

琼东南盆地岩石圈伸展模拟探讨 ——以测线 1 为例

贺超¹, 吴世敏^{2*}, 龙根元¹

(1 海南省海洋地质调查研究院,海口 570206;2 中山大学地球科学与工程学院,广州 510275)

摘要:在挠曲悬臂梁模型的基础上,利用二维正、反演相结合的方法,对琼东南盆地近垂直于盆地走向、过陆架、陆坡的测线 1 岩石圈不同圈层的伸展因子进行计算。其中,上地壳伸展因子是通过统计地震剖面上断层水平伸展量获得,介于 1.678~2.238 之间;全地壳伸展因子则采用拉伸前后地壳厚度之比的方法,分布在 1.251~2.468 之间;岩石圈伸展因子利用剖面二维反演回剥和正演伸展模拟得到的,分布在 1.062~2.647 之间。沿剖面方向不同圈层的伸展因子综合对比分析表明,琼东南盆地岩石圈发生了随深度变化的伸展,但并非简单的随深度增加,而可能与岩石圈不同层次的流变学特征及伸展前岩石圈流变性的不均匀性有关。

关键词:伸展因子;二维正反演模拟;琼东南盆地

中图分类号:P736.4

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.08004

有别于经典的大西洋边缘海盆地,南海北部大陆边缘盆地的岩石圈拉伸减薄机制是一直受到众多学者的关注。以琼东南盆地为例,由于裂后存在加速沉降^[1],导致反演结果往往偏大,从而不能准确认识岩石圈的伸展机制。鉴于上述问题,本文在挠曲悬臂梁模型的基础上采用二维正反演相结合的方法,对琼东南盆地伸展因子及岩石圈伸展机制进行再研究。

1 区域地质概况

琼东南盆地位于南海北部的海南岛以南、西

沙群岛以北之间的海域(图 1)。盆地北部大陆架区域海水较浅,约 0~200 m,东南部邻区西沙海槽一带海水急剧加深,超过 2 000 m。与珠江口盆地不同,琼东南盆地发育在狭小的空间里,具有窄陆架、窄上陆坡,西北侧的海南岛和东南侧的西沙隆起带这两处刚性突起限制了盆地的发育。

该盆地是发育在南海北部减薄地壳之上的新生代陆缘拉张盆地,在欧亚板块、太平洋板块和印度板块的作用下,处于伸展作用和剪切作用的过渡带,其形成演化明显地受控于南海北部陆缘的区域地球动力学背景:①晚白垩世—古新世太平洋板块与欧亚板块之间相互作用控制的伸展动力学过程(神狐运动,在地震剖面上对应的不整合面为 T_g);②始新世—早渐新世的南海北部大陆边缘的陆壳裂解(南海运动,在地震剖面上对应的不整合面为 T₆);③晚渐新世—中中新世的南海海底扩张;④晚中新世—第四纪海底热沉降期间的构造叠加活动(东沙运动,在地震剖面上对应的不整合面为 T₂)^[1]。

收稿日期:2017-05-16

基金项目:国家自然科学基金(41276048,91328205,41476039)

