

伸展盆地构造演化的数值模拟

——以南海北部白云凹陷为例

廖 杰^{1,2}, 周 蒂¹, 赵中贤^{1,2}, 张云帆^{1,2}, 徐子英^{1,2}

LIAO Jie^{1,2}, ZHOU Di¹, ZHAO Zhong-xian^{1,2}, ZHANG Yun-fan^{1,2}, XU Zi-ying^{1,2}

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, 广东 广州 510301;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology/South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, Guangdong, China;

2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

摘要:介绍了瞬时均匀拉伸模型、挠曲悬臂梁模型和多幕伸展模型, 特别强调各种模型的基本假设和适用条件, 以及基于这些模型发展出的二维正反演模拟和一维应变速率模拟的方法。这些方法在计算岩石圈伸展系数和盆地张裂的过程中, 具有一定的优越性。在盆地的数值模拟中, 有时需要综合运用多种数值模型来突破单个模型假设条件的约束。为了研究南海北部白云凹陷的裂后沉降特点, 分别应用二维正反演和一维应变速率正反演方法计算岩石圈的伸展系数, 并计算理论热沉降, 与实测裂后沉降进行对比。模拟结果表明, 白云凹陷岩石圈的伸展系数大致呈钟形分布, 在凹陷中心处最大, 大约为 3.5; 凹陷的实测裂后沉降远大于理论值, 即存在裂后异常沉降, 裂后期的异常沉降总量在凹陷中心和南部在 2km 以上。

关键词: 伸展盆地; 数值模型与模拟; 构造演化; 南海北部白云凹陷

中图分类号: P542

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2011)01-0071-11

Liao J, Zhou D, Zhao Z X, Zhang Y F, Xu Z Y. Numerical modeling of the tectonic evolution of extensional basin: take Baiyun sag of northern South China Sea for example. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(1):71-81

Abstract: This paper introduced the models of instantaneous uniform stretching, flexural cantilever stretching, and multiphase stretching, with special emphasis placed on their basic assumptions and application conditions. 2D inverse and forward modeling and 1D strain rate modeling have strong superiority on studying the lithospheric stretching factor and rifting process. In the numerical modeling, we often need to combine some models together in order to break through the limitation of the assumptions that existed in each single model, for example, using the flexural cantilever model and multiphase stretching model together to simulate the multi-rifting process. With the purpose of researching the post-rift subsidence characteristics of the Baiyun sag, we use the 2D inverse and forward modeling and 1D strain rate modeling to calculate the lithospheric stretching factor and theoretical thermal subsidence, comparing with the observed post-rift subsidence. The distribution of the lithospheric stretching factor is shaped like a bell, with the maximum value 3.5 in the center of the sag. The observed post-rift subsidence is much bigger than the theoretical post-rift subsidence in the center and south of the sag, with the anomalous post-rift subsidence over 2km.

Key words: extensional basin; numerical model and modeling; tectonic evolution; Baiyun sag of northern South China Sea

伸展盆地是与拉张应力作用下地壳和岩石圈伸展、减薄有关的一类裂陷盆地, 由陆内裂谷到被动

大陆边缘盆地演化序列所构成^[1]。作为沉积盆地的一种重要类型, 伸展盆地的伸展模式和动力学机制

收稿日期: 2010-06-01; 修订日期: 2010-07-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 40576027)和“863”项目(编号: 2008AA09Z306)

作者简介: 廖杰(1984-), 男, 在读硕士, 从事盆地分析研究。E-mail: liaojie@scsio.ac.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

一直受到广泛重视。在伸展盆地的定量模拟研究中,建立各种数值模型是研究的基础。针对伸展盆地的数值模拟,不同学者提出了不同的理论模型,这些模型在基本假设、应用条件和盆地演化的数学表达式上不尽相同^[2]。在实际应用这些数值模型时,要分别考虑各个假设条件是否成立,有时根据实际情况需要综合运用多种数值模型来突破单个模型中假设条件的限制。

本文介绍了瞬时均匀拉伸模型、挠曲悬臂梁模型、多幕伸展模型的假设条件和理论基础,以及基于这些理论模型发展出来的计算盆地沉降和岩石圈伸展系数的方法。盆地沉降包括应用回剥方法计算的实测沉降和应用理论模型预测的理论沉降。回剥方法主要是指不考虑岩石圈强度的一维回剥和考虑挠曲强度的二维回剥,通过除去沉积物荷载、海平面变化等非构造因素引起的沉降,得到构造沉降。理论模型预测是指应用理论模型给出的沉降量公式进行计算,如 McKenzie 挠曲悬臂梁模型^[3]等。有时为了研究盆地的张裂特征,计算盆地的理论热沉降,需要知道岩石圈的伸展系数,计算岩石圈伸展系数的传统方法是,将应用回剥方法实测得到的裂后沉降曲线与根据不同的伸展系数(β 值)应用 McKenzie 热沉降公式计算出的理论热沉降曲线进行拟合对比,如果二者拟合较好,理论曲线对应的 β 值即为估测值。应用该方法的前提条件是盆地的裂后沉降全部为热沉降,如果盆地裂后期尚存其它因素引起的沉降(即异常沉降),则不能应用该方法。针对这种情况,本文介绍了综合应用二维回剥反演和正演模拟盆地张裂过程,从而获得岩石圈伸展系数的方法,以及根据盆地张裂期的沉降曲线来拟合迭代岩石圈应变速率,并进而计算伸展系数的方法。最后以南海北部的白云凹陷为例,介绍了这 2 种方法的实际应用。

1 数值模型

1.1 McKenzie 瞬时均匀拉伸模型

提出较早且影响较大的裂谷盆地数值模型是 McKenzie^[4]的瞬时均匀纯剪拉伸模型,它奠定了盆地定量模拟的理论基础。该模型最早提出了伸展系数 β 的概念($\beta=l/b$, l 为伸展后的岩石圈宽度, b 为初始宽度),用以描述岩石圈的伸展减薄程度。并将盆地演化划分成裂陷期和裂后期:裂陷期岩石圈发生瞬时伸展,根据 Airy 均衡原理推导出初始沉降量

S_1 , 见公式(1);随后伸展作用停止,岩石圈地温梯度向着伸展前的状态衰减,岩石圈的热收缩导致地表沉降,盆地进入裂后热沉降阶段,应用傅立叶级数求解一维(随时间变化的)非稳态热流方程,推导出热沉降 S_t 的计算公式(2)。根据不同的伸展系数,应用公式(2)绘制出相应的热沉降曲线。采用回剥法计算出盆地的实测裂后沉降曲线后,可以通过与理论热沉降曲线进行对比拟合来估测岩石圈的伸展系数,但前提是实测的裂后沉降全部为热沉降,即不考虑裂后阶段的异常沉降。

