

莺歌海盆地异常裂后沉降的动力学机制

崔 涛^{1,2,3}, 解习农¹, 任建业¹, 张 成¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. Department of Earth Sciences, University of Windsor, Windsor, Ontario, N9B 3P4 Canada

3. 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

摘要: 为了理解莺歌海盆地形成与演化的动力过程, 用回剥法和应变速率反演方法对该区的钻井和地层剖面资料进行了研究. 研究表明莺歌海盆地观测得到的裂后沉降和模拟预测的理论裂后沉降结果存在较大差异, 其中在西北部为 300~500 m, 中部和东南部为 900~1 200 m, 其异常裂后沉降明显呈现向东南和向海方向递大的趋势. 地幔对流模型预测的结果表明, 20 Ma 以来南海北部边缘的动力地貌沉降量为 300 m, 因此, 莺歌海盆地裂后异常沉降在 300 m 左右的地区可以用动力地貌沉降机理来解释, 但是盆地中部和东南部的巨厚的异常沉降远大于动力地貌沉降量, 它是自晚中新世以来盆缘断层的右旋走滑作用、裂后热回沉和动力地貌沉降共同作用的结果.

关键词: 莺歌海盆地; 构造沉降; 动力地貌; 异常沉降; 应变速率反演.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2008)03-0349-08

收稿日期: 2008-01-24

Dynamic Mechanism of Anomalous Post-Rift Subsidence in the Yinggehai Basin

CUI Tao^{1,2,3}, XIE Xi-nong¹, REN Jian-ye¹, ZHANG Cheng¹

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

2. Department of Earth Sciences, University of Windsor, Windsor, Ontario, N9B 3P4 Canada

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

Abstract: In order to understand the dynamic mechanism of formation and evolution of the Yinggehai basin, the backstripping and strain rate inversion methods are used to study the stratigraphic sections and boreholes by analyzing the relevant data. The results show a discrepancy between observed post-rift subsidence and theoretically predicted post-rift subsidence based on a multiple rift model. Our modeling results of two seismic sections show clearly that the anomalous subsidence during the post-rift stage in the northwestern part of the basin, between 300 m and 500 m, is much less than that in the middle and southeastern parts, which ranges from 900 to 1 200 m. We compare these results with those of time-dependent dynamic topography subsidence based on the global mantle flow model. The computed dynamic topography decreases by about 300 m from 20 Ma ago to the present in the northern South China Sea area. Observed anomalous subsidence within a range of less than 300 m during the post-rift stage can be interpreted as the effect of dynamic topography. However, the huge anomalous subsidence in the middle and southeastern areas may originate from a combination of the dextral strike-slip movements of marginal faults since the Late Miocene, rapid thermal subsidence after rifting and the response of dynamic topography.

Key words: Yinggehai basin; tectonic subsidence; dynamic topography; anomalous subsidence; strain rate inversion.

莺歌海盆地是南海西北部新生代含油气盆地, 是揭示南海西北部大陆边缘演化历史、地球动力学发育在红河断裂带向东南延伸方向上, 沉积厚度达 17 km(孙珍等, 2007). 莺歌海盆地形成演化的研究 是解决盆地演化机理的关键性过程之一, 而盆地的异常沉降的动力学机制 是解决盆地演化机理的关键性过程之一.

虽然关于南海北部大陆边缘盆地形成机制的研究已经取得了很多的成果(Ru and Pigott, 1986; 龚再升等, 1997; 李思田等, 1998; Clift and Lin, 2002; 方念乔等, 2007), 但是异常裂后沉降的原因并不十分清楚. 前人已经用不同的伸展模型对南海北部大陆边缘盆地的沉降和岩石圈拉伸减薄进行了解释(Su *et al.*, 1989; Hayes *et al.*, 1995; Clift and Lin, 2001; Clift *et al.*, 2001), 但是岩石圈的伸展机制和广泛发育的裂后异常沉降仍然是南海地区的争论焦点. 动力地貌可以用来解释中国东部沿海海域盆地的沉降和抬升(Lithgow-Bertelloni and Gurnis, 1997), 但是动力地貌沉降量仍存在争议(Wheeler and White, 2000, 2002; Xie *et al.*,

2006). 南海北部大陆边缘盆地是研究这些盆地形成动力学机制的最佳场所. 本文以南海北部边缘的莺歌海盆地为例, 首先利用回剥法和应变速率反演求出构造沉降量和地壳应变速率, 然后通过观测得到的裂后沉降和模拟预测的理论裂后沉降比较计算出异常构造沉降量, 查明裂后异常沉降的空间变化规律, 进而试图揭示莺歌海盆地的裂后沉降机制.