作者简介:贺超(1986—),女,硕士,工程师,主要从事地质构造研究工作。E-mail:282370296@163.com

* 通讯作者:吴世敏(1965—),男,副教授,主要从事大陆边缘动力学研究工作。E-mail:wushim@mail.sysu.edu.cn

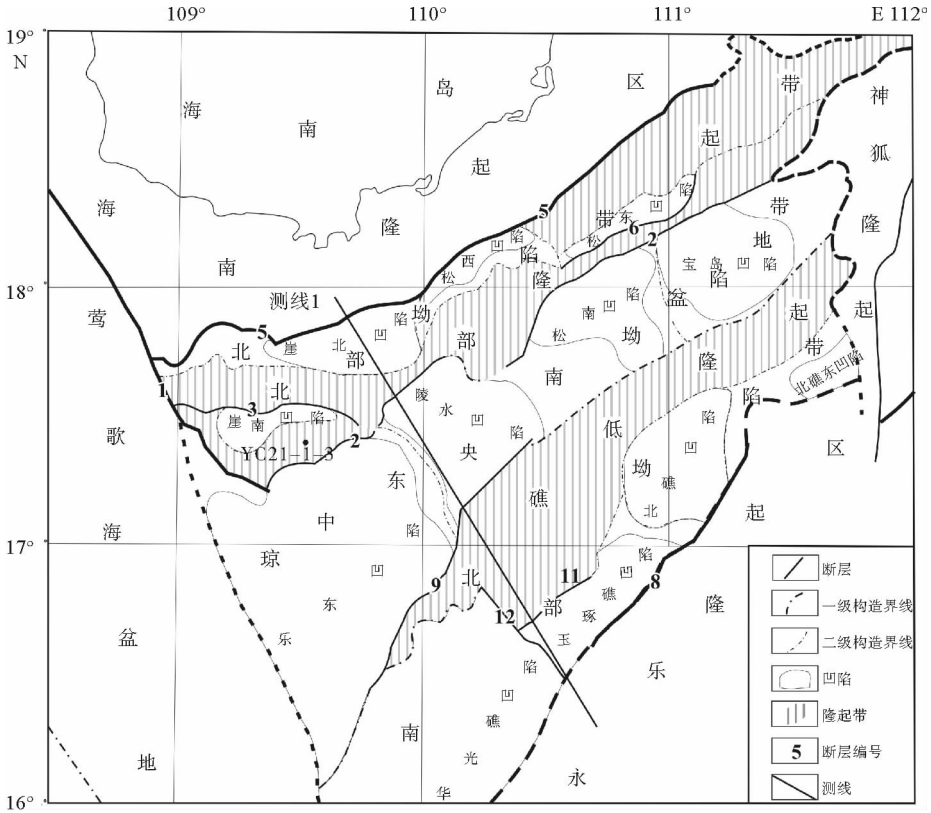


图 1 琼东南盆地构造区划分和主要断裂以及测线 1 分布(据文献[4]修改)

Fig. 1 Sketch map showing tectonic units, main faults and Line 1 in Qiongdongnan basin (Modified from reference [4])

盆地自进入成盆期以来,经历了裂陷、裂后两大构造演化阶段^[2],呈明显的“下断上坳”的双层构造格架。以破裂不整合面 T6 为界,可将盆地分为上下两大构造层:下构造层代表盆地演化早期裂陷作用形成的相互独立的半地堑—地堑充填的产物,表现为断陷、断坳结构,构造变形(以张性为主)强烈;上构造层则为晚期裂后坳陷、热沉降作用(包括 5.5 Ma 以来裂后沉降加速期)形成的坳陷式充填的产物,为坳陷结构,整体向南倾斜,断裂发育较少。没有证据表明琼东南盆地裂陷期发生岩浆底侵作用^[3]。

为了研究琼东南盆地的岩石圈伸展,选取了近垂直于盆地走向、过陆架和陆坡的测线 1。测线 1(测线平面位置分布见图 1、剖面见图 2)位于盆地西部,近垂直于盆地走向,由北向南依次通过崖北凹陷、陵水凹陷、北礁低隆起以及玉琢礁凹陷,长 217.5 km,水深变化在 50~2 000 m。

2 研究方法

本文采用二维正、反演相结合的方法,运用 Flex Decomp^① 软件反演回剥得到盆地的裂后沉降并为正演模拟提供控制模板、Stretch[®] 软件正演模拟盆地的伸展过程,结合重力等资料,计算测线 1 岩石圈不同圈层的伸展因子(①②Flex Decomp 和 Stretch 是由 Badley Earth Sciences (Computing) Limited 提供, <http://www.badleys.co.uk/>)。对上地壳伸展因子 β_{uc} (uc: upper crust, 下同)是运用 Stretch 软件,通过统计地震剖面上识别的断层伸展量求取;对全地壳伸展因子 β_{wc} (wc: whole crust, 下同)则是从地壳减薄的角度,利用深部地震和重力资料反演所得到的地壳减薄量求取;岩石圈伸展因子 β_1 (lithosphere, 下同)以 Flex Decomp 软件回剥至破裂不整合面的盆地剖面形态为模板,运用 Stretch 软件正演