公式中初始沉降和热沉降的推导是基于载水盆地模型的。在实际应用时,如果考虑沉积物加载的盆地沉降,情况稍微复杂,如果沉积物完全充填至海平面,可以将公式中水的密度改换成沉积物的密度,计算沉积物负载的热沉降。热沉降计算公式中的伸展系数是岩石圈的伸展系数,它与上地壳、地壳和岩石圈地幔的伸展系数并非完全相同,只有当岩石圈的伸展在垂向上均匀时,上述伸展系数才相互等同,否则需要利用其它资料分别计算岩石圈各圈层的伸展系数。

$$S_1 = \frac{a \left[(\rho_m' - \rho_c') (1 - \alpha T_m \gamma_c / (2a)) \frac{\gamma_c}{a} - \frac{\alpha T_m \rho_m'}{2} \right] (1 - 1/\beta)}{\rho_m' (1 - \alpha T_m) - \rho_w} \quad (1)$$

$$S_t = E_0 \frac{\beta}{\pi} \sin \frac{\pi}{\beta} [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (E_0 = \frac{4\alpha \rho_m' \alpha T_m}{\pi^2 (\rho_m' - \rho_w)}) \quad (2)$$

其中,各参数的涵义和取值见表 1。式中, ρ_c' 为 0°C 时地壳的密度(g/cm^3); ρ_w 为沉积物的密度(g/cm^3); t 为时间(Ma)。

McKenzie 模型是一种高度简化的模型,主要假设有:岩石圈发生瞬时纯剪伸展,不考虑裂陷期的热扩散;伸展在垂向上是均匀的,在水平方向上是对称的;岩石圈强度为零,遵守 Airy 均衡法则;裂后沉降

表 1 公式(1)和(2)中各参数的含义和取值

Table 1 The parameters used for calculating and their values

参数	涵义	取值
a	岩石圈厚度	125km
γ_c	地壳厚度	
ρ_m'	0°C 时地幔的密度	$3.33\text{g}/\text{cm}^3$
α	热膨胀系数	$3.28 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
T_m	软流圈顶界面温度	1333°C
τ	热时间常数	62.75Ma
ρ_w	水的密度	$1.0\text{g}/\text{cm}^3$

全部为热沉降。该模型虽然不足以解释一些复杂的现象,但它对认识盆地发育的机理具有重要的启示作用,此后的一系列模型都是在该模型基础上通过取消不同的假设条件而发展出来的(图 1)。

1.2 挠曲悬臂梁模型

考虑岩石圈具有一定强度, Kuszniir 等^[3,5]提出了大陆岩石圈的挠曲悬臂梁模型。该模型假设岩石圈是具有一定强度(用有效弹性厚度 T_e 表征)的弹性板,在伸展过程中,脆性上地壳发生简单剪切变形,产生板状断层,断层两侧的上下盘如同 2 个独立的悬臂梁,在重力均衡作用下岩石圈负载的变化使得上盘塌陷,下盘抬升;韧性下地壳和岩石圈地幔发生纯剪变形。挠曲悬臂梁模型依然假设岩石圈的伸展是瞬时完成且伸展在垂向上是均匀的,但与考虑 Airy 均衡的 McKenzie 模型不同,悬臂梁模型遵守挠曲均衡原理。

挠曲悬臂梁模型将盆地分析扩展到二维,对计算裂陷期和裂后期的挠曲沉降量给出了详细的推导过程^[3,5],在此基础上发展出了二维正演拉伸模拟方法,即通过正演模拟盆地的裂陷过程^[6]和二维回剥方法^[7],为此开发了计算程序 Stretch 和 FlexDecomp(英国 Badley Geoscience Ltd 的软件产品)。利用 Stretch 软件可以正演模拟盆地的形成过程,包括裂陷过程和裂后热沉降过程;利用 FlexDecomp 软件可以对现今地层进行考虑热沉降和挠曲回剥的二维回剥反演。

1.3 多幕伸展模型

对于经历了多幕伸展的裂陷盆地,其沉降史曲

线往往表现为阶梯状,如果仅用单幕瞬时拉伸模型将难以正确地描述。Lin 等^[8]在 McKenzie 瞬时拉伸模型的基础上提出了多幕拉伸模型,认为整个拉伸过程是由多个瞬时裂陷——裂后幕组成的,下一幕开始时的岩石圈状态是上一幕结束时的岩石圈状态。在多幕伸展模型中,岩石圈的伸展具有相互继承和叠加的特点,每一幕岩石圈的伸展系数为之前所有裂陷幕的伸展系数的乘积。多幕拉伸模型的简化假设与 McKenzie 模型相同,同样根据 Airy 均衡原理和求解一维非稳态热流方程来计算每一幕的裂陷沉降和裂后沉降。

具体到南海北部的陆缘盆地,其伸展大多表现为幕式性,如琼东南盆地、莺歌海盆地、珠江口盆地等^[8-10]。珠江口盆地的白云凹陷,裂陷期的张裂主要受神狐运动、珠琼运动一幕和二幕的影响。因此,在研究南海北部的伸展盆地,如珠江口盆地的白云凹陷时,多采用幕式伸展模型模拟盆地(凹陷)的伸展过程。

2 模拟方法

基于各种理论模型的数值模拟是再现盆地形成演化过程的一种重要方法,尤其在对张裂盆地构造热演化的研究中,不同学者应用不同的数值模型和模拟方法,计算了张裂盆地的构造演化和热演化,取得了重要的认识。近年来,在越来越多的被动陆缘盆地中发现裂后异常沉降的现象,即实测裂后沉降量与理论模型预测的热沉降量存在偏差(通常是实测裂后沉降大于理论值)。为了解答珠江口盆地是否

