

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

佟殿君¹, 任建业^{2,3}, 雷超¹, 阳怀忠¹, 尹新义¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 教育部含油气盆地构造研究中心, 湖北武汉 430074

摘要: 为了揭示盆地深水区演化及裂后期大规模沉降的成因机制, 在琼东南盆地典型的、高品质地震剖面地质构造精细解释基础上, 结合岩石圈变形的挠曲悬臂梁模型和挠曲均衡模型, 应用正演和反演模拟技术, 定量恢复了该盆地所处地区的上地壳、地壳以及岩石圈的伸展程度。结果表明, 琼东南盆地自陆架边缘到深水拗陷区, 岩石圈上地壳的伸展系数较小, β 值最大为 1.23~1.32; 整个地壳的伸展系数变化较大, 盆地边缘隆起区的 β 值在 1.1~1.2 之间, 向盆地中部 β 值逐渐增大到 3.14; 而对整个岩石圈而言, 其伸展系数 β 值由陆架到陆坡深水盆地也从 1.2 逐渐增大到 4.2。根据对南海地区的构造及岩石圈和地壳的结构分析认为, 与 McKenzie 的岩石圈均一伸展以及由热控制的裂后期缓慢沉降过程不同的是, 上述与深度相关的岩石圈伸展减薄是由南海西北次海盆扩张过程中深部物质的离散上涌流动所导致的下地壳的快速而强烈的塑性流动所引起的, 并由此建立了琼东南盆地的形成演化模式, 来解释和探讨深水拗陷区及裂后期快速而大规模沉降的成因机制。

关键词: 挠曲均衡模型; 挠曲悬臂梁模型; 与深度相关的岩石圈伸展; 深水拗陷; 沉降; 琼东南盆地。

中图分类号: P618.130.2

文章编号: 1000-2383(2009)06-0963-12

收稿日期: 2009-01-11

Lithosphere Stretching Model of Deep Water in Qiongdongnan Basin, Northern Continental Margin of South China Sea, and Controlling of the Post-Rift Subsidence

TONG Dian-jun¹, REN Jian-ye^{2,3}, LEI Chao¹, YANG Huai-zhong¹, YIN Xin-yi¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Structural Research Center of Oil & Gas Bearing Basin, Ministry of Education, Wuhan 430074, China

Abstract: In order to thoroughly explain the mechanism of significant subsidence in deep waters of Qiongdongnan basin, a rifted continental marginal basin, we analyzed the high resolution seismic reflection profiles in the study area and conduct a quantitative study on upper-crust, whole crust and whole lithosphere stretching and thinning respectively by incorporating flexural cantilever model and flexural cantilever isostasy model and using both forward and reverse basin modeling techniques. Our integrated analysis shows that the extension in brittle upper crust decreases from shelf to deep basin. And the largest amount of stretching factor β is 1.23–1.32; the whole crust stretching factors change from $\beta=1.1-1.2$ of uplifts in basin margin to $\beta=3.14$ in central basin; And estimates of the whole lithosphere stretching factor change from $\beta=1.2$ on continental shelf to $\beta=4.2$ in deep basin. The analysis of tectonic geology involving lithosphere and crust, depth-dependent stretching of lithosphere in Qiongdongnan basin described above is closely related with sea floor spreading of northwestern South China Sea, which caused the discrete upwelling flow of middle and deep substance, then it resulted in the plastic flow of the lower crust rapidly and intensely. This model is different from the depth-uniform lithosphere stretching model and its slow post-rift subsidence controlled by

基金项目: 高等学校博士学科点基金项目(No. 20070491004); 国家自然科学基金项目(No. 40672089); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No. 2007CB41170502); 湖北省重点基金项目(No. 2008CPA095)。

作者简介: 佟殿君(1979-), 男, 博士研究生, 主要从事沉积盆地动力学、盆地构造模拟研究。E-mail: tdj7901@126.com

geothermal isostatic re-equilibration (McKenzie, 1978). The formation and evolution model of Qiongdongnan basin is proposed to interpret the mechanism of rapid and large-amplitude post-rift subsidence in deep water.

Key words: flexural isostasy model; flexural-cantilever model; depth-dependent lithosphere stretching; deep water sag; subsidence; Qiongdongnan basin.

自 20 世纪 70 年代以来,世界范围内的深水地区油气勘探不断取得重大突破,除了墨西哥湾、巴西坎波斯湾盆地和西非等三大深水油气勘探的热点地区外,在俄罗斯、挪威和东南亚的深水地区也不断发现大型油气田 (Alessandro *et al.*, 1997; 陶维祥等, 2006)。近几年的研究表明 (Jeremy, 2001; Pettingill and Weimer, 2002; 何家雄等, 2006), 总面积超过 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$, 包括琼东南盆地南部及珠江口盆地珠二坳陷和潮汕坳陷周缘在内的我国南海北部深水区,具有良好的基础石油地质条件和油气成藏条件,特别是白云凹陷 LW3-1-1 井所取得的突破性进展 (周蒂等, 2007; 庞雄等, 2008), 显示了我国南海北部边缘深水区的巨大勘探潜力。

近年来,英国的地质学家和油气公司联合开展的“裂谷边缘综合地震成像和模拟计划 (ISIMM)”以及美国 NSF 设立的 MARGINS 计划,都在试图揭示裂谷大陆边缘的形成演化以及岩石圈深部的复杂作用过程。在其研究过程中发现,在裂谷大陆边缘,特别是位于洋陆边界 (COB) 附近,整个大陆地壳和岩石圈地幔的伸展和减薄远大于上地壳的拉张,岩石圈发生了与深度相关的伸展减薄 (Roberts *et al.*, 1997; Driscoll and Karner, 1998; Davis and Kusznir, 2004; Kusznir *et al.*, 2005; Kusznir and Karner, 2007)。南海是我国最大的边缘海盆地,国内外学者通过对南海的研究也认识到,在其形成过程中,岩石圈由陆地南海中央海盆方向逐渐减薄,反映出岩石圈大规模的伸展减薄作用 (姚伯初, 2002; 龚再升等, 2004), 并且边缘海盆地的深水区在其裂后演化阶段发生了大规模沉降。一些学者通过岩石圈的流变学和热结构 (张健和汪集旻, 2000; 方念乔等, 2007)、地壳结构和沉积剖面特征 (李思田等, 1998; 孙珍等, 2005) 以及玄武岩地球化学及盆地的构造—热模拟 (龚再升等, 2004) 等研究表明,岩石圈的分层剪切变形以及南海扩张过程中深部地幔物质的侧向流动对南海边缘海盆地特别是深水区的形成演化具有重要的控制作用。

本文旨在应用伸展盆地构造—地层综合定量模拟的研究方法,选取穿过琼东南盆地深水区的地震测线,通过正演和反演模拟的技术方法,定量研究琼

东南盆地岩石圈不同深度内的伸展和减薄过程,并综合地球物理反演以及热流史等研究成果,从深部地球动力演化过程出发,探讨和分析琼东南盆地形成演化及深水区裂后阶段大规模沉降的成因机制模式。

1 区域地质概况

南海处在欧亚、印—澳及太平洋三大板块相互作用的交汇处,区域构造动力学条件十分复杂,其形成和演化受诸多因素的控制 (图 1)。整个南海海盆可以划分为西北、东部和西南 3 个次海盆,其间分布着洋壳,是整个海盆区地壳及岩石圈最薄的部分。根据对南海洋壳磁异常条带的综合解析、物理模拟实验以及新的地磁倒转定年表,确定南海的扩张首先开始于东部和西北次海盆,扩张时间为早—晚渐新世 (30 ~ 25.5 Ma), 西南次海盆的扩张时间为早—中中新世 (23 ~ 16 Ma) (Briais *et al.*, 1993; Cande and Kent, 1995; Ren *et al.*, 2002; 孙珍等, 2009)。