1 区域地质背景

莺歌海盆地是南海北部陆架上发育的新生代盆地, 总体呈 NW 向展布的不规则菱形(图 1). 莺歌海

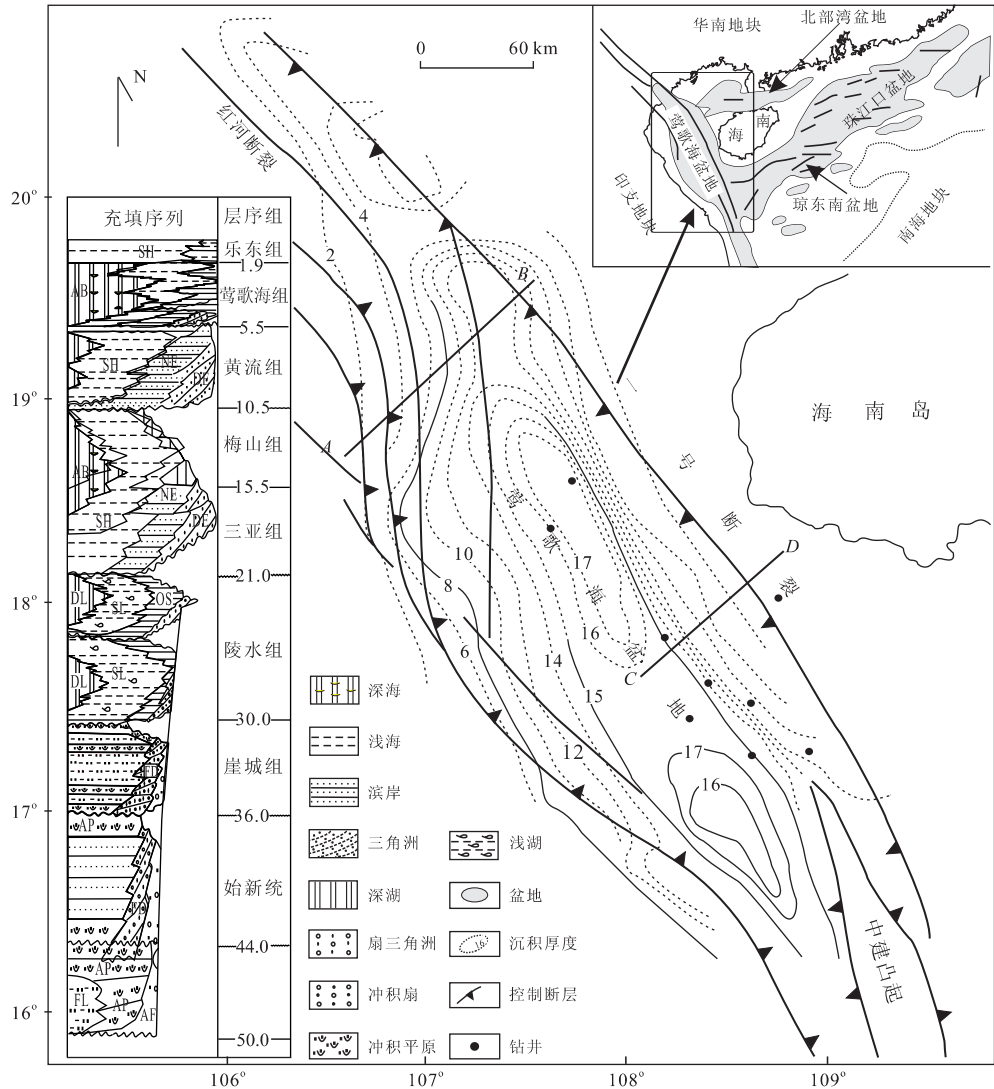


图 1 莺歌海盆地构造及垂向序列图和图示研究所用剖面 and 钻井位置

Fig. 1 Structure and vertical sequence of the Yinggehai basin showing the position of selected cross sections and exploration wells used in this study