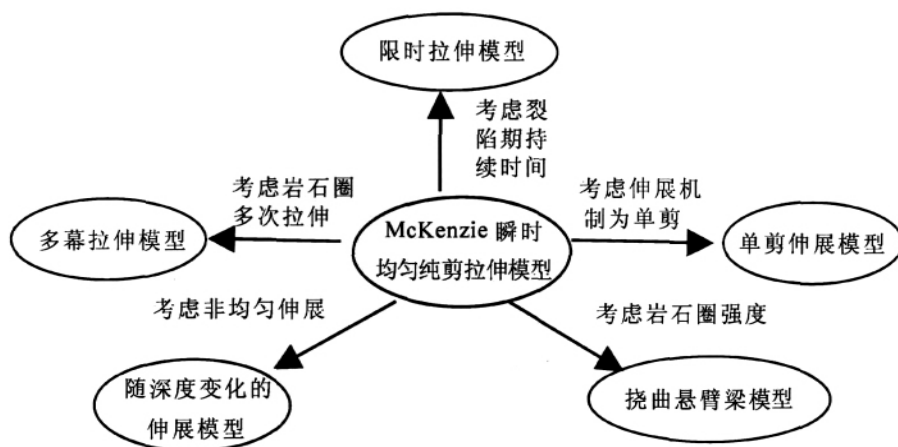


图 1 McKenzie 模型与其它模型的关系

Fig. 1 Relationship between McKenzie model and other models

存在裂后异常沉降这一疑问,本文对珠江口盆地的张裂和沉降进行了数值模拟。

判识裂后异常沉降的存在,需要将实测裂后构造沉降与理论构造沉降进行对比。其中实测裂后构造沉降的计算较简单,可通过地层回剥计算除去沉积物荷载、压实、重力均衡、古水深、海平面变化等非构造因素引起的沉降来实现。而理论裂后构造沉降的估算则是难点,困难在于岩石圈热沉降的伸展系数 β 是未知的。估算岩石圈伸展系数 β 的传统方法是:将通过回剥方法得到的实测裂后期的构造沉降与根据不同的 β 值按式(2)算出的理论热沉降曲线对比,选择拟合最好的 β 值作为该点的岩石圈伸展系数。使用这种方法隐含着裂后构造沉降完全是由岩石圈冷却收缩引起的,即在裂后期只存在热沉降的假设;当盆地存在裂后异常沉降时显然不应该采用这种方法,而需要通过其它途径估测 β 值。本文介绍以下2种估测 β 值,进而研究盆地裂后异常沉降的数值模拟方法,一是基于挠曲悬臂梁模型的二维正反演方法,二是 White 等^[11-12]提出的应变速率方法。

2.1 沉降过程二维正反演模拟方法

二维正反演模拟的原理是:通过对深度剖面用传统回剥反演计算得到盆地的“实测”构造沉降;应用二维正演方法模拟盆地的张裂过程并估测出岩石圈的伸展系数,进而得到理论裂后热沉降(方法流程见图2)。

考虑到一般情况下岩石圈的强度不为零,同时也为了与下一步的二维正演相呼应,笔者采用二维回剥程序 FlexDecom 进行回剥反演。该程序可以完成3项主要工作:沉积物压实、沉积物卸载和裂后期的热反演。由于伸展系数往往未知,设 $\beta=1$ 而不启动裂后期的热反演。为了回剥到基底面而设张裂结束时间为基底面时间。岩石圈有效弹性厚度 T_e 通过灵敏度试验确定,一般在5km以内^[13-14]。进行沉积物荷载和压实校正、挠曲重力均衡校正、海平面变化校正和古水深校正,得到研究剖面基底以上(包括张裂期和裂后)各地质时代的沉积层厚度、盆地形态和构造沉降。在 T_e 未知的情况下,可选不同的值进行灵敏度试验。

然后采用程序 Stretch 对该剖面进行盆地张裂期的二维正演模拟。该软件的理论基础也是挠曲悬臂梁模型:脆性上地壳发生单剪变形,产生板状断

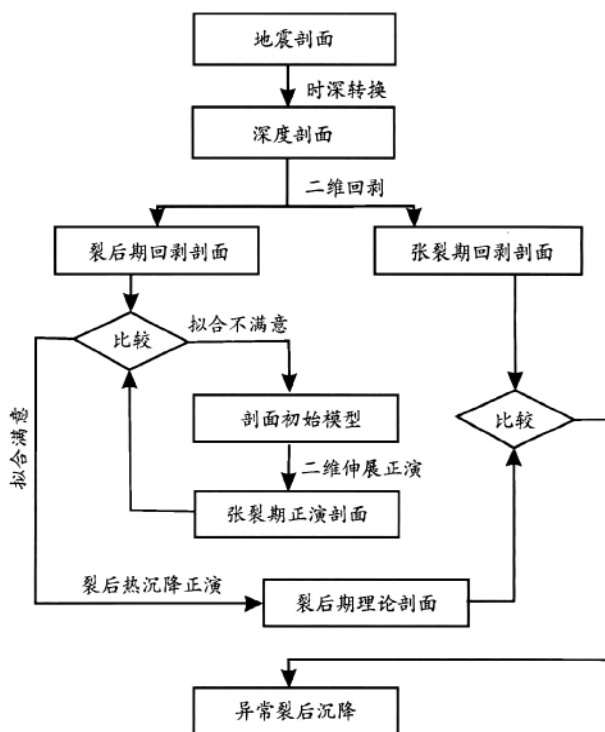


图2 判识裂后异常沉降的二维正反演流程

Fig. 2 2D forward and inverse modeling sketch for determining the post-rift subsidence

层,断层两盘如同2个独立的悬臂梁;韧性下地壳和岩石圈地幔发生塑性伸展,伸展量与上地壳相同。上地壳的伸展通过各条断层来完成;对应于每条断层,下地壳和岩石圈地幔的伸展用符合正弦函数的韧性伸展来代替。挠曲悬臂梁模型与 McKenzie 模型一样假设岩石圈伸展瞬时发生,模拟时可假设伸展发生在张裂期结束的时刻。模拟之前要以反演得到的张裂期剖面作参考,建立张裂演化的地质模型,包括岩石圈有效弹性厚度 T_e 、张裂幕数和时间,每幕张裂的初始断裂的位置、倾向、倾角、伸展量。正演时从初始模型开始伸展,得到张裂后的形态。当通过调节 T_e 、断裂参数和伸展量,得到的盆地形态、结构、地层厚度等与二维回剥得到的张裂期盆地形态模板达到较好拟合时,程序会自动给出沿剖面的 β 值曲线和数值,即为岩石圈伸展系数 β 的估测值。对于发生了多幕张裂的盆地,初始裂陷幕伸展前的边界条件是以岩石圈的原始条件来定义的,而以后各幕伸展前的岩石圈状态则以前一幕的终止状态(即前一幕的伸展+前一幕到后一幕之间的热沉降)为初始条件。最后一步是:在张裂正演得到 β 值曲线的基础上继

续进行裂后热沉降的正演模拟,得到该剖面的理论裂后热沉降量,进而与回剥反演得到的裂后阶段的“实测”构造沉降相对比,判断裂后异常沉降存在与否,以及沿剖面异常沉降量的变化。

沉降过程二维正反演模拟法的优点是:①回剥反演和正演时都可考虑岩石圈强度,比假设岩石圈强度为零更接近实际;②可模拟多幕张裂的情况;③可得到裂后异常沉降随位置和时间变化细节等。需要说明的是,虽然 FlexDecomp 和 Stretch 软件的设计都是基于岩石圈均匀伸展的假设,但因为在正演模拟时以回剥得到的张裂期盆地形态为目标,而不是以上地壳断裂的错动量为目标,实际上已考虑了整个岩石圈的伸展效应,因而也可以应用于岩石圈伸展随深度变化(如下地壳和/或岩石圈地幔的伸展远大于上地壳的伸展)的情况。但也要注意:模拟得到的断裂不一定是实际存在的断裂,尤其在深部很可能是韧性变形的结果。方法的缺点是操作较复杂,各个步骤都需要仔细进行方法设置和参数调试,一些细节需要仔细考虑(如初始断裂应比现今观测到的断裂缓,位置也不同;回剥得到的张裂期盆地形态模板在与正演结果相比较时要消除后期张裂对剖面长度的影响等)。对各个步骤可能带来的误差和综合误差的大小目前尚未进行研究。