盆地的张裂过程,使其剖面形态接近实测裂陷期构造剖面形态,即可得到沿剖面的岩石圈伸展因子 β 。本文简化为一期瞬时拉伸,未考虑多幕式拉伸。

Flex Decomp、Stretch 软件是基于 Kuszniir and Ziegler^[5]提出的挠曲悬臂梁模型所设计的。该模型建立在挠曲均衡的前提下,假设岩石圈为有限长度的弹性板块,其强度可以用有效弹性厚度(Te)表示,在瞬时拉张的过程中,上地壳发生脆性剪切作用,发育板状或犁式断层,断层的上下盘发生滑动,使上地壳减薄;同时下地壳和岩石圈地幔以塑性流变的方式响应上地壳的脆性变形,伸展量与上地壳相同。在脆韧层的共同作用下,岩石圈负载发生变化,并重新进行挠曲均衡调整,使地表沉降形成盆地。Flex Decomp、Stretch 软件成功应用于多个伸展盆地的研究,如北海盆

地^[6]等。

挠曲悬臂梁模型模型描述了上地壳板状断裂的伸展以及下地壳和岩石圈地幔的塑性蠕变,可以定量计算岩石圈的伸展量、伸展因子 β 的大小等。但该模型未考虑上地幔强度,故不适合克拉通这类较“冷”岩石圈,多运用于南海这类“热”岩石圈的地区^[7]。Flex Decomp、Stretch 软件的设计都是基于岩石圈均匀伸展的假设,也可运用于岩石圈伸展随深度变化的情况^[8]。

3 数据来源

按中海油提供的琼东南盆地时—深转换表拟合的公式(1),将测线的双程走时数据(图 2a)转换成深度域数据(图 2b)。图 2b 中,由于显示需要,对纵向比例尺进行了放大。