南海北部边缘古近纪形成的大陆边缘裂陷型盆地,自北东向南西依次为台西南、珠江口、琼东南和莺歌海盆地 (图 1)。这些盆地均位于减薄的陆壳之上, Moho 埋深最浅处仅 20 ~ 22 km, 岩石圈的变化趋势是由陆地南海中央海盆方向减薄 (姚伯初, 1998)。而从陆地经大陆边缘至海盆,地壳和岩石圈的速度结构发生变化,反映出岩石圈类型的变化 (姚伯初等, 2005)。南海是一个高热流地区,平均热流值高达 78.3 mW/m^2 , 并且整体趋势是热流值从北部陆缘向中央海盆逐渐升高。较高的热流背景表明,南海可能处在地幔上隆区 (龚再升等, 2004)。通过反映岩石圈流变学特征的有效粘滞系数 η 的计算 (张健和汪集旻, 2000), 南海北部边缘沉积层和上地壳有效粘滞系数背景较高, η 在 $10^{22} \sim 10^{25} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 之间变化; 下地壳中有效粘滞系数在 $10^{21} \sim 10^{22} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 之间变化,上、下地壳 η 值的最大差值达 3 个数量级。南海北部大陆边缘在整个新生代期间始终保持较强的岩浆活动,在晚古新世至始新世早期主要为中酸性火山岩; 中始新世及渐新世兼有中性及基性喷发岩,至古近纪晚期逐渐转化为以碱性玄武岩和拉斑玄武

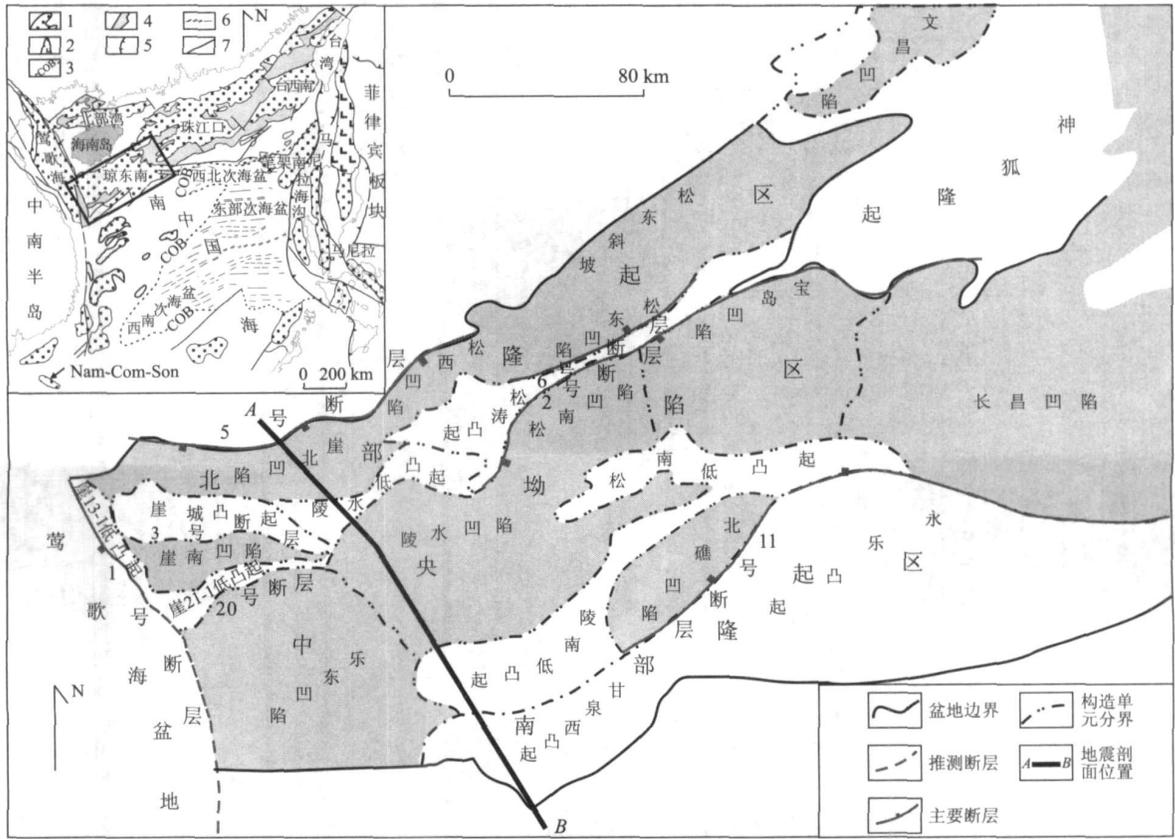


图 1 琼东南盆地地质背景及其构造单元划分(据龚再升等, 2004)

Fig. 1 Regional geological setting and its tectonic unit division of Qiongdongnan basin

- 1. 新生代盆地(E-Q); 2. 海底火山弧; 3. 海陆边界; 4. 盆地中的隆起、低凸起; 5. 俯冲及仰冲带; 6. 海壳及磁条带、扩张轴; 7. 断裂

岩为主的裂陷盆地火山序列(李思田等, 1998)。

琼东南盆地是在前第三纪基底之上发育的新生代断陷盆地, 属于大陆边缘裂陷型盆地. 盆地面积约为 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$, 由北向南依次划分为北部隆起区、中央拗陷区和南部隆起区 3 个二级构造单元, 每个二级构造单元又相应地划分了凹陷和凸起等次一级的构造单元(图 1). 琼东南盆地的基底由前新生代的火成岩、变质岩及沉积岩组成. 盆地充填序列则主要由新生代地层组成, 由下至上依次为始新统、渐新统的崖城组和陵水组、中新统的三亚组、梅山组和黄流组, 上新统的莺歌海组以及第四系乐东组(图 2). 盆地的演化经历了古近纪断陷、新近纪拗陷两个主要阶段. 在裂陷阶段, 盆地充填了陆相及海陆过渡相沉积序列, 21 Ma 以来, 琼东南盆地开始进入裂后演化阶段, 发生了大规模的热沉降, 充填了两三千米厚的海相沉积序列, 特别是 5.5 Ma 以来, 盆地基底的沉降速率明显加快, 进入了加速沉积期(龚再升等, 1997)(图 2).

2 研究方法

2.1 与深度相关的岩石圈伸展

Mckenzie(1978)的深度均一伸展模型成功应用于陆内裂谷盆地的形成演化研究, 而有关裂谷大陆边缘的形成机制却存在较大的争议. 近些年来, 国外学者在澳大利亚西北裂谷边缘(Driscoll and Karner, 1998; Baxter *et al.*, 1999)、挪威裂谷边缘(Roberts *et al.*, 1997)、英格兰西南的深水区和伊比利亚半岛西海岸(Davis and Kusznir, 2004; Kusznir *et al.*, 2005)的调查研究发现, 在洋陆边界(COB)附近或者洋脊扩张轴向上, 大陆岩石圈的伸展在很大程度上与深度相关, 并且伸展量随深度而增大.