2.2 应变速率正反演方法

传统张裂盆地的伸展模型,要么假设岩石圈的伸展在瞬间完成,要么假设岩石圈在有限时间内以恒定应变速率伸展^[15],没有考虑张裂过程中应变速率的变化。White 等^[11-12]指出,盆地张裂过程中岩石圈应变速率可随时间和空间发生变化,并提出了根据载水盆地构造沉降曲线反演盆地随时空变化的一维和二维应变速率的方法。

一维应变速率反演方法适用于单点计算,所隐含的假设与 McKenzie 模型相同,即岩石圈强度为零,符合 Airy 均衡。通过对深度剖面的传统回剥计算可剥除沉积物荷载、压实作用、重力均衡、古水深和海平面变化的影响,得到载水盆地的构造沉降随深度的变化曲线。载水盆地的标准理论沉降公式如下^[15]:

$$S(t) = A(1 - 1/\beta) - BQ(t) \quad (3)$$

该式中:

$$A = t_c(\rho_m - \rho_c)/(\rho_a - \rho_w) \quad (4)$$

$$B = \alpha \rho_m(\rho_a - \rho_w) \quad (5)$$

$$Q(t) = \int_0^a [T(z, t) - T(z, \infty)] dz \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + G(t)(a - z) \frac{\partial T}{\partial z} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (7)$$

上列公式中: t 为时间; T 为温度; α 为热膨胀系数; a 是岩石圈厚度; $\rho_a, \rho_m, \rho_c, \rho_w$ 分别为岩石圈、地幔、地壳、水的密度; t_c 是地壳厚度(km); z 是深度(km); κ 是热扩散度(m^2/s)。 $Q(t)$ 表示波动的温度与平衡后的温度差异,是 $G(t)$ 的函数。公式(7)为带平流项的一维热流方程。将岩石圈的伸展系数与应变速率的关系式^[16] $\beta = e^{\int G(t) dt}$ 代入公式(3)可导出应变速率的计算公式^[11]:

$$G(t) = \frac{d}{dt} \left\{ \ln \left(\frac{A}{A - S(t) - BQ(t)} \right) \right\} \quad (8)$$

通过回剥得到 $S(t)$ 后,应用迭代法求解公式(8)得到 $G(t)$ 。假定 $BQ(t) = 0$, 得到 $G(t)$ 的初始分布,之后进行迭代运算,其中 $Q(t)$ 根据有限差分方法计算(细节见参考文献[11]); 然后对 $G(t)$ 积分得到岩石圈的伸展系数 β 。

本文通过一维回剥得到盆地/凹陷的实测沉降量,即利用探井数据或根据地震剖面做出的“人工井”数据,通过去压实(不考虑岩石圈强度)、古水深、海平面和均衡校正后将非构造因素引起的沉降从总沉降量中除掉,求出某点的构造沉降量。采用基于 Sclater 等^[17]的一维回剥方法编写的 BURSIB 回剥程序^[18],将探井或“人工井”获取的地层深度、岩性参数、古水深和海平面变化数据输入程序进行计算,得到盆地各点的构造沉降史。然后用上述应变速率反演方法得到的岩石圈伸展系数,应用沉降公式正演盆地的理论沉降。

二维应变速率正反演方法^[12]在一维方法的基础上考虑了岩石圈的强度,应变速率 $G(x, t)$ 是横向距离和时间的函数。由于本文没有涉及二维应变速率正反演的工作,对该方法的原理不在此赘述。

3 模拟实例分析

白云凹陷是南海北部被动陆缘最大的深水凹陷,位于珠江口盆地珠二坳陷的东部,整体走向近东西向,面积大于 20000 km²,水深从 200m 到 2000m (图 3)。新生代以来,白云凹陷经历了强烈减薄和持续沉降^[19],并且有学者认为白云凹陷可能存在裂后异常沉降^[20]。因此,研究白云凹陷的伸展和沉降特点,对认识和了解南海北部被动陆缘的构造演化具有重要意义。

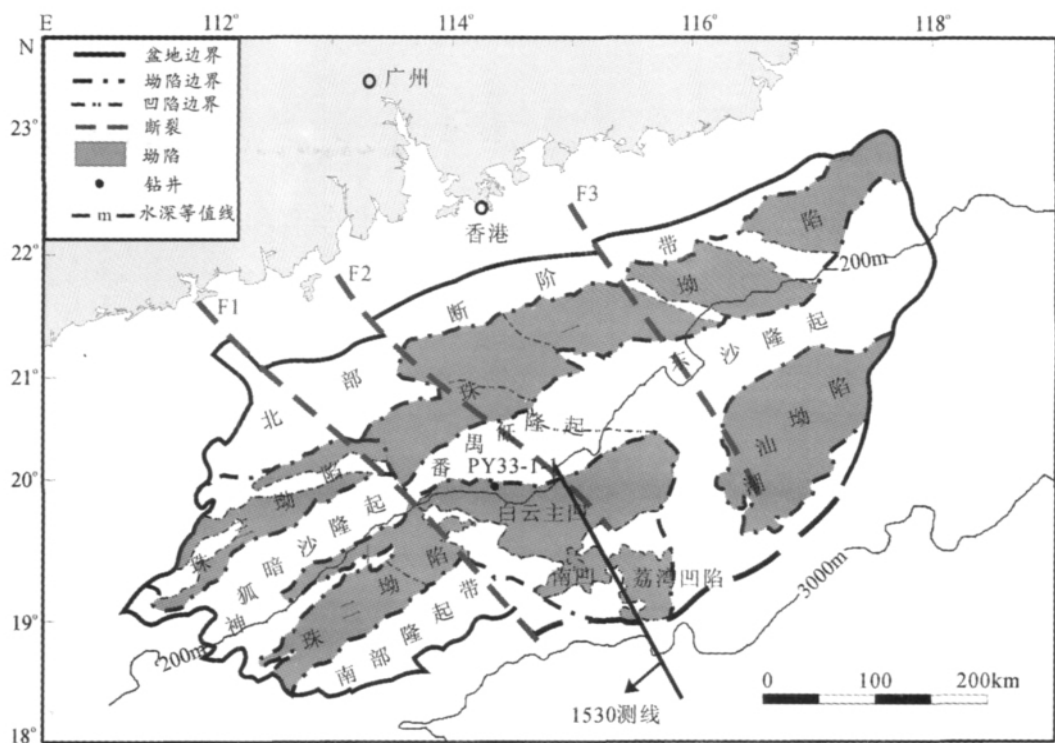


图 3 白云凹陷地质背景和 1530 测线的位置
Fig. 3 Geological background of Baiyun sag and the position of line 1530