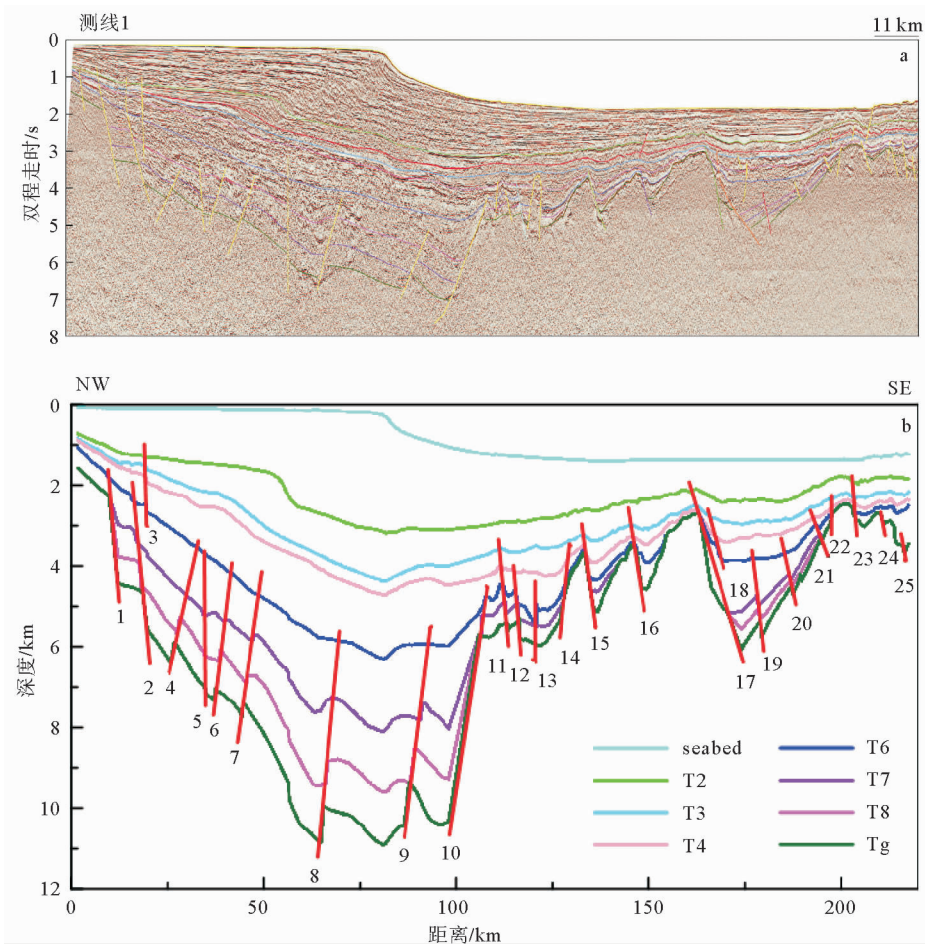


图 2 测线 1 地震剖面(a)及时—深转换后地层深度剖面(b,红色表断层)

Fig. 2 Seismic profile (a) and sequences depth after time-depth converted (b) of Line 1

$$Z = \begin{cases} 125.0t^2 + 1\,017.5t + 0.5 & (t \leq 1.8 \text{ s}) \\ 201.0t^2 + 630.8t + 450.1 & (1.8 \text{ s} < t < 3.0 \text{ s}) \\ 81.0t^2 + 1\,258.0t - 351.0 & (t > 3.0 \text{ s}) \end{cases} \quad (1)$$

4 正反演模拟

4.1 二维反演回剥

利用 Flex Decomp 软件进行盆地二维回剥反演参数设定为: 各层岩性参数参考钻井 YC21-1-3(平面位置分布见图 1、表 1); 破裂不整合面设

为 T6(23 Ma); 海平面及水深数据参考 Haq 等^[9]全球海平面变化曲线; Te 的选取对盆地形态影响较大。研究表明, 对于年轻的被动大陆边缘, 比如南海大陆边缘, Te 不大, 多介于 1~5 km 之间^[10-13], Clift 等^[7]认为 Te 在 1~3 km 之间才能有效的模拟盆地半地堑的形态。经过反复调试并参考前人资料, 本文 Te 取 3 km 最为合适。

将上述参数导入, 运行 Flex Decomp 软件, 得到测线 1 现今盆地剖面形态(图 3a), 然后依次逐层回剥, 得到破裂不整合时期 T6(23 Ma)时的盆地剖面形态(图 3b), 为下一步正演模拟提供控制模板。

表 1 YC21-1-3 泥岩、砂岩百分比含量及各层沉积物颗粒密度 PSG、孔隙度 F、压实系数 C
Table 1 Stratigraphic frame and lithologic parameters based on Well YC21-1-3

地震反射层	年龄 /Ma	泥岩含量 /%	砂岩含量 /%	岩石颗粒密度/(kg/m ³)	孔隙度	压实系数 / (m ⁻¹)
第四系	T2	1.9	95.6	2 720	0.623 8	0.000 50
莺歌海组	T3	5.5	99.9	2 720	0.629 9	0.000 51
黄流组	T4	10.5	34.6	2 670	0.538 4	0.000 35
梅山组	T6	23	18.3	2 660	0.515 6	0.000 31
三亚组	T7	30	67.1	2 700	0.583 9	0.000 43
陵水组	T8	36	69	2 700	0.586 6	0.000 44
崖城组	Tg	50(?)	39.7	2 680	0.545 6	0.000 37