对于裂谷大陆边缘的岩石圈伸展的定量研究, Davis and Kusznir(2004)提供了一种不同深度的伸展系数的计算方法(图 3), 并将其成功应用于 Goban Spur, galicia Bank、Vøring 边缘以及珠江口盆地的研究. 在计算过程中, 上地壳拉张量通过对地震剖

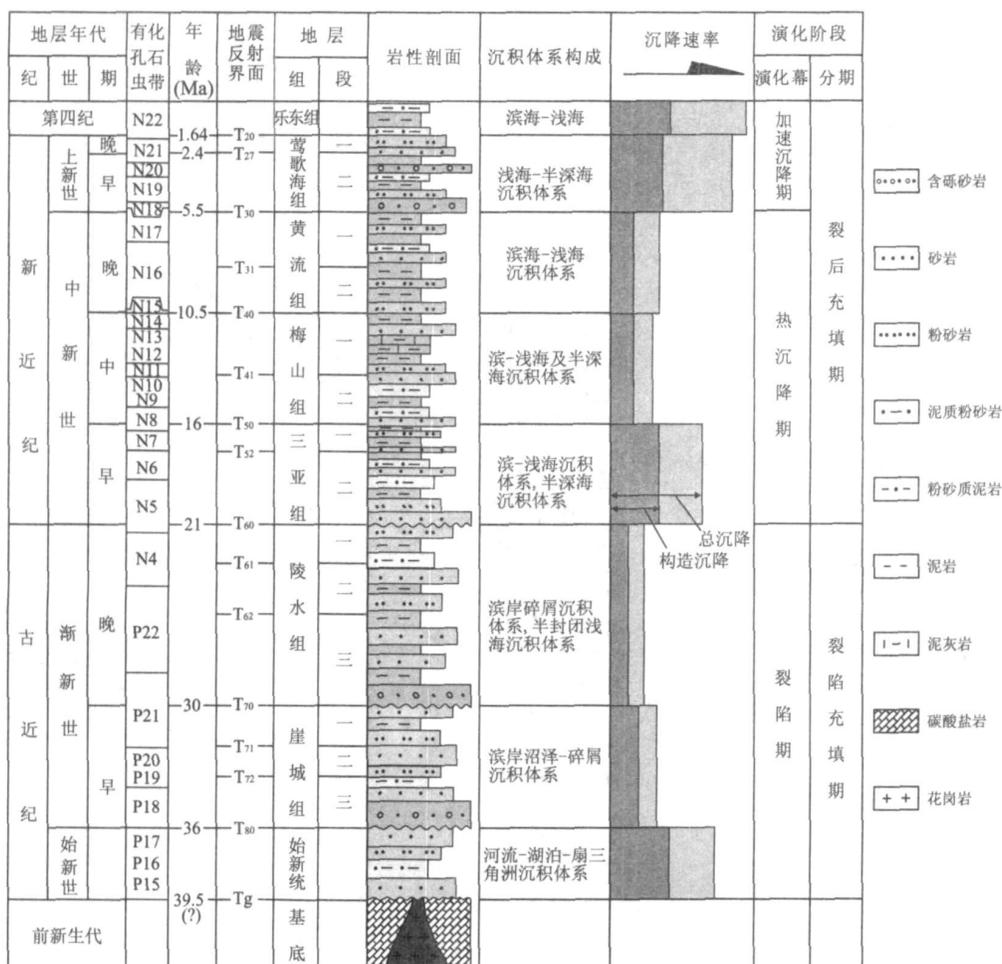


图 2 琼东南盆地地层及盆地演化综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive column map of strata and basin evolution of Qiongdongnan basin

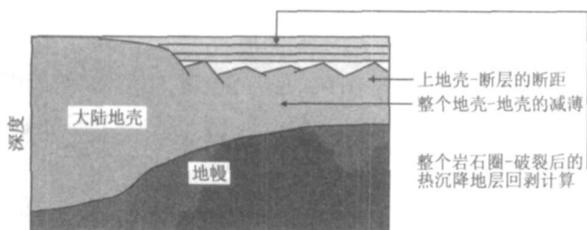


图 3 岩石圈内不同深度的伸展计算方法示意图 (Davis and Kuszniir, 2004)

Fig. 3 Schematic diagram illustrating the three methods used to estimate stretching at depth within the lithosphere

面上断层水平断距的统计求和求取; 整个地壳的伸展利用地震折射成像、地震反射成像或重力反演的方法所确定的地壳的减薄量进行计算; 整个岩石圈的伸展则是依据岩石圈在伸展过程中所产生的热异常在裂后期将重新均衡, 进而导致了裂后热沉降。因此通过记录裂谷边缘破裂后沉降历史的沉积地层信

息, 应用挠曲回剥、去压实和反演模拟等方法恢复裂后热沉降可以确定整个岩石圈的伸展程度。

2.2 基于挠曲悬臂梁模型和挠曲均衡模型的正演、反演模拟技术

挠曲用来描述岩石圈响应重力负载的弯曲, 岩石圈的抗挠曲强度用它的有效弹性厚度 T_e 来表示, 当岩石圈的强度是有限的且在一定的范围内时, 在负载的作用下将发生挠曲均衡响应, 负载呈阻尼谐振波状挠曲分布, 正负载在其周围形成了一个拗陷, 负负载则相应形成了一个隆起。

本次研究中, 我们应用挠曲悬臂梁模型进行裂谷构造的正演模拟, 同时应用挠曲均衡模型, 结合热沉降反演模拟技术恢复盆地裂后期的沉降历史。

挠曲悬臂梁模型 (flexural cantilever model) 描述了上地壳平面状断裂伸展以及下地壳和地幔岩石圈中的塑性分散变形与岩石圈的几何形态、热和挠曲均衡的响应关系 (Kuszniir *et al.*, 1991)。模型假定

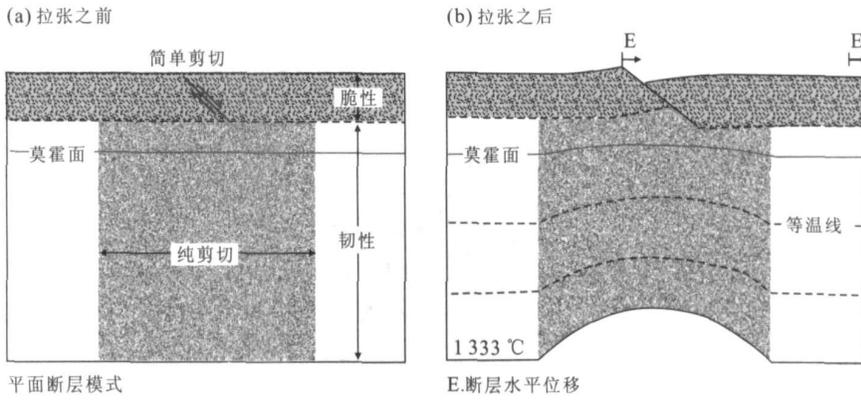


图 4 岩石圈变形的挠曲悬臂梁模型(Kusznir et al., 1991)

Fig. 4 A schematic diagram of the flexural-cantilever model for lithosphere deformation

上地壳是一个有限强度层 ($0 < T_e < \infty$), 脆性的上地壳在拉张应力作用下发生断层作用, 导致岩石圈变形并形成一个沉积盆地, 下地壳和岩石圈地幔则以塑性变形的的方式来响应上地壳的拉张. 在断裂过程中, 上盘和下盘断块可以看成是两个相互作用的挠曲悬臂, 伸展产生的均衡力导致了下盘断块的悬臂抬升, 同时上盘发生沉降 (图 4b). 模型应用挠曲均衡、压实作用、沉积负载、侵蚀和岩石圈的热扰动, 可以定量计算岩石圈的拉张量、伸展系数的大小、下盘抬升、剥蚀量以及与裂隙作用有关的热流值等.