表 2 白云凹陷地层和岩性
Table 2 The strata and lithology of Baiyun sag

盆地结构	地震反射层	年代/Ma	主要岩性	骨架密度 /g·cm ⁻³	原始孔隙度 /%	压实递减系数 /km ⁻¹
裂后期	海底-T ₂	0~10.5	泥岩	2.72	63.0	0.51
	T ₂ -T ₃	10.5~13.8	泥岩	2.72	63.0	0.51
	T ₃ -T ₅	13.8~17.5	泥岩	2.72	63.0	0.51
	T ₅ -T ₆	17.5~23.8	粉砂	2.68	56.0	0.39
	T ₆ -T ₇	23.8~30	粉砂	2.68	56.0	0.39
裂陷期	T ₇ -T ₈	30~39	砂岩	2.65	49.0	0.27
	T ₈ -T ₉	39~49	砂岩	2.65	49.0	0.25

1530 测线是穿过白云凹陷中央的一条深反射地震剖面(见图 3、图 4),地层年代和主要岩性参数见表 2。沿该测线:①基于二维挠曲悬臂梁模型和多幕拉伸模型的理论基础,应用二维模拟程序正演模拟凹陷的张裂过程;通过对比回剥实测和理论模型预测的裂后沉降,分析凹陷的裂后异常沉降。②应用一维应变速率正反演方法,计算白云凹陷的岩石圈应变速率随时间的变化,由应变速率计算岩石圈的伸展系数,进而计算理论裂后沉降,与回剥实测的裂后沉降进行对比。

3.1 二维正反演模拟结果

应用上文介绍的 FlexDecomp 软件,对现今实测地层剖面进行二维回剥反演,得到裂陷期各时刻的盆地形态(如图 5 所示),作为正演模拟的对比。由于 30Ma 以前凹陷古水深为零,因此将回剥到 30Ma 和 39Ma 的地层进行层拉平。

根据回剥反演获得裂陷期的盆地形态后,应用 Stretch 软件对白云凹陷的裂陷过程进行正演模拟,根据南海北部陆缘的幕式伸展特点和珠江口盆地在新生代经历了多期张裂^[9],将伸展过程设置为 2 期,

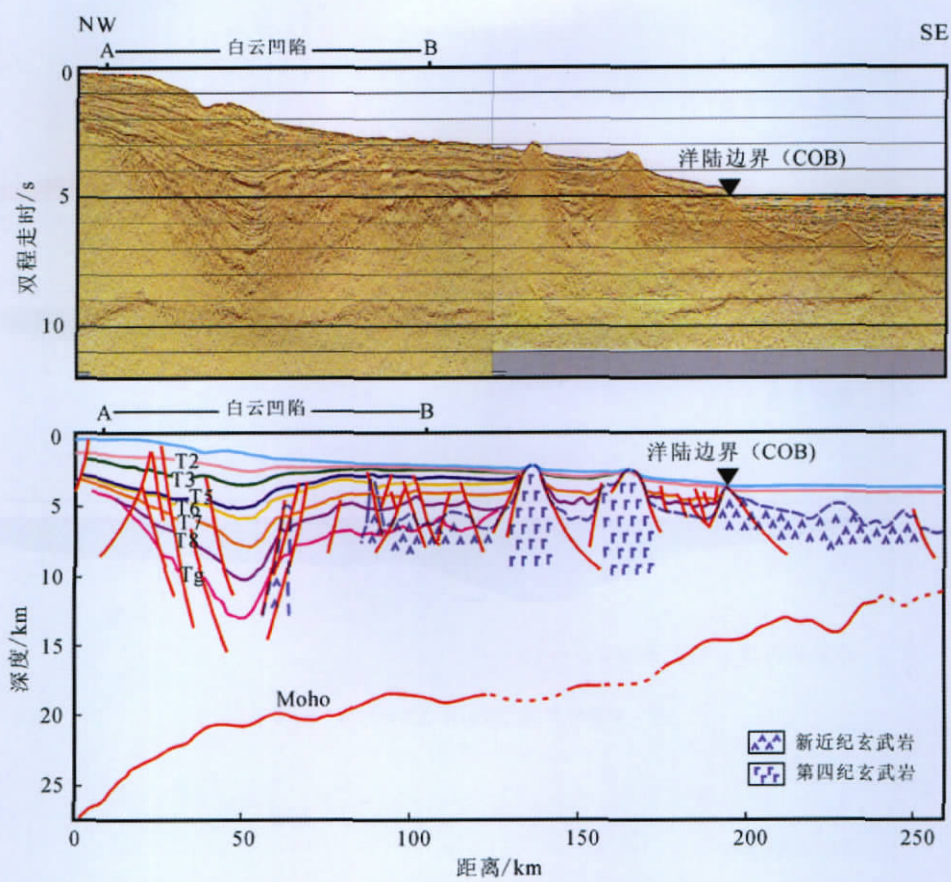


图 4 白云凹陷 1530 测线对应的地震剖面(上)和地质剖面(下)(模拟主要限于 AB 段)
Fig. 4 Seismic and geological profiles of line 1530

