, London: Special Publication*, 56: 41-61.
- Lin A T and Watts A B. 2002. Origin of the West Taiwan basin by orogenic loading and flexure of a rifted continental margin [J]. *Geophys.*, 107(9): 2185.
- McKenzie D P. 1978. Some remarks on the development of sedimentary basins [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 40: 25-32.
- Nadin P A and Kusznir N J. 1995. Palaeocene uplift and Eocene subsidence in the northern North Sea Basin from 2D forward and reverse stratigraphic modeling [J]. *Journal of Geological Society*, 152: 833-848.
- Roberts A M and Yielding G. 1991. Deformation around basin-margin faults in the North Sea/Norwegian rift [J]. *Geological Society, London, Special Publication*, 56: 61-78.
- Roberts A M, Yielding G, Kusznir N J, et al. 1995. Quantitative analysis of Triassic extension in the Northern Viking Graben [J]. *Journal of Geological Society*, 152: 15-26.
- Roberts A M, Yielding G, Kusznir N J, et al. 1993. Mesozoic extension in the North Sea: constraints from flexural backstripping, forward modelling and fault populations [A]. *Petroleum Geology of Northwest Europe, Proceedings of the Fourth Conference: London: Geological Society of London: 1123-1136.*
- Shi Xiaobing, Zhou Di and Zhang Jiaxiang. 2000. The thermo-rheological structure of lithosphere in the north of South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(15): 1660-1665. (in Chinese with English abstract)
- Stewart J and Watts A B. 1997. Gravity anomalies and spatial variations of flexural rigidity at mountain ranges [J]. *Geophys. Res.*, 102(B3): 5327-5352.
- Tong Dianjun, Ren Jianye, Lei Chao, et al. 2009. Lithosphere stretching model of deep water in Qiongdongnan basin, northern continental margin of South China Sea, and controlling of the post-rift subsidence [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 34(6): 963-974. (in Chinese with English abstract)
- Watts A B. 2001. *Isostasy and Flexure of the Lithosphere* [M]. London: Cambridge University Press: 2-9, 285-383.
- Westaway. 1994. Reevaluation of extension across the Pearl River mouth basin, South China Sea—implications for continental lithosphere deformation mechanisms [J]. *Journal of Structural Geology*, 16(6): 823-838.
- Xie Xinong, Muller R D, Li Sitian, et al. 2006. Origin of anomalous subsidence along the northern South China Sea margin and its relationship to dynamic topography [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 23: 745-765.
- Xie Wenyan, Zhang Yiwei, Sun Zhen, et al. 2008. The mechanism research of the formation of the Qiongdongnan basin during the Cenozoic through modeling experiments [J]. *Earth Science Frontiers*, 15(2): 232-241.
- Yuan Bingqiang, Poudjom Y H, Wang Ping, et al. 2002. Effective lithospheric elastic thickness of southeastern part of Arctic Ocean-Eurasia Continent-Pacific Ocean geoscience transect [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(4): 397-402. (in Chinese with English abstract)
- Yielding G, Badley M E and Freeman B. 1991. Seismic reflections from normal faults in the northern North Sea [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 51: 79-89.
- Yielding G, Badley M E and Roberts A M. 1992. The structural evolution of the Brent Province [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 61: 27-43.
- Zhang Yunfan, Sun Zhen, Zhou Di, et al. 2007. Stretching characteristics and its dynamic significance of the northern continental margin of South China Sea [J]. *Science in China (Series D)*, 37(12): 1609-1616. (in Chinese with English abstract)

### 参考文献:

- 丁巍伟, 黎明碧, 何敏, 等. 2009. 南海中北部陆架-陆坡区新生代构造—沉积演化[J]. *高校地质学报*, 15(3): 339-350.
- 付永涛, 范守志, 施小斌. 2005. 关于岩石圈有效弹性厚度的地质理解[J]. *地质科学*, 40(4): 585-593.
- 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 1997. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社: 89-92.
- 金煜和姜效典. 2002. 岩石圈动力学[M]. 北京: 科学出版社: 113-129.
- 施小斌, 周蒂, 张毅祥. 2000. 南海北部陆缘岩石圈热-流变结构[J]. *科学通报*, 45(15): 1660-1665.
- 佟殿君, 任建业, 雷超, 等. 2009. 琼东南盆地深水区岩石圈伸展模式及其对裂后期沉降的控制[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 34(6): 963-974.
- 谢文彦, 张一伟, 孙珍, 等. 2008. 琼东南盆地新生代发育机制的模拟研究[J]. *地学前缘*, 15(2): 232-241.
- 袁炳强, Poudjom Y H, 王平, 等. 2002. 北冰洋—欧亚大陆—太平洋地学断面东南段岩石圈有效弹性厚度[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 27(4): 397-402.
- 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[J]. *中国科学(D 辑)*: 37(12): 1609-1616.