反演模拟以挠曲均衡作为其理论模型, 通过地层的挠曲回剥和去压实作用, 在确定的古深度标志约束下, 恢复盆地裂后期的构造和地层几何形态 (Roberts et al., 1997; Baxter et al., 1999). 这种方法可以用来预测盆地的古水深、古地形、沉积斜坡以及计算独立于断块构造的伸展系数 β . 模拟过程中用来控制裂后期热沉降的伸展系数 β , 可以通过正演模拟计算断层断距或经过反复实验直到得到最合适的恢复结果的方法来确定.

2.3 参数设定

本次研究中, 应用伸展盆地结构和构造模拟软件 Stretch 和 Flex-Decomp 进行正演和反演模拟. 无论是正演的 Stretch 软件, 还是反演的 Flex-Decomp 软件, 在建立模型之前以及模拟的过程中, 都需要对一些参数进行设定, 以求使得模型尽量与实际地质情况吻合. 其中一些参数控制了模型的大地构造属性和模拟的精度, 例如: 岩石圈的密度和热属性、莫霍面的深度、脆性层的厚度以及海平面的变化等, 这些参数与模拟的盆地的区域地质背景和深部岩石圈物理条件有关, 需要根据实际地质情况在建立模型之前设定好 (表1). 在模拟的过程中, 假定岩

表 1 正演和反演模拟所用的属性参数

Table 1 Property parameters used in the forward modeling and reverse modeling

属性参数	参数值
原始岩石圈厚度	125 km
原始地壳厚度	32 km
上地壳脆性层厚度	15 km
地幔密度	3 300 kg/m ³
地壳密度	2 800 kg/m ³
沉积物骨架密度	2 680 kg/m ³
水密度	1 000 kg/m ³
软流圈顶部温度	1 333 °C
热膨胀系数	3.28×10^{-5}

石圈是一个有限强度层 ($0 < T_e < \infty$), 岩石圈在负载的作用下将发生挠曲均衡响应, 负载呈阻尼谐波状挠曲分布. 挠曲均衡响应的波形受控于有效弹性厚度 T_e 值的大小, T_e 越大, 负载以及相应的垂直变形分布的范围越宽. 因此, T_e 参数的设定, 对模拟的结果具有很大的影响, 根据前人的研究 (Roberts et al., 1997; Driscoll and Karner, 1998; Baxter et al., 1999), 在伸展构造期, 岩石圈的有效弹性厚度都比较低, T_e 一般只有几千米 (2 ~ 5 km).

在进行裂后期反演模拟时, 模拟结果的精度与准确性除了受到 T_e 的影响之外, 还需要确定模型的热输入控制, 即确定伸展系数 β 的合理取值范围, 从而使恢复的结果更符合实际地质情况. 伸展系数 β 的确定是根据所恢复的地质时期 (如裂隙末期) 当时盆地内的一些特殊地质标志 (如隆起区的剥蚀、沉降区的古水深等), 通过将这些特殊地质过程恢复到原始状态而确定该位置的伸展系数, 以此种方法, 经反复测试, 最终可以比较准确地获得整个盆地裂后期热沉降的伸展系数.

3 琼东南盆地不同深度的岩石圈伸展定量模拟

选取了一条琼东南盆地最新典型的高品质区域性地震剖面 A—B(图 5),并根据盆地的 VSP 曲线和叠前地震数据获得了琼东南盆地的速度场,应用此速度场将地震剖面 A—B 的时间剖面(图 5a)转换成深度剖面(图 5b).该剖面从盆地西北部的陆架浅水区向东南延伸逐渐过渡到深水区,根据构造特征可分为北部隆起区、中央拗陷区和南部隆起区.通过构造—地层和层序地层的综合解释,确定了盆地的构造格架以及裂陷期(39~21 Ma)和裂后期(21 Ma~现今)的地层展布形态.应用前述不同深度的岩石圈伸展的计算方法并结合正演和反演模拟技术,计算了从琼东南盆地西北陆架边缘地区到盆地东南部深水区的不同深度的岩石圈伸展系数,结果如下:

3.1 上地壳伸展系数

上地壳伸展系数 β 是通过在地震剖面上统计裂陷期活动的、断达基底并控制地层沉积的断层的几何参数,包括每条断层的上部断端的位置、水平伸展量、初始倾角和倾向等,应用 Stretch 软件正演模拟求取.考虑到地震剖面的分辨率有限,根据地震剖面上识别的断层来估算的伸展量会偏小 35%~40%,

所以模拟所获得的伸展系数值可能与实际的情况存在一定的偏差,需要加以修正.在建立正演模型的过程中,综合琼东南盆地的地质背景和深部地球物理资料,确定了模型的大地构造和岩石圈物理属性(表 1),而模型的有效弹性厚度 T_e 设定为 3 km.由此得到了剖面 A—B 裂陷期的剖面(图 6a)以及上地壳的伸展系数(图 6b),其中,上地壳伸展系数的变化不大, β 值整体在一个较小的范围内变化,最大 β 值在 1.23~1.32 之间.

3.2 整个地壳伸展系数

假定地壳厚度的变化是地壳的拉张和减薄的结果,由此可以估算整个地壳的伸展程度.将初始地壳厚度(t_0)设定为 32 km,而现今的地壳厚度(t_c)可以通过重力反演获得莫霍面反射深度数据(龚再升等, 2004)以及通过盆地沉降深度来获得,应用公式(1)可以计算整个地壳的伸展系数:

$$\beta = t_0 / t_c. \tag{1}$$

应用该方法,求取了剖面 A—B 的整个地壳伸展系数 β 值的横向变化剖面(图 7), β 剖面呈现峰值的变化,在盆地的两侧隆起区, β 值较小(<1.5).但从陆架进入盆地深水区, β 值逐渐增大,在盆地中央拗陷区沉降最深处达到最大, $\beta=3.14$.

3.3 整个岩石圈伸展系数

通过应用 Flex-Decomp 软件,运用挠曲回剥、

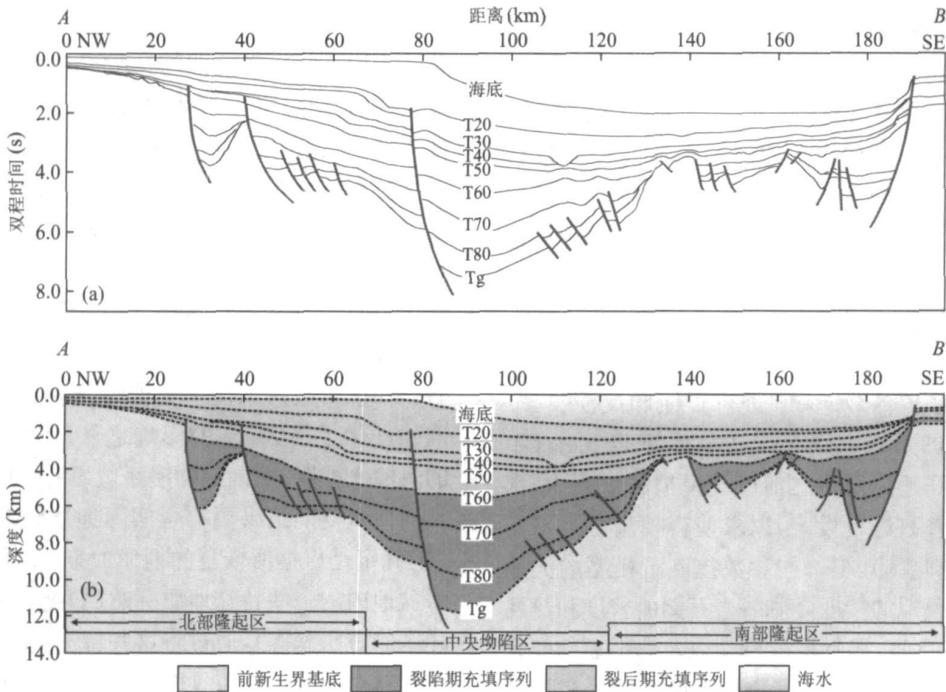


图 5 琼东南盆地地震剖面及其地质构造解释(位置见图 1)