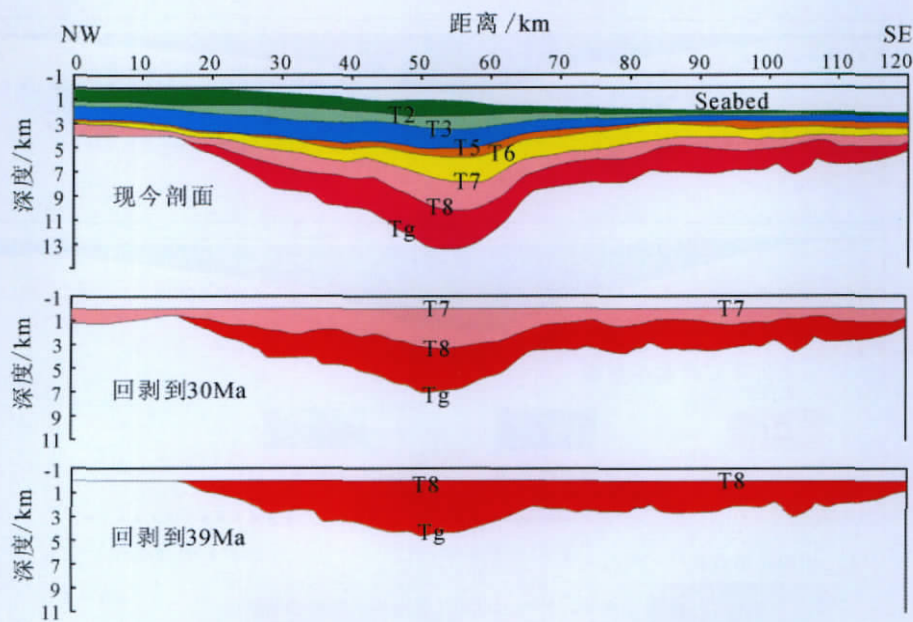


图 5 白云凹陷现今和回剥到各时期的地层剖面
Fig. 5 The back stripped stratum profiles

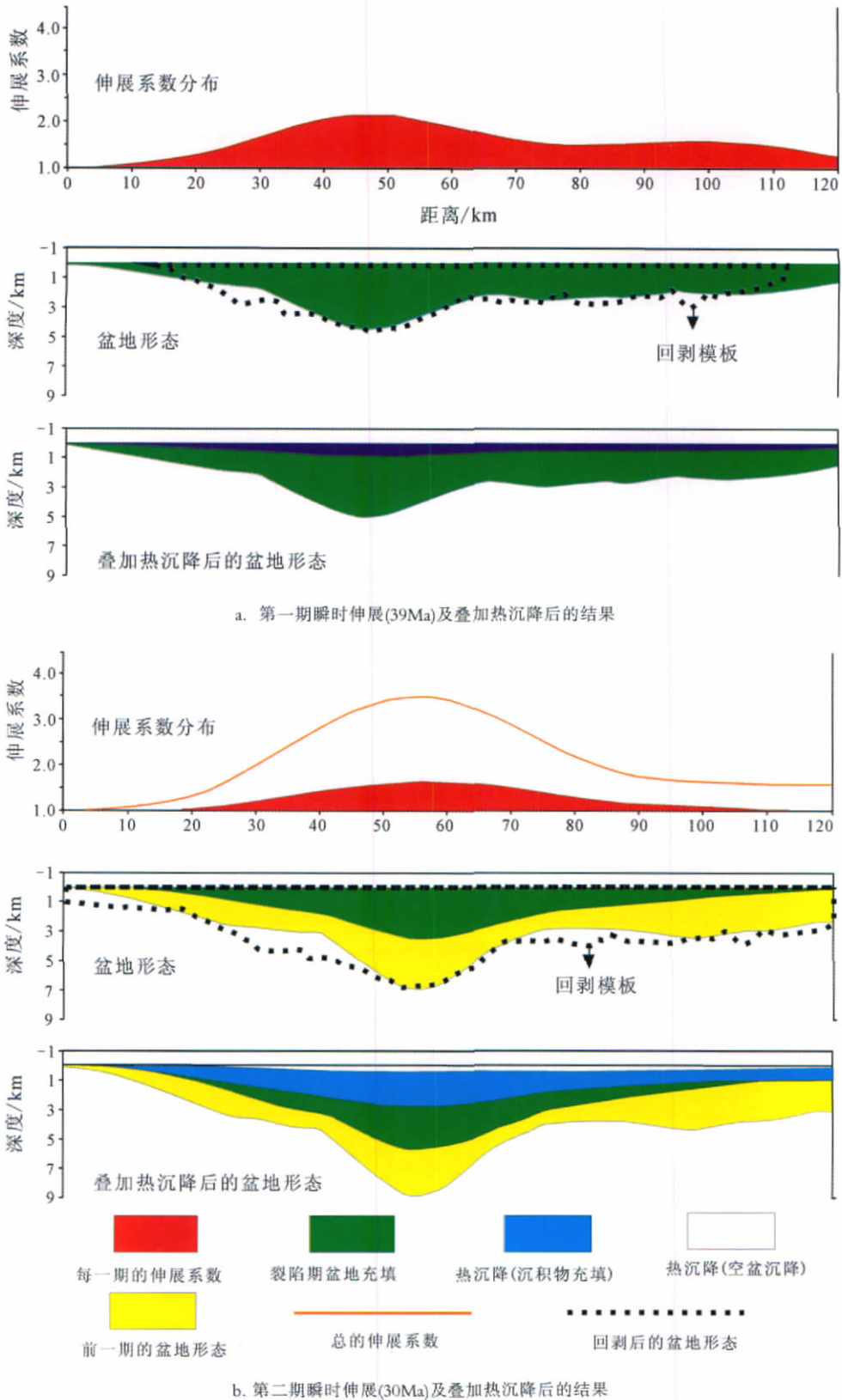


图6 白云凹陷两期正演模拟结果及其与回剥结果的拟合对比

Fig. 6 comparison between forward modeling results and back stripping results

分别发生于 39Ma 和 30Ma。由于岩石圈每一期伸展所持续的时间很难确定,而且 Stretch 软件只能处理瞬时拉伸情况,因此本文将岩石圈的每一期伸展简化为瞬时伸展,各期瞬时伸展之后进入相应的热沉降阶段。每一期模拟都与相应的回剥结果做了拟合对比。

图 6 为正演模拟结果及其与回剥结果的拟合对比。图 6-a 为第一期(39Ma)伸展后的伸展系数分布、盆地形态和叠加热沉降后的盆地形态,其中点线表示回剥到 39Ma 的盆地形态,是将后一期(30Ma)的伸展量减除后的形态。图 6-b 为第二期(30Ma)伸展后的结果,此时的盆地形态即为整个裂陷期的盆地形态,点线表示回剥到 30Ma 的盆地形态。由图 6 可以看出,正演模拟结果与回剥结果整体拟合较好。裂陷期岩石圈伸展系数大致呈钟形分布,凹陷中心部位伸展系数最大, $\beta=3.5$ 。裂后期持续了 30Ma,叠加理论热沉降后的盆地形态如图 6-b 所示,凹陷中心处的裂后热沉降大约为 0.9km。

沿 1530 剖面计算了白云凹陷的实测和理论裂后沉降总量(图7)。根据沉降曲线的对比可以看出,凹陷中心存在较大的异常,异常沉降量约 2.6km;向两侧异常沉降逐渐降低,在北侧为 1.0~1.3km,在南侧为 1.5~2.0km。

3.2 一维应变速率模拟结果

应用 White^[11]的一维应变速率反演理论和方法来计算白云凹陷中心的应变速率,根据应变速率计算岩石圈的伸展系数,进而计算凹陷的理论裂后沉降量,与实测值进行对比。按理想情况来说,裂后阶段岩石圈没有伸展,应变速率仅在裂陷期不为零,因此根据裂陷期的沉降即可拟合出应变速率。但实际上,岩石圈减薄和热收缩以外的因素同样会引起盆地沉降,如果这部分额外沉降发生在裂后期,则会导