盆地是由于古新世和渐新世的岩石圈伸展作用形成的,随后经历了热沉降阶段(Ru and Pigott, 1986; 龚再升等, 1997; Lin *et al.*, 1997; Clift and Lin, 2001),整体表现出NW向的构造体系,属于走滑—伸展型盆地(李思田等, 1998)。其裂后沉积物厚度比同裂陷沉积物厚度要大得多,经历了起始于中新世中期(10.5 Ma)的快速裂后沉降。

莺歌海盆地西北部通过红河断裂与印藏碰撞带相连,东北部的边缘断层(1号断层)与红河断裂带相连通(龚再升等, 1997),向东与北东向的伸展裂陷带(北部湾盆地和琼东南盆地)相邻。郭令智等(2001)用左旋拉分模型来解释莺歌海盆地的形成与演化。龚再升等(1997)及李思田等(1998)指出莺歌海盆地是由岩石圈拉伸和沿着主边缘断层的走向滑动共同控制的转换伸展拉分盆地。Allen *et al.* (1984)和Leloup *et al.* (1995)认为红河断裂带先经历了35到20 Ma的左旋滑动,然后从5 Ma开始转变为右旋运动。Sun *et al.* (2003)通过实验证明了莺歌海盆地的1号断层经历了始于5 Ma的右旋走滑作用。Ren *et al.* (2001)认为,莺歌海盆地构造演化可以划分出3个具有典型特征的发育阶段,依次为左旋走滑—伸展裂陷阶段、中下地壳韧性伸展—热沉降阶段和晚期加速沉降阶段。

莺歌海盆地的沉积环境经历了从陆相湖盆逐渐过渡为海相环境的演变过程。从古新世到现在,经历了2次沉积环境变迁,即从冲积的陆相湖盆环境演变为滨浅海环境,然后再演变为陆架—陆坡环境。这与盆地演化经历了3个构造演化阶段相一致(图1)。渐新世末期发生了第一次相变,由古新世—渐新世裂陷期的冲积相和湖相演变为早—中中新世裂后期的滨浅海沉积。第二次相变大约发生在10.5 Ma。从晚中新世开始,在海南岛的外滨区域陆坡沉积开始发育(Rangin *et al.*, 1995)。上新世的进积陆坡楔状体沿着1号断层发育。邻近1号断层的盆地中南部,发育明显向海快速进积的陆坡楔状体。沉积物供给十分充足,导致了由1号断层走滑拉分作用所形成的相对较深水海湾迅速被沉积物充填,使得现今陆坡迁移到莺歌海盆地最南端。

2 研究方法和数据

沉降分析的数据来自钻井和地震剖面。为了查明盆地构造沉降的历史,笔者选择了2条穿过盆地

中央的地震剖面(图1中AB、CD)。在下面的沉降分析中,所使用的地层边界的年龄是参照南海西部石油公司资料确定的(吕明等, 1995)。

构造沉降是指由深部构造作用引起的基底沉降,其沉降量和沉降速率可根据Sclater and Christie(1980)提出的回剥方法计算得到。具体计算可按式(1)进行:

$$\text{构造沉降} = \text{总沉降} - (\text{沉积物和水负荷沉降} + \text{沉积物压实沉降} + \text{海平面变化}) \quad (1)$$