Fig. 5 Seismic profile and geological structure interpretation across the Qiongdongnan basin

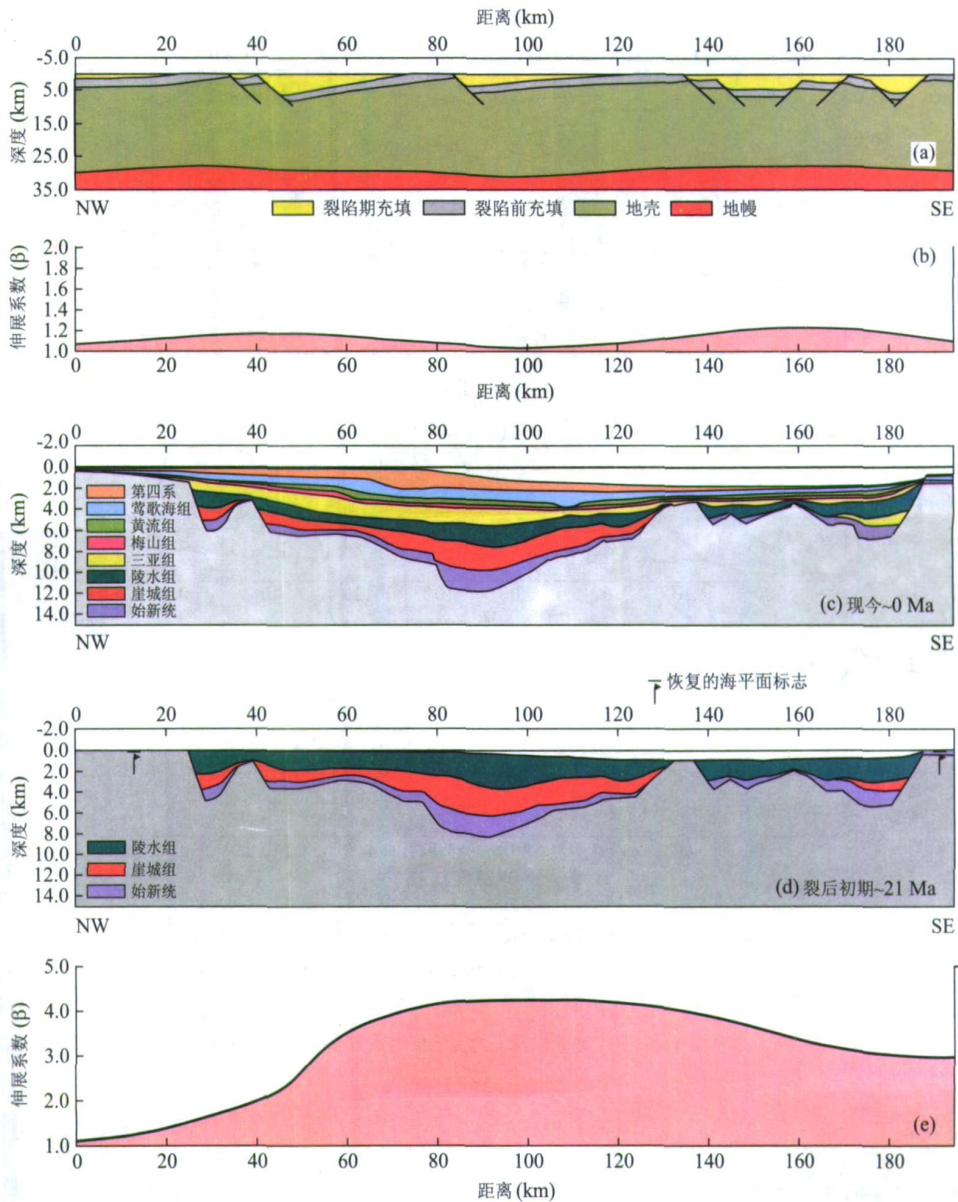


图 6 正演及挠曲回剥反演模拟琼东南盆地 A—B 剖面形态及其伸展系数 β

Fig. 6 The sections and the stretching factor profile by forward modeling and flexural backstripping reverse modeling of A—B section in Qiongdongnan basin

a. 正演模拟的裂陷期剖面; b. 裂陷期上地壳伸展系数 β 剖面; c. 挠曲回剥反演恢复的现今剖面形态; d. 反演到裂后初期 (21 Ma) 时的剖面形态; e. 控制热演化的伸展系数 β 剖面

去压实以及裂后热沉降反演模拟等关键技术, 获取了剖面 A—B 整个岩石圈的伸展系数. 为了使模拟的结果与实际地质情况相吻合, 研究过程中进行了岩石圈有效弹性厚度 T_e 和模型的热控制 β 值的灵敏度测试. 对所建立的反演模型, 通过输入 $T_e = 0 \text{ km}, 3 \text{ km}, 5 \text{ km}, 10 \text{ km}$ 和 15 km 等不同的值进行反复验证, 确定了 $T_e = 3 \text{ km}$ 是比较符合实际地质情况的取值, 而 β 值则根据将模拟的现今地质剖面 (图 6c) 逐层回剥到裂后初期阶段 (21 Ma), 综合考

虑裂后初期的沉积古地理环境和沉积相, 在 21 Ma 时, 琼东南盆地出现了滨—浅海相以及半深海相, 通过输入不同的 β 值控制古水深, 最终恢复了与裂后初期实际地质情况比较吻合的盆地形态 (图 6d), 并由此得到了控制裂后期热沉降的整个岩石圈的伸展系数 β 剖面 (图 6e). 模拟结果表明, 从盆地西北侧陆架区的 $\beta = 1.2$ 向盆地中央深水区逐渐增大到 4.2, 然后向盆地西南又逐渐减小到 3, β 值整体的变化范围较整个地壳的要大, 而且更远大于上地壳的