致反演出的应变速率在裂后阶段远远大于零。因此,笔者用整个阶段(裂陷期和裂后期)的沉降来计算应变速率,以判断盆地的裂后沉降情况。

图 8 和图 9 分别为反演得到的各个点的应变速率和根据应变速率计算出的伸展系数,二者均随时间变化。从图上可以看出,裂后阶段岩石圈存在一定的应变速率。伸展系数同样在裂后阶段继续增长,到现今时刻其值可以达到 10。应变速率和伸展系数的异常,说明裂后阶段可能存在异常沉降。

图 10 为凹陷中心的理论和实测沉降曲线对比。

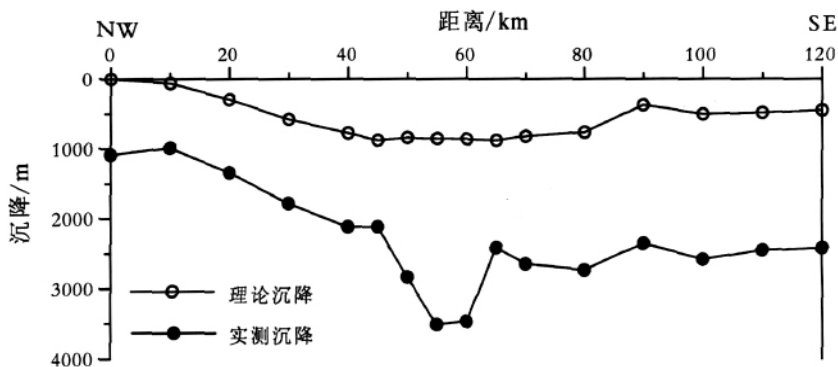


图 7 沿白云凹陷整个剖面的理论和实测沉降量对比(差值即为异常沉降)

Fig. 7 Comparison between theoretical and observed post-rifting subsidence along the line 1530

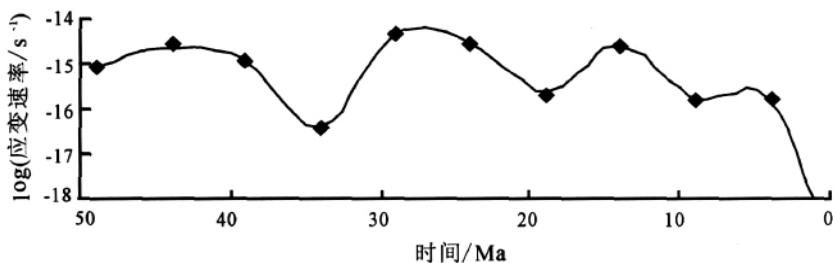


图 8 白云凹陷中心的岩石圈应变速率随时间的变化

Fig. 8 The variation of the strain rate in the center of Baiyun sag

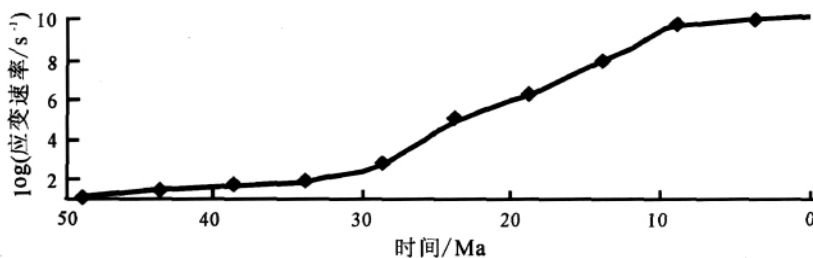


图 9 白云凹陷岩石圈伸展系数随时间的变化

Fig. 9 The variation of the lithospheric stretching factor

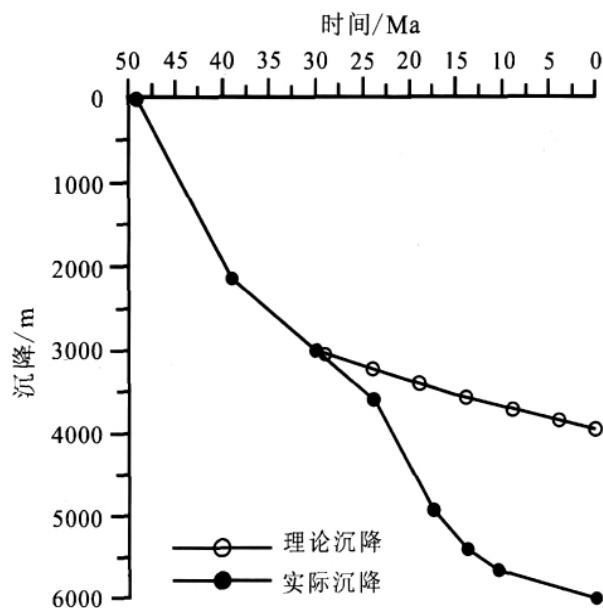


图 10 白云凹陷中心部位的理论 and 实测沉降对比
(差值即为异常沉降)

Fig. 10 Comparison between theoretical and observed post-rifting subsidence in the center of Baiyun sag

由图中可以看出,实测沉降量远远大于理论沉降量,即存在较大的异常沉降量,约 2km。Xie 等^[21]应用一维速率正反演方法计算了南海北部陆缘 56 口井的数据,发现普遍存在裂后异常沉降,在白云凹陷近中心位置点的异常沉降量约为 1.3km,且异常沉降呈现由陆向洋逐渐增大的趋势。本文的一维应变速率模拟结果与 Xie 等^[21]的计算结果相近。

4 结论和展望

每一种数值模型都有各自的理论基础和假设条件,应用这些模型时要分别考虑假设条件是否成立。本文介绍了 3 种数值模型,基于这些模型的理论 and 假设条件发展出了一些数值模拟方法。

(1) 二维正反演模拟方法的要点是:在时深转换后的深度剖面上,一方面通过二维挠曲回剥反演 (FlexDecomp 软件),计算出去掉沉积物负载、海平面变化、古水深等作用后的构造沉降和张裂期的凹陷形态,用作正演模拟的对比参照。另一方面,应用二维正演模拟的方法 (Stretch 软件),从变形前的初始地壳模型开始,假设并不断调节岩石圈的有效弹性厚度和边界断层的位置、倾角、拉伸量等参数,模拟白云凹陷的张裂过程,直到模拟得到的张裂剖

面与回剥反演得到的剖面近似,便得到沿整个剖面的岩石圈的伸展系数和理论热沉降。

(2) 一维应变速率方法的要点是:根据回剥实测的沉降曲线来迭代拟合张裂过程中的应变速率,由应变速率计算岩石圈的伸展系数,进而计算盆地的理论热沉降。应变速率方法的优点是无需知道岩石圈的张裂时间、张裂期次等,即可反演得到岩石圈的张裂过程。