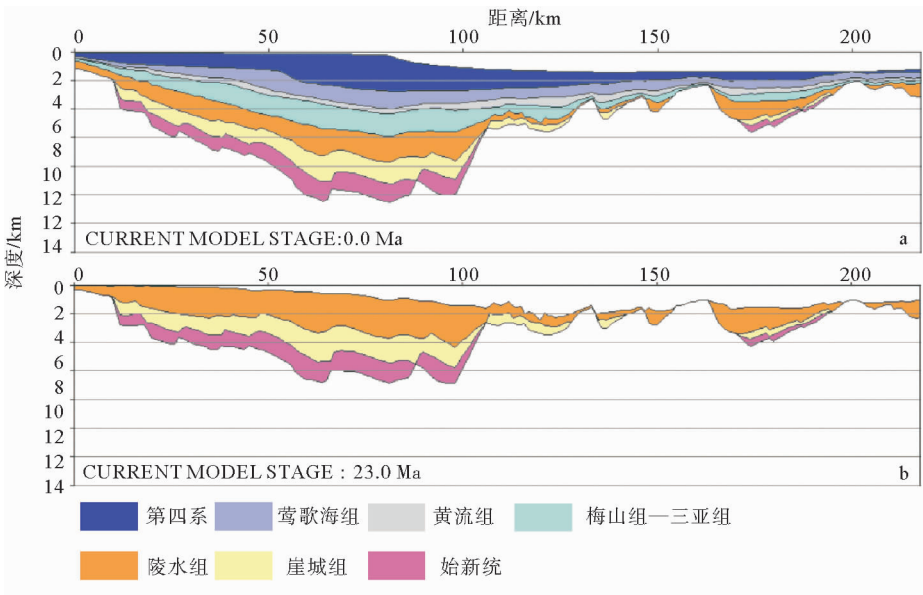


图 3 测线 1 现今地层剖面(a)及回剥至 23 Ma 的地层剖面(b)

Fig. 3 Present profile (a) and backstripped to 23 Ma (b) of Line 1

4.2 二维正演模拟

正演参数设置具体如下:初始地壳厚度设为 32 km;上地壳脆性厚度 15 km;岩石圈有效弹性厚度 T_e 取 3 km;裂后开始时间设为 T6(23 Ma);海平面及水深数据参考 Haq 等^[9]全球海平面变化曲线。

4.2.1 上地壳伸展因子 β_{uc}

在深度剖面(图 2b)上统计裂陷期活动的且断达基底并控制地层沉积的断层的几何参数(表 2),应用 Stretch 软件正演模拟。断层 3、18 为裂后期活动的断层,并未切过基底(Tg);断层 24、25 未切过破裂不整合面,故未统计上述断层的几何参数。需要强调的是,本文对断层倾角的测量是在横、纵坐标比例一致的前提下测量得到的;同

表 2 测线 1 断裂参数设置

Table 2 Fault parameters setting of Line 1

断层 编号	X 坐标 /km	伸展量 /km	倾角 / (°)	倾向
1	9.708	3.263	43	右
2	16.155	2.049	37	右
4	28.252	2.002	28	左
5	39.970	1.214	40	左
6	47.402	1.290	34	左
7	56.276	1.159	80	右
8	67.880	1.593	60	左
9	91.278	2.428	32	左
10	106.712	5.118	31	左
11	111.490	1.290	54	右
12	115.283	1.214	48	右
13	120.857	1.366	73	右
14	129.465	3.263	22	左
15	133.257	3.490	36	右
16	146.378	2.124	36	右
17	163.216	2.945	31	右
19	170.421	3.552	15	右
20	178.119	1.214	43	右
21	186.462	1.062	35	右
22	197.725	1.138	50	左
23	202.503	1.935	18	右

时,由于断层垂直断距比水平断距更可靠^[10],本文对于断层水平断距的测量是通过断层两侧的地层厚度和断层倾角,利用三角形边角关系求得。

由于地震剖面的分辨率有限,没考虑未识别的小断层,导致由该方法计算得出的上地壳伸展因子 β_{uc} 偏小 35%~40%^[11],需要加以修正。本文取 35%,即上地壳拉伸因子 β_{uc} 分布在 1.678~2.238 之间,如图 4c 深绿线所示。

4.2.2 全地壳伸展因子 β_{wc}

假定初始地壳厚度为 32 km^[12],拉伸后地壳厚度可以通过重力反演得到的 Moho 面深度^[13]减去盆地新生代沉积层深度(Tg 的深度)得到。将初始地壳厚度比拉伸后地壳厚度就可以求得全地壳伸展因子 β_{wc} 。

本文结果如图 4c 蓝线所示,全地壳伸展因子 β_{wc} 是介于 1.251~2.468 之间。在陵水凹陷处,即盆地中央坳陷带,全地壳伸展因子 β_{wc} 取得最大值,于玉琢礁凹陷取得第 2 大值。