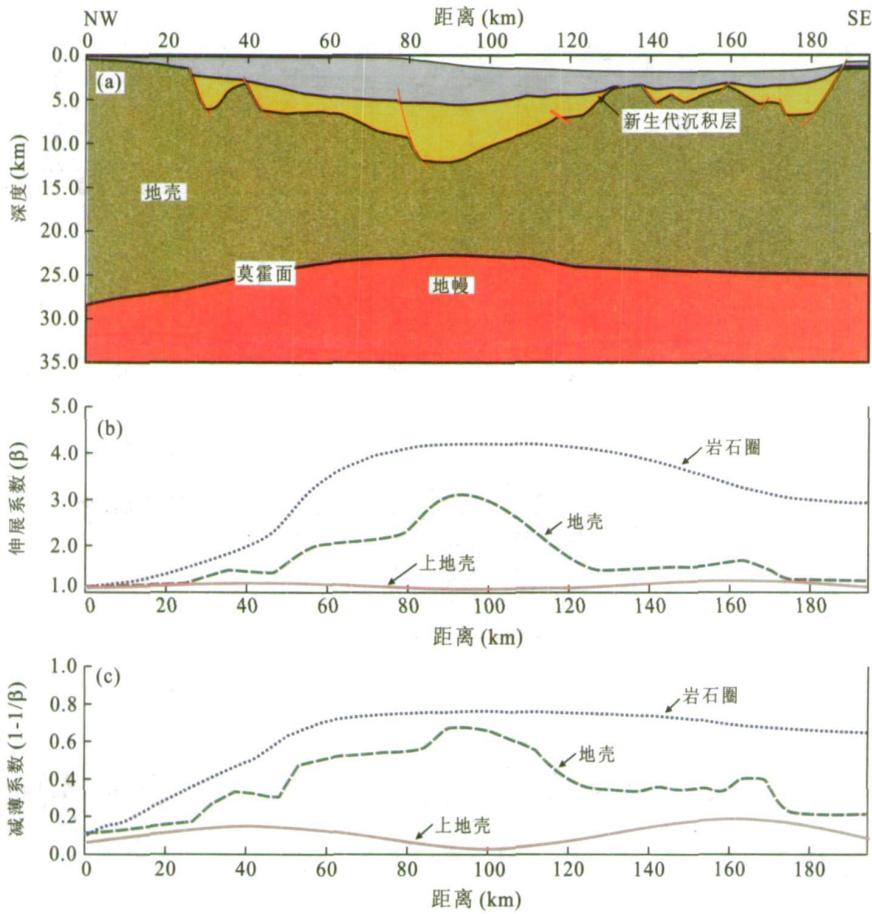


图 7 琼东南盆地 A-B 剖面地壳结构及岩石圈不同深度的伸展和减薄系数

Fig. 7 The crustal structure and the stretching and thinning factors of different depths within the lithosphere of A-B section in Qiongdongnan basin

a. 琼东南盆地剖面 A-B 的地壳结构; b. 整个岩石圈、整个地壳以及上地壳的伸展系数 β 变化剖面; c. 整个岩石圈、整个地壳以及上地壳的减薄系数 $(1-1/\beta)$ 变化剖面

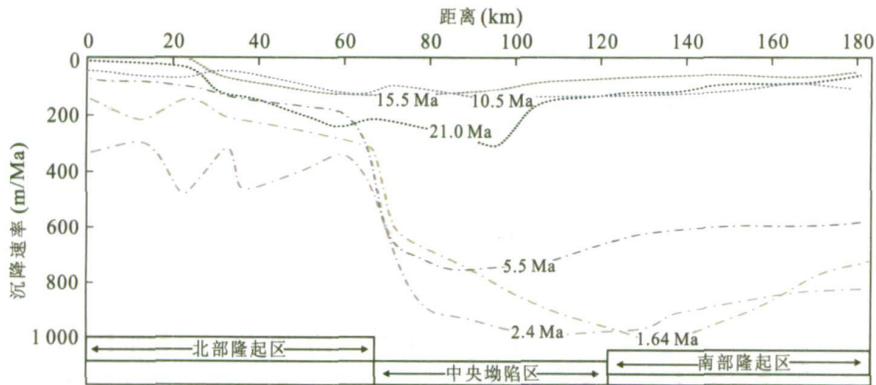


图 8 琼东南盆地 A-B 剖面裂后阶段不同时期沉降速率曲线(位置见图 1)

Fig. 8 The subsidence rate of different post-rift stages of the A-B section in Qiongdongnan basin

β 值.

3.4 琼东南盆地伸展系数随深度的变化

综合以上模拟结果以及区域重力反演资料,建立了剖面 A-B 的整个地壳范围内的深度剖面(图

7a)以及相应的上地壳、地壳和岩石圈的伸展系数(图 7b)和减薄系数 $(1-1/\beta)$ 变化剖面(图 7c). 整个地壳的厚度从盆地两侧的隆起区向盆地中央坳陷区逐渐变小,相应的地幔隆起区与盆地沉降区形成很

好的镜像关系(图7a)。而图7b和7c表明,上地壳发生的伸展和减薄规模很小,在整个盆地范围内没有很大的变化,而从盆地边缘的隆起区向盆地深水区,地壳和岩石圈的伸展系数却逐渐增大,并且在盆地中央拗陷区达到了最大,其 β 值的范围也远大于上地壳,表明从盆地的边缘向盆地的中央深水拗陷区,地壳和岩石圈的伸展和减薄的规模和程度逐渐增大,发生了与深度相关的伸展。

应用 Sclater and Christie (1980) 提出的沉降史回剥反演模拟方法,通过沉积物负载校正、压实校正以及古水深校正等,恢复了不同时期的地层厚度,确定了裂后阶段各个时期的沉降曲线变化特征(图8)。从盆地隆起区到深水拗陷区,沉降速率逐渐增大,特别是 5.5 Ma 以来的晚期阶段,沉降速率发生显著变化,在盆地的中央拗陷区,沉降速率突然加快,最大沉降速率可达 1 030 m/Ma。与此相应的是盆地在较短的裂后演化时间内(21 Ma)发生了大规模沉降,在中央拗陷区最大沉降深度达到了 6 300 m。

4 琼东南盆地形成演化及岩石圈伸展模式讨论

McKenzie (1978) 的深度均匀伸展模型实际描述的是岩石圈整体均一伸展的一级响应结果,所揭示的是岩石圈伸展作用所导致的盆地沉降的普遍特征。但是 McKenzie 模式将裂后期沉降看作是深部软流圈的回落导致的岩石圈热收缩以及沉积负载作用控制下的均匀缓慢的沉降过程,沉降速率随时间呈幂指数式减小。然而,上述对琼东南盆地的定量模拟研究分析表明,琼东南盆地深水拗陷区的上地壳、地壳和岩石圈的伸展程度显著不同,并非整个岩石圈的均一伸展,而显示出与深度相关的伸展减薄作用过程;此外,琼东南盆地深水拗陷区裂后演化阶段表现为较短时间内的快速的、大规模的沉降。这些特征表明,琼东南盆地具有区别于一般拉伸盆地的伸展机制和盆地演化过程。下面结合研究区内盆地和深部岩石圈的基本地质和地球物理特征,探讨琼东南盆地的伸展机制和模式,并分析其对盆地裂后期快速沉降的控制。

大陆裂解和裂谷大陆边缘的形成是板块构造旋回一个重要的动力学过程和基本组成部分。在特定的板块构造背景中,沉积盆地的伸展作用是深部地

壳和岩石圈动力学变化过程在上地壳的构造表现。Kusznir *et al.* (2005) 通过北大西洋 Lofoten 和 V ϕ ring 裂谷边缘的研究证实,与深度相关的伸展发生在海底扩张初始期或早期阶段,而不是发生于大陆裂解之前的裂陷作用阶段。因此,琼东南盆地所发生的与深度相关的岩石圈伸展减薄可能与南海的扩张有关。从大地构造位置上看,琼东南盆地深水区处于南海西北次海盆扩张轴向西的延伸方向上,属于洋陆过渡的区域范围。张健和汪集旻(2000)通过地热学和重力学方法计算了南海北部边缘不同界面的温度和流变结构,其结果表明,岩石圈深部的温度结构特征是上地壳和岩石圈上地幔温度相对较低,下地壳温度相对较高的“三明治”温度分层结构。通过流变学研究表明,上地壳有效粘滞系数 η 相对较大,而下地壳有效粘滞系数 η 很小,上、下地壳 η 值的最大差值达3个数量级(张健和汪集旻,2000; Clift *et al.*, 2002)。地壳的这种热和流变学分层结构,决定了岩石圈拉张变形的过程中,上地壳以脆性变形为主,下地壳则以塑性流动为主,发生塑性变形。Kusznir and Karner (2007) 曾对英国北部的 Faroes-Shetland 盆地以及越南近海的 Nam-Com-Son 盆地(图1)进行过研究,这两个盆地都位于扩张中脊的延伸方向上, Faroes-Shetland 盆地位于挪威裂谷边缘洋中脊的走向上, Nam-Com-Son 盆地位于南海西南次海盆扩张轴西南延伸方向上。这两个盆地虽然位于不同板块地区,但它们在裂后阶段都经历了大规模的热沉降过程,相应的岩石圈伸展系数都至少达到了3或更高(Nam-Com-Son 盆地 $\beta=5$),而上地壳的断层作用所产生的拉张都非常微小(Faroes-Shetland 盆地 $\beta<1.4$, Nam-Com-Son 盆地 $\beta=1.15$),表明这些地区都发生了与深度相关的伸展。