计算过程中,对压实作用、沉积物负载和古水深影响做了校正。输入参数包括岩性、年龄和古水深等。这些参数的值都是根据地震剖面的解释和钻井资料来确定的,其中古水深是利用沉积环境来确定的。笔者利用Baldwin(1999)的孔隙—深度函数来计算不同岩性去压实后的现今孔隙度。用应变速率反演方法(White, 1993, 1994)来模拟了岩石圈构造沉降随时间的变化,该方法可以提供整个盆地的应变速率和构造沉降的时空变化,弥补了传统盆地伸展定量模型中应变速率在整个拉伸期不变的缺陷。根据理论模型,只要通过钻井资料获得同裂陷沉降量,便能够根据同裂陷沉降量和裂后时间所显示的关系计算出利用多幕裂陷理论模型所预测的裂后沉降量。多幕裂陷的幕次、开始以及结束时间根据实际沉降史曲线和区域构造分析资料确定。显然同裂陷沉降取决于岩石圈减薄,而裂后沉降则由热冷却作用所控制。模拟过程中尽量使理论模型中裂陷期沉降曲线与实际沉降曲线吻合,如果实际观测得到的裂后沉降和模拟预测的理论裂后沉降结果不一致的话,那么这就说明盆地裂后异常沉降除岩石圈减薄和热冷却的因素外,还受到其他因素的控制。

异常裂后沉降指的是理论裂后沉降和实际观测的裂后沉降的差值。理论裂后沉降由观测到的同裂陷沉降计算而来。笔者从相应的回剥数据中提取裂陷周期、裂陷强度等信息,然后根据多裂陷幕模型得到最优的构造沉降曲线。利用上述模型结合应变速率反演方法求得热沉降量,然后用回剥法所获得的总裂后沉降量减去用理论模型所预测的热沉降量便得到异常沉降量。

3 沉降演化模拟

为了研究莺歌海盆地同裂陷期和裂后期的沉降史变化,选择了两条分别穿过盆地西北部和中部的

经过详细解释的地震剖面 A-B 和 C-D(图 2 和图 3) 来进行研究. 地震资料反映出裂后期沉积物厚度向东南方向逐渐增加. 回剥结果表明同裂陷构造沉降量最大值达到 3 500 m(图 2 和图 3). 应变速率模拟

表明与大规模的构造沉降相对应的是较高的应变速率, 达到 140 Ga^{-1} (图 2 和图 3), 说明地壳拉伸活动剧烈. 模拟所得西北部的裂后沉降(图 2)要比东南部的明显偏小(图 3). 后者的裂后沉降最大值达