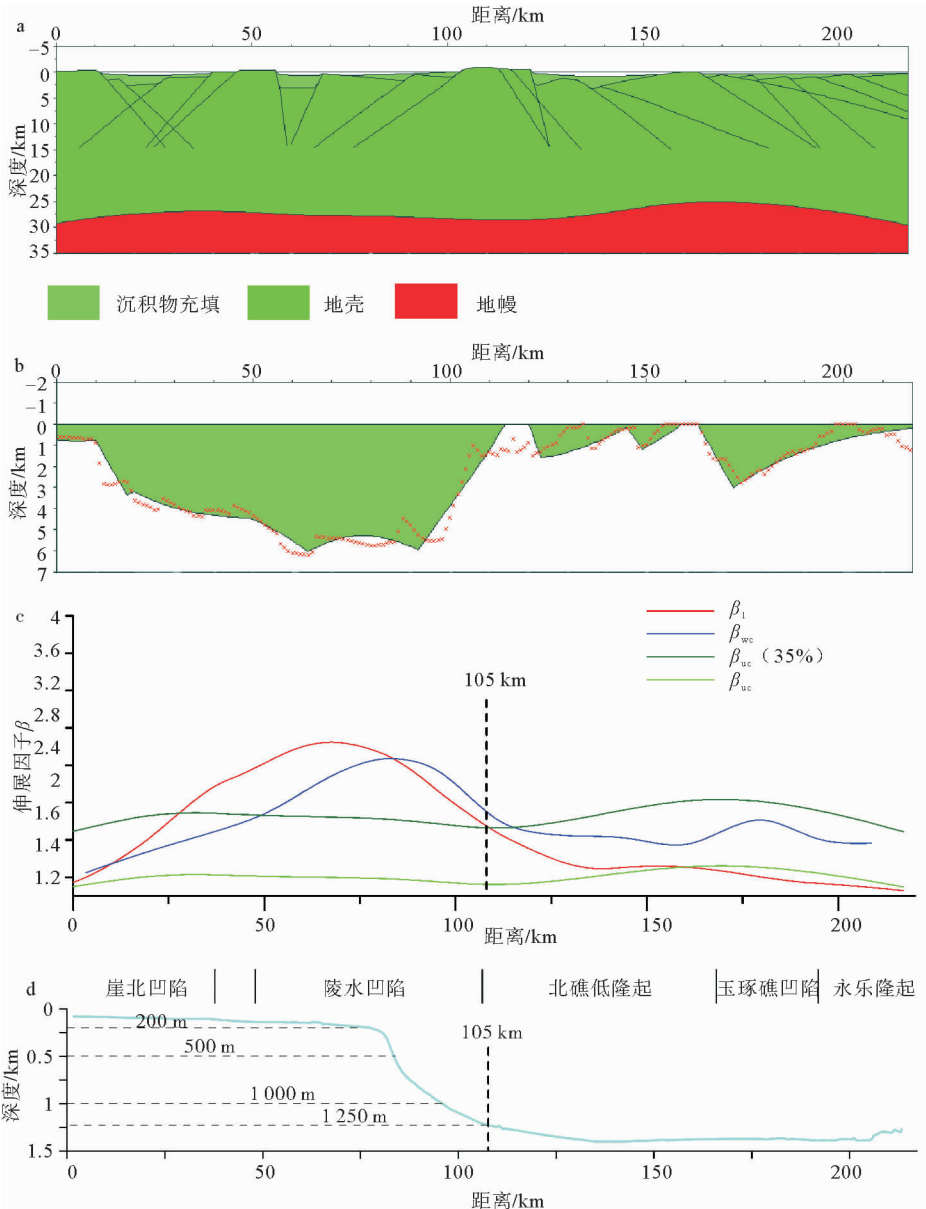
4.2.3 岩石圈伸展因子 β_l

参考赵中贤^[14]、周蒂^[8]的方法,对岩石圈伸展因子 β_l 的计算是将经 Flex Decomp 软件回剥至破裂不整合面(23 Ma)盆地剖面形态作为模板(图 3b),经校正后的地层数据(见图 4b 红色线)导入 Stretch 软件,从盆地初始模型开始,通过调节断裂参数,使盆地形态接近反演模板。