通过以上的综合分析,笔者认为在南海扩张之前,琼东南盆地经历了陆内裂陷演化阶段,上地壳发生脆性拉张,形成断层作用,而下地壳和岩石圈地幔发生塑性变形来响应上地壳的拉张,整个岩石圈范围内发生有限程度的($\beta<1.5$)深度均一的伸展减薄(McKenzie 模式)(图9a)。此后,由于南海西北次海盆的扩张,深部的流体活动作用加强,大陆岩石圈和软流圈内发生了离散上涌流动,随着深部物质的离散上涌流从岩石圈的底部开始的逐步向上扩展,使温度较高且粘滞性较小的下地壳发生了塑性流动,导致了岩石圈地幔以及地壳发生快速而强烈的减薄。此过程基本发生在包括下地壳以及岩石圈地幔在内的塑性层内,脆性的上地壳基本没有活动,岩石

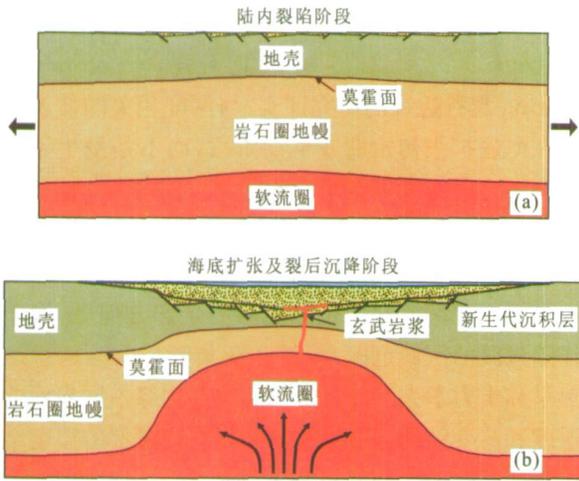


图 9 琼东南盆地的形成演化模式

Fig. 9 A model for the formation of Qiongdongnan basin

圈发生了不同深度的伸展. 由于下地壳的强烈的伸展减薄, 在裂后阶段上地壳的挠曲均衡响应, 使岩石圈表层发生大规模的沉降, 特别是 5 Ma 以来的裂后晚期阶段, 深部地幔对流引起的动力沉降以及强烈的岩石圈减薄可能引起沉降速率的突然加快 (Xie *et al.*, 2006; 崔涛等, 2008), 导致了琼东南盆地深水拗陷区的形成 (图 9b).

本次研究中所得到的琼东南盆地深水区与深度相关的岩石圈伸展及裂后快速而大规模沉降的形成演化模式, 主要是从岩石圈深部动力因素出发, 研究在南海扩张过程中深部流体的离散上涌流动对大陆边缘及其边缘海盆地产生的影响. 对于整个南海地区而言, 不仅在琼东南盆地和 Nam-Com-Son 盆地这种位于洋脊扩张轴向上的盆地发生了岩石圈与深度相关的伸展, 在珠江口盆地邻近洋陆边界的深水区同样发生了与深度相关的伸展 (Clift *et al.*, 2002; Davis and Kusznir, 2004). Davis and Kusznir (2004) 选取了一条珠江口盆地从陆架浅水区向东南延伸到深水拗陷区的剖面作了地壳伸展的定量分析, 上地壳的伸展系数 β 接近于 1.3, 基本没有变化, 而整个地壳的伸展系数在盆地西北部的陆架区很小 ($\beta < 1.5$), 向东南延伸到洋陆边界附近时 β 逐渐增大到 2.4, 并且在盆地深水拗陷区 β 最大达到 4. 其结果表明, 珠江口盆地在邻近大陆一侧, 地壳的伸展基本与上地壳保持一致, 而到了盆地的东南部深水区的洋陆边界附近, 地壳的伸展减薄程度逐渐增大, 远远大于了上地壳, 发生了显著的与深度相关的伸展. 综上所述, 在整个南海的边缘海盆地深水区, 这种与深度相关的伸展作用是广泛存在的, 通过

对琼东南盆地岩石圈不同深度的伸展的定量研究所建立的盆地演化及裂后大规模沉降的演化模式, 对分析整个南海的盆地深水拗陷区的形成演化具有重要意义.

5 结论

(1) 琼东南盆地自陆架边缘向深水拗陷区, 发生了与深度相关的岩石圈伸展. 其中上地壳的伸展系数较小, 最大伸展系数 $\beta = 1.23 \sim 1.32$; 地壳和岩石圈的伸展系数则发生了较大的变化, 地壳的伸展系数 β 从盆地两侧的 $\beta < 1.5$ 向盆地中央深水拗陷区逐渐增大, 最大 $\beta = 3.14$; 岩石圈的伸展系数由盆地隆起区的 $\beta = 1.2$ 逐渐增大到盆地中央深水拗陷区 $\beta = 4.2$.

(2) 琼东南盆地属于大陆边缘型盆地, 位于南海西北次海盆的扩张轴向上, 其形成演化经历了两个阶段, 在西北次海盆扩张之前的陆内裂陷阶段, 表现为有限程度的岩石圈均一伸展过程; 此后, 受西北次海盆的扩张影响, 岩石圈深部的离散上涌流逐步向上扩展, 导致了温度较高且粘滞性较低的下地壳发生了塑性流动, 下地壳和岩石圈地幔强烈伸展减薄, 岩石圈发生与深度相关的伸展作用过程. 在下地壳强烈减薄区, 裂后演化阶段上地壳及岩石圈表层的挠曲均衡响应, 引起了快速而大规模的沉降, 形成深水拗陷.

致谢: 本文研究过程中所用的 StretchTM 和 Flex-DecompTM 盆地模拟软件是由 Badley Geoscience 公司的 Alan Roberts 教授提供, 并多次给予笔者帮助和指导, 在此表示衷心感谢!