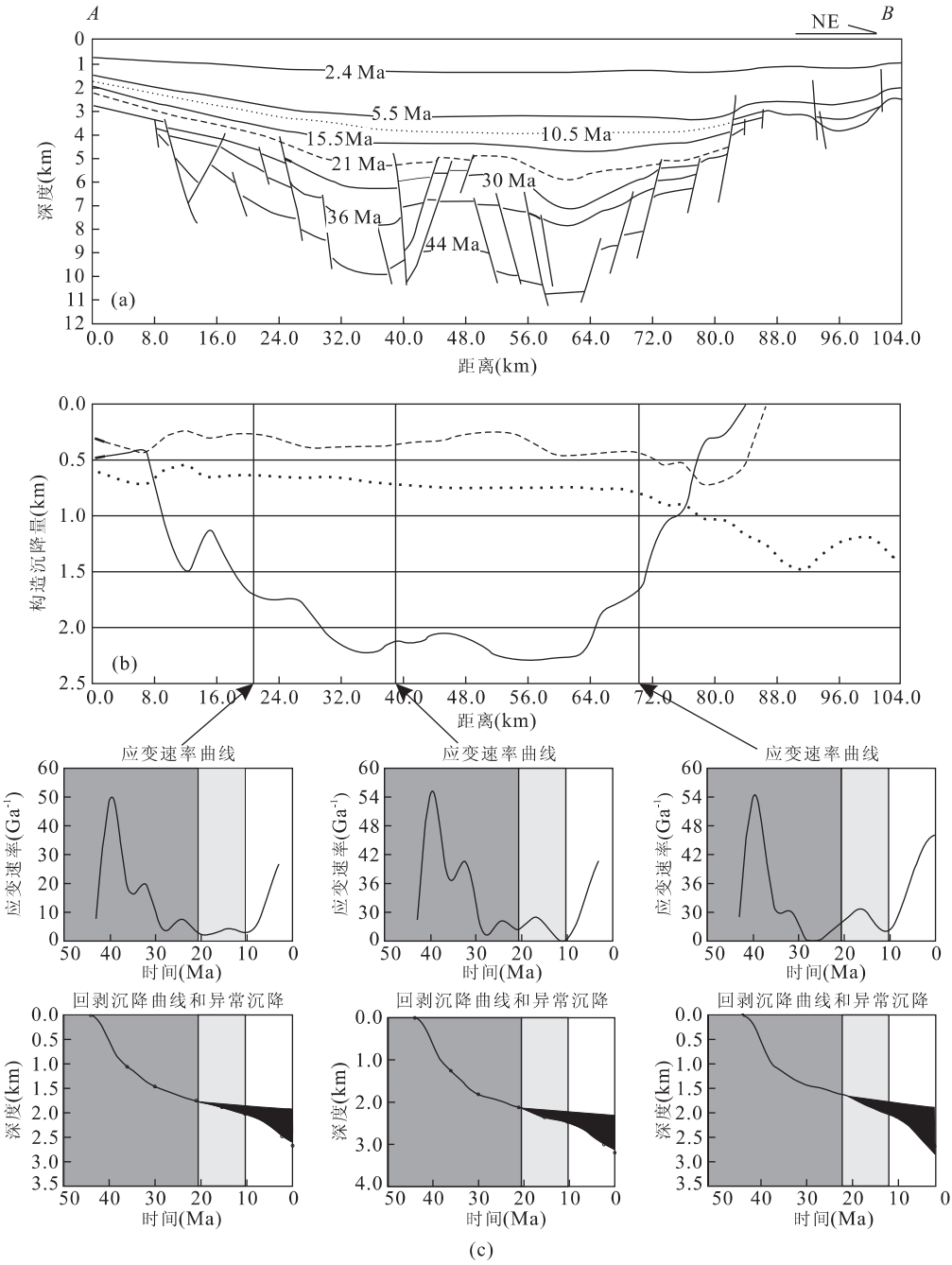


图 2 莺歌海盆地西北部二维 A-B 剖面构造沉降模拟(位置参见图 1)

Fig. 2 Two dimensional A-B section used for calculating tectonic subsidence in the northwestern Yinggehai basin and the related modeling results

a. 地层剖面; b. 构造沉降量, 实线表示裂陷期沉降, 短横虚线代表 21~10.5 Ma 的裂后沉降量, 点虚线代表 10.5 Ma 以来的区域沉降量; c. 3 个模拟点的应变速率曲线及异常裂后沉降量, 图框中深灰色阴影带表示裂陷期, 浅灰色阴影带表示裂后沉降期, 白色带表示区域沉降期, 黑色三角带为异常裂后沉降量