为了更好的获得裂陷期盆地形态和拟合效果,设置 7 条初始断层(断层 1、2、6、12、13、16、17),并经拉平、充填沉积物至海平面,如图 4b 所示,在主要凹陷,包括陵水凹陷、玉琢礁凹陷和崖北凹陷处,正演形态与反演模板拟合较好,对应岩石圈伸展因子 β_l 分布于 1.062~2.647 之间,于陵水凹陷处,即盆地中央坳陷带,取得最大值(图 4c 红色实线)。

5 讨论

从陆架到陆坡,上地壳伸展因子 β_{uc} 相对变化较小;全地壳伸展因子 β_{wc} 变化显著,于陵水凹陷(约 80 km 处)达到最大值后,开始减小,并于玉琢礁凹陷达到第 2 个峰值。全地壳的伸展包括上下地壳两部分的减薄。上地壳伸展因子 β_{uc} 变化不大,表明全地壳伸展因子 β_{wc} 的变化主要由下地



(a) 盆地地壳结构图, 基于上地壳断层的正演模型, 沉积物充填 100%, 剥蚀量 80%;
 (b) 盆地形态图, 仅保留部分断层, 经拉平后沉积物充填至海平面, 红色线为盆地反演到 23 Ma 经校正后的模板;
 (c) 测线 1 上地壳、全地壳、岩石圈的伸展因子 β 分布图; (d) 测线 1 水深分布图。

图 4 测线 1 正演模拟图

Fig. 4 Forward modeling of Line 1

壳的减薄引起的。上地壳伸展因子 β_{uc} 与全地壳伸展因子 β_{wc} 在剖面约 50~110 km 处, $\beta_{wc} > \beta_{uc}$, 而剖面两侧 $\beta_{wc} < \beta_{uc}$, 表明下地壳不仅没有减薄, 反而增厚了, 说明上地壳以脆性断层伸展变形, 下地壳则是以塑性流动变形、由陵水凹陷向两侧流动, 推测盆地两侧因海南岛、西沙地块的阻挡, 导致下地壳增厚; 岩石圈伸展因子 β_l 总体变化趋势

与全地壳伸展因子 β_{wc} 相似, 亦于陵水凹陷中部 (约 70 km 处) 达到最大值后, 逐渐变小, 直到陵水凹陷与北礁低隆起分界处 (约 105 km) 处发生反转, 小于全地壳伸展因子 β_{wc} 、上地壳伸展因子 β_{uc} 值。地震剖面 (图 2a) 所显示的测线北段裂陷期地层, 而南段地层则呈两个阶梯状的上升。推测西沙隆起带这一刚性的块体的存在, 导致测线

南段伸展量降低,从而发生反转。

另一方面,全地壳伸展因子 β_{wc} 、岩石圈伸展因子 β_l 均在陵水凹陷处取得最大值。陵水凹陷属于盆地中央坳陷带,为琼东南盆地浅水区向深水区过度带,裂陷期沉积地层厚度最厚。裂后期随着沉积物由北向南的推进,使陆架坡折的现今位置迁移到陵水凹陷中部,使陵水凹陷成为海底地形由陆架向陆坡转折的过渡地带。

整体上,盆地是随深度变化的伸展模式,但并不是简单地随深度增加,而与不同层次的流变学特征有关系,比如上地壳的脆性、下地壳塑性属性、岩石圈地幔的强度大。同时,伸展因子的大小与伸展前岩石圈流变性的不均匀性也有关系。

计算方法上,比起地壳、岩石圈伸展因子,用统计断层水平伸展量得到上地壳伸展因子 β_{uc} 曲线平缓、变化趋势不协调,不能真实的反映上地壳的伸展。推断是由于上地壳伸展因子在不同的部位,其少估的量是不一样的,修正时应乘以不同的系数。初步认为断层密集、断距大的地方,少估的量可能更大;反之,对于断层发育少的位置,少估的量往往相对小。但是具体到如何判断各个部位少估量,有待进一步的研究。

6 结论

通过以上讨论我们得到以下认识:

(1) 测线 1: 上地壳伸展因子 β_{uc} 是运用 Stretch 软件统计地震剖面上断层水平伸展量获得,介于 1.678~2.238 之间;全地壳伸展因子 β_{wc} 仍用拉伸前后地壳厚度之比的方法,分布在 1.251~2.468 之间;岩石圈伸展因子 β_l 是借助 Flex Decomp 和 Stretch 软件,对盆地进行二维反演回剥和正演伸展模拟得到的,分布在 1.062~2.647 之间。

(2) 整体上,盆地是随深度变化的伸展模式,但并不是简单的随深度增加,而与不同层次的流变学特征有关系。同时,伸展因子的大小与伸展前岩石圈流变性的不均匀性也有关系。

(3) 用统计断层水平伸展量得到上地壳伸展因子 β_{uc} 往往由于在不同的部位,其少估的量是不一样的,导致不能真实的反映上地壳的伸展。修

正时不同的位置应乘以不同的系数。

参考文献:

- [1] 李绪宣. 琼东南盆地构造动力学演化及油气成藏研究[D]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所,2004.
- [2] 解习农,葛立刚. 琼东南盆地断陷期层序地层模式[J]. 地质科学,1997,32(1):47-54.
- [3] Clift P, Sun Z. 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]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(B6):232-241.
- [4] 龙根元,吴世敏,刘兵,等. 琼东南盆地半地堑特征及其动力学探讨[J]. 大地构造与成矿学,2010,34(1):48-54.
- [5] Kuszniir 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] Kuszniir 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[J]. Geological Society Special Publication, 1991(56): 41-60.
- [7] Clift P, Lin J, Party O L S. Patterns of extension and magmatism along the continent-ocean boundary, South China margin[J]. Geological Society, London, Special Publication, 2001, 187: 489-510.
- [8] 周蒂,廖杰,赵中贤. 张性盆地裂后异常沉降的正反演数值模拟方法[J]. 地球科学,2011,36(2):227-235.
- [9] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuation sea-level since the Triassic (250 million years to present) [J]. Science,1987(25):1156-1167.
- [10] Davis M, Kuszniir N. Depth-dependent lithospheric stretching at rifted continental margins[C]//Proceedings of national science foundation rifted margins theoretical institute. New York: Columbia University Press, 2004:92-137.
- [11] Walsh J, Watterson J, Yielding G. The importance of small-scale faulting in regional extension [J]. Nature, 1991,351:391-393.
- [12] 张中杰,刘一峰,张素芳,等. 琼东南盆地地壳伸展深度依赖性及其动力学意义[J]. 地球物理学报,2010,53(1): 57-66.
- [13] 刘兵. 琼东南盆地前新生代沉积基底的重磁反演[D]. 广州:中国科学院南海海洋研究所,2010.
- [14] 赵中贤,周蒂,廖杰,等. 珠江口盆地陆架区岩石圈伸展模拟及裂后沉降分析[J]. 地质学报,2010,84(8): 1135-1145.

LITHOSPHERIC STRETCHING MODELING OF QIONGDONGNAN BASIN: BASED ON LINE 1

HE Chao¹, WU Shimin^{2*}, LONG Genyuan¹

(1 Marine Geological Institute of Hainan Province, Haikou 570206, China;

2 School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In order to better understand the lithospheric extension process of the Qiongdongnan Basin, lithospheric stretching factors were calculated along the Line 1 which across both the continental shelf and slope. Upper-crust stretching factors were calculated by summing heaves measured on seismically imaged faults, varying from 1.678~2.238. Whole crust stretching factors changed from 1.251~2.468, derived from crustal-thinning constrained by seismic reflection and gravity inversion. Lithosphere stretching factors were determined from the combination of the two-dimensional flexural-cantilever forward and reverse modeling, ranging from 1.062~2.647. The results indicate that the depth dependent model is likely optional in the Qiongdongnan Basin. But the stretch factors are not simply increasing with depth, but also related to rheological features and the anisotropy of lithosphere before stretching.

Key words: stretching factor β ; 2D forward and reverse modeling; Qiongdongnan Basin