References

- Alessandro, O. S., Eris C. J., Arturo, A. M. J., et al., 1997. The petroleum potential of deep-water Northwest Palawan Block GSEC 66. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15(2-3): 217-240.
- Baxter, K., Cooper, G. T., Hill, K. C., et al., 1999. Late Jurassic subsidence and passive margin evolution in the Vulcan sub-basin, North-West Australia: Constraints from basin modelling. *Basin Research*, 11(2): 97-111.
- Briaux A., Patriat, P., Tapponnier, P., 1993. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea; Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia. *Journal of Geophysi-*

- cal Research*, 98(B4): 6299–6328.
- Cande, S. C., Kent, D. V., 1995. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research*, 100(B4): 6093–6095.
- Clift, P., Lin, J., Barckhausen, U. E., 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.
- Cui, T., Xie, X. N., Ren, J. Y., et al., 2008. Dynamic mechanism of anomalous post-rift subsidence in the Yinggehai basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(3): 349–356 (in Chinese with English abstract).
- Davis, M., Kuszniir, N. J., 2004. Depth-dependent lithospheric stretching at rifted continental margins. In: Karner, G. D., ed., Proceedings of NSF rifted margins theoretical institute. Columbia University Press, New York, 92–136.
- Driscoll, N. W., Karner, G. D., 1998. Lower crustal extension across the northern Carnarvon basin, Australia: Evidence for an eastward dipping detachment. *Journal of Geophysical Research*, 103(B3): 4975–4991.
- Fang, N. Q., Yao, B. C., Wan, L., et al., 2007. The velocity structure of the lithosphere and the origin of sedimentary basins in the South China and northern margin of the South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(2): 147–154 (in Chinese with English abstract).
- Gong, Z. S., Li, S. T., Wang, J. Y., et al., 2004. Dynamic research of oil and gas accumulation in northern marginal basins of South China Sea. Science Press, Beijing, 3–45 (in Chinese).
- Gong, Z. S., Li, S. T., Xie, T. J., et al., 1997. Continental marginal basins analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea. Science Press, Beijing, 1–192 (in Chinese).
- He, J. X., Xia, B., Shi, X. B., et al., 2006. Prospect and progress for oil and gas in deep waters of the world, and the potential and prospect foreground for oil and gas in deep waters of the South China Sea. *Natural Gas Geoscience*, 17(6): 747–752, 806 (in Chinese with English abstract).
- Jeremy, B., 2001. Productivity shortfall puts deepwater exploration gains in perspective. *Offshore*, 61(4): 84.
- Kuszniir, N. J., Hunsdale, R., Roberts, A. M., et al., 2005. Timing and magnitude of depth-dependent lithosphere stretching on the southern Lofoten and northern Vøring continental margins offshore Mid-Norway: Implications for subsidence and hydrocarbon maturation at volcanic rifted margins. In: Doré, A. G., Vining, B. A., eds. Petroleum geology: North-West Europe and global perspectives—Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference. Geological Society, London, 767–783.
- Kuszniir, N. J., Karner, G. D., 2007. Continental lithospheric thinning and breakup in response to upwelling divergent mantle flow: Application to the Woodlark, Newfoundland and Iberia margins. *Geological Society, London, Special Publications*, 282: 389–419.
- Kuszniir, N. J., Marsden, G., Egan, S. S., 1991. A flexural-cantilever simple-shear/pure-shear model of continental lithosphere extension. In: Roberts, A. M., Yielding, G., Freeman, B., eds, The geometry of normal faults. *Geological Society, London Special Publications*, 56: 41–60.
- Li, S. T., Lin, C. S., Zhang, Q. M., et al., 1998. Episodic rifting and its dynamical process in north continental margin of South China Sea, and the tectonic event from 10 Ma. *Science Bulletin*, 43(8): 797–810 (in Chinese).
- McKenzie, D. P., 1978. Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40(1): 25–32.
- Pang, X., Chen, C. M., Peng, D. J., et al., 2008. Basic geology of Baiyun deep-water area in the northern South China Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 20(4): 215–222 (in Chinese with English abstract).
- Pettingill, H. S., Weimer, P., 2002. Deepwater remains immature frontier. *Offshore* 62(10): 48–50.
- Ren, J. Y., Tamaki, K., Li, S. T., et al., 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344(3–4): 175–205.
- Roberts, A. M., Lundin, E. R., Kuszniir, N. J., 1997. Subsidence of the Vøring basin and the influence of the Atlantic continental margin. *Journal of the Geological Society*, 154(3): 551–557.
- Sclater, J. G., Christie, P. A. F., 1980. Continental stretching: An explanation of the post-Mid-Cretaceous subsidence of the central North Sea basin. *Journal of Geophysical Research*, 85(B7): 3711–3739.
- 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., Sun, L. T., Zhou, D., et al., 2009. Discussion on the South China Sea evolution and lithospheric breakup

- through 3D analogue modeling. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(3): 435—447 (in Chinese with English abstract).
- Tao, W. X., Ding, F., He, S. B., et al., 2006. Deepwater petroleum exploration abroad and deepwater petroleum. *Geological Science and Technology Information*, 25(6): 59—66 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Müller, 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.
- Yao, B. C., 1998. Crust structure of the northern margin of the South China Sea and its tectonic significance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 18(2): 1—16 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., 2002. Deformation characteristics of break off and separation of continental lithosphere. In: Gao, S., Li, J. B., eds., *Formation and evolution of Chinese marginal sea*. China Ocean Press, Beijing, 1—13 (in Chinese).
- Yao, B. C., Wan, L., Wu, N. Y., 2005. Cenozoic tectonic evolution and the 3D structure of the lithosphere of the South China Sea. *Geological Bulletin of China*, 24(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Wang, J. Y., 2000. Deep geodynamic characteristics of tectonic spreading in continental margin of the northern South China Sea. *Science in China (Series D)*, 30(6): 561—567 (in Chinese).
- Zhou, D., Sun, Z., Chen, H. Z., 2007. Tectonic features of world's major deep-water oil/gas fields and their enlightenment to deep-water exploration in northern South China Sea. *Advances in Earth Science*, 22(6): 561—571 (in Chinese with English abstract).
- 349—356.
- 方念乔, 姚伯初, 万玲, 等, 2007. 华南和南海北部陆缘岩石圈速度结构特征与沉积盆地成因. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(2): 147—154.
- 龚再升, 李思田, 汪集暘, 等, 2004. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究. 北京: 科学出版社, 3—45.
- 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. 北京: 科学出版社, 1—192.
- 何家雄, 夏斌, 施小斌, 等, 2006. 世界深水油气勘探进展与南海深水油气勘探前景. *天然气地球科学*, 17(6): 747—752, 806.
- 李思田, 林畅松, 张启明, 等, 1998. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及 10 Ma 以来的构造事件. *科学通报*, 43(8): 797—810.
- 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等, 2008. 南海北部白云深水区之基础地质. *中国海上油气*, 20(4): 215—222.
- 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, 孙龙涛, 周蒂, 等, 2009. 南海岩石圈破裂方式与扩张过程的三维物理模拟. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(3): 435—447.
- 陶维祥, 丁放, 何仕斌, 等, 2006. 国外深水油气勘探述评及中国深水油气勘探前景. *地质科技情报*, 25(6): 59—66.
- 姚伯初, 1998. 南海北部陆缘的地壳结构及构造意义. *海洋地质与第四纪地质*, 18(2): 1—16.
- 姚伯初, 2002. 大陆岩石圈在张裂和分离时的变形特征. 见: 高抒, 李家彪编, *中国边缘海的形成演化*. 北京: 海洋出版社, 1—13.
- 姚伯初, 万玲, 吴能友, 2005. 南海新生代构造演化及岩石圈三维结构特征. *地质通报*, 24(1): 1—8.
- 张健, 汪集暘, 2000. 南海北部陆缘带构造扩张的深部地球动力学特征. *中国科学(D 辑)*, 30(6): 561—567.
- 周蒂, 孙珍, 陈汉宗, 2007. 世界著名深水油气盆地的构造特征及对我国南海北部深水油气勘探的启示. *地球科学进展*, 22(6): 561—571.

附中文参考文献

- 崔涛, 解习农, 任建业, 等, 2008. 莺歌海盆地异常裂后沉降的动力学机制. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(3):