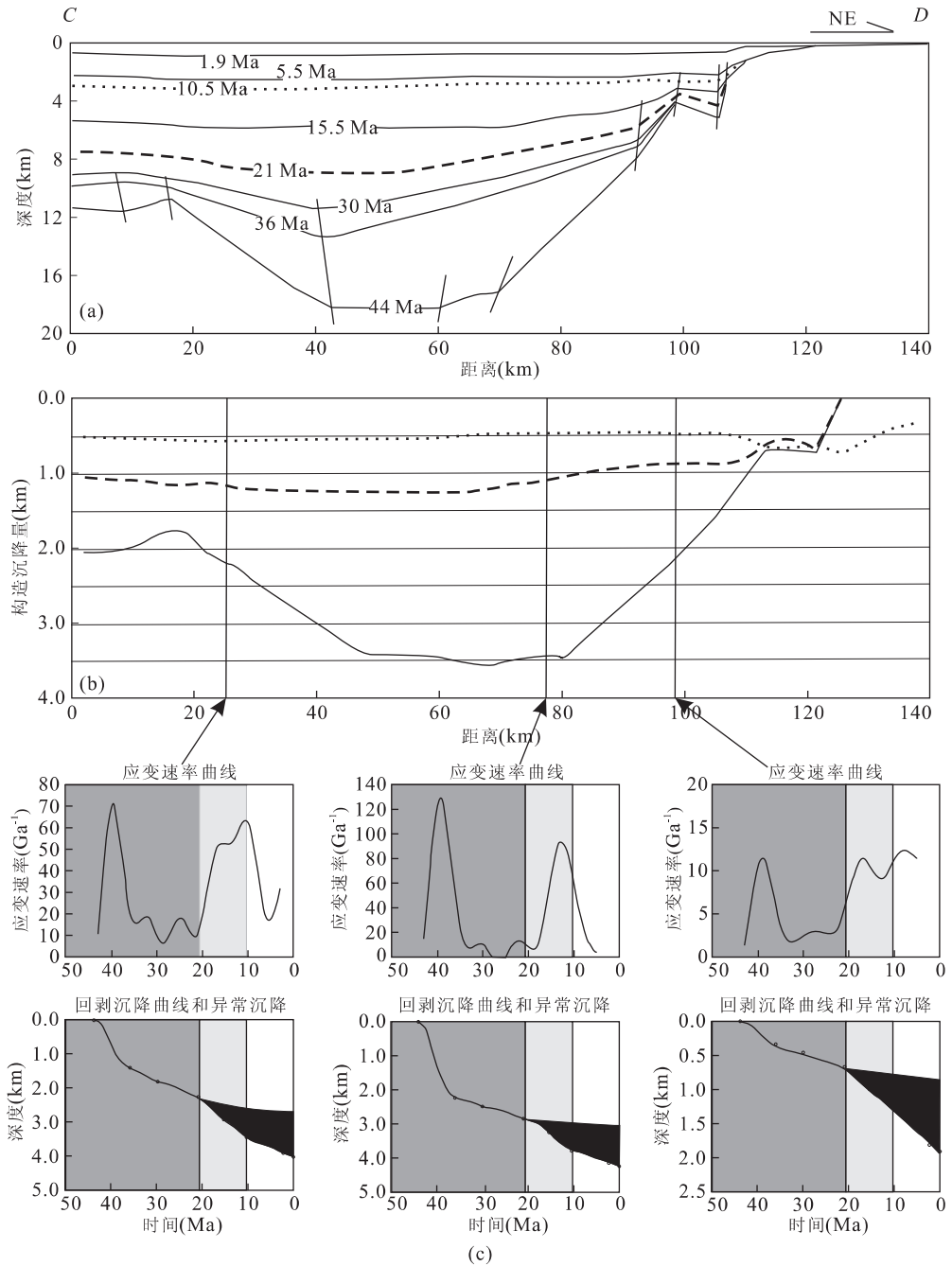


图 3 莺歌海盆地中部二维 C-D 剖面构造沉降模拟(位置参见图 1)

Fig. 3 Two dimensional C-D section used for calculating tectonic subsidence in the central Yinggehai basin and the related modeling results

a. 地层剖面; b. 构造沉降量, 实线表示裂陷期沉降, 短横虚线代表 21~10.5 Ma 的裂后沉降量, 点虚线代表 10.5 Ma 以来的区域沉降量; c. 3 个模拟点的应变速率曲线及异常裂后沉降量, 图框中深灰色阴影带表示裂陷期, 浅灰色阴影带表示裂后沉降期, 白色带表示区域沉降期, 黑色三角带为异常裂后沉降量

1 500 m 左右, 减去正常的热沉降所得的异常构造沉降, 西北部为 300~500 m, 而中部为 900~1 200 m. 异常沉降的空间分布差异和盆地坳陷中心在裂后期从西北往东南方向的迁移相一致. 此外, 从时间序列来看, 自 5.5 Ma 以来异常裂后沉降急剧增大(图 2c 和图 3c).

4 异常沉降的动力机制讨论

从图 2、3 可以看出,莺歌海盆地实际的裂后沉降要比理论模型计算的裂后热衰减导致的沉降大得多.这一现象说明裂后晚期的异常沉降与盆地早期的地壳伸展没有成因联系,显然,必须采用其他成因机制来解释.

4.1 动力地貌变化

动力地貌是指由于地幔对流而使地壳产生的垂向升降变化(Richards and Hager,1984).地幔对流作用既可以导致地壳表面的抬升,也可以导致地壳表面的下沉.如果由于地幔对流作用而产生的地壳沉降,称为动力沉降.在板块碰撞过程中,俯冲板块较冷的板片在俯冲过程中,会引起地幔温度场的扰动,从而产生区域的地幔对流,进而产生动力地貌的升降变化(Rangin *et al.*, 1995; Burgess *et