(3) 应用二维正反演和一维应变速率正反演 2 种数值模拟方法对南海北部的白云凹陷进行模拟研究。二维模拟方法揭示白云凹陷的伸展系数沿剖面大致呈钟形分布,在凹陷中心最大,大约为 3.5。凹陷的实测裂后沉降量远大于理论裂后沉降量,表明凹陷存在异常沉降,且裂后异常沉降总量在凹陷中心最大,达到 2.6km,在凹陷南部为 1.5~2km。一维应变速率模拟揭示了白云凹陷中心岩石圈的应变速率随时间的变化,应变速率在裂后期普遍存在;由应变速率计算出的岩石圈伸展系数在裂后期继续增大;裂后的实测沉降远大于理论沉降,异常沉降量约为 2km。

本文介绍的 3 种数值模型尚不能全部表征影响伸展盆地发育的重要因素,除了瞬时伸展、幕式伸展、挠曲伸展等特点外,一些伸展盆地如珠江口盆地,在发育过程中存在限时伸展、随深度变化的伸展、受岩浆侵入影响的伸展等^[22-23]。在对白云凹陷的模拟研究中,忽略了对这些伸展特点的考虑。此外,在对白云凹陷的模拟研究中,发现凹陷存在裂后异常沉降,在凹陷中心和南侧异常沉降显著,异常沉降量约为 2km。对于异常沉降的机制,不同学者针对不同盆地提出了不同的观点,主要有裂后期发生新的张裂事件^[20]、岩浆侵入^[23]、动力地貌变化影响^[21, 24]、下地壳流影响^[25]、上地幔次生流影响^[26]等。这些机制能否用来解释白云凹陷的强烈沉降,尚需进一步的探讨。

致谢:感谢施小斌研究员所提供的用于一维应变速率计算的程序,此外感谢审稿专家审阅并提出有益的修改意见。

参考文献

- [1] 李思田, 解习农, 王华, 等. 沉积盆地分析基础与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [2] 廖杰, 周带, 赵中贤. 裂谷盆地构造热演化的数值模型及在南海北部的应用[J]. 热带海洋学报, 2010, 待刊.

- [3]Kusznir N J, Marsden G, Egan S S. A flexural-cantilever simple-shear/pure-shear model of continental lithosphere extension:applications to the Jeanne d'Arc Basin,Grand Banks and Viking Graben, North Sea [C]//Roberts A M, Yielding G, Freeman B. The Geometry of Normal Faults. Geol. Soc. London, Special Publication, 1991:41-60.
- [4]McKenzie D P. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1978, 40: 25-32.
- [5]Kusznir N J, Ziegler P A. The mechanics of continental extension and sedimentary basin formation:A simple-shear/pure-shear flexural cantilever model[J]. Tectonophysics, 1992, 215: 117-131.
- [6]Roberts A M, Yielding G, Kusznir N J, et al. Quantitative analysis of Triassic extension in the northern Viking Graben [J]. J. Geol. Soc. London, 1995, 152(1): 15-26.
- [7]Roberts A M, Kusznir N J, Yielding G, et al. 2D flexural backstripping of extensional basins: the need for a sideways glance[J]. Petrol. Geosci., 1998, 4: 327-338.
- [8]Lin C S, Zhang Y M, Li S T, et al. Quantitative Modelling of Multiphase Lithosphere Stretching and Deep Thermal History of Some Tertiary Rift Basins in Eastern China[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(3): 324-330.
- [9]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[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [10]何丽娟, 熊亮萍, 汪集旻, 等. 莺歌海盆地构造热演化模拟研究[J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(4): 415-419.
- [11]White Nicky. An inverse method for determining lithospheric strain rate variation on geological timescales[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1994, 122: 351-371.
- [12]White Nicky, Bellingham Paul. A two-dimensional inverse model for extensional sedimentary basins[J]. J. Geophys. Res., 2002, 107: 1-20.
- [13]Roberts A M, Lundin E R, Kusznir N J. Subsidence of the Voring Basin and the influence of the Atlantic continental margin[J]. J. Geol. Soc. London, 1997, 154(3): 551-557.
- [14]Clift P D, Lin J, Barckhausen U. Evidence of low flexural rigidity and low viscosity lower continental crust during continental break-up in the South China Sea[J]. Mar. Petrol. Geol., 2002, 19: 951-970.
- [15]Jarvis J T, McKenzie D P. Sedimentary basin formation with finite extension rates[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1980, 48: 42-52.
- [16]Jarvis J T, McKenzie D P. Sedimentary basin formation with finite extension rates[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1980, 48: 42-52.
- [17]Slater J G, Christie P A F. Continental stretching: An explanation of the post-Mid-Cretaceous subsidence of the central North Sea basin[J]. J. Geophys. Res., 1980, 85(B7): 3711-3739.
- [18]Stam B, Gradstein F M, Lloyd P, et al. Algorithms for porosity and subsidence history[J]. Comput Geosci-UK, 1987, 13(4): 317-349.
- [19]周蒂, 孙珍. 南海北部区域地质构造与新生代陆坡演化[C]//庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海珠江深水扇系统及油气. 北京: 科学出版社, 2007: 84-98.
- [20]Zhou D, Sun Z, Liao J, et al. Filling history and post-breakup acceleration of sedimentation in the Baiyun Sag, deep-water northern South China Sea[J]. Earth Sci-Journal of China University of Geosciences, 2009, 20(1): 160-171.
- [21]Xie X N, Müller R D, Li S T, et al. Origin of anomalous subsidence along the Northern South China Sea margin and its relationship to dynamic topography[J]. Mar. Petrol. Geol., 2006, 23(7): 745-765.
- [22]Clift P D, Lin J. Preferential mantle lithospheric extension under the South China margin[J]. Mar. Petrol. Geol., 2001, 18(8): 929-945.
- [23]Shi X B, Burov E, Leroy S, et al. Intrusion and its implication for subsidence: A case from the Baiyun Sag, on the northern margin of the South China Sea[J]. Tectonophysics, 2005, 407: 117-134.
- [24]Lithgow-Bertelloni C, Silver P G. Dynamic topography, plate driving forces and the African superswell[J]. Nature, 1998, 395: 269-272.
- [25]Morley C K, Westaway R. Subsidence in the super-deep Pattani and Malay basins of Southeast Asia: a coupled model incorporating lower-crustal flow in response to post-rift sediment loading [J]. Basin Res., 2006, 18: 51-84.
- [26]Praeg D, Stoker M S, Shannon P M, et al. Episodic Cenozoic tectonism and the development of the NW European 'passive'continental margin[J]. Mar. Petrol. Geol., 2005, 22(9/10): 1007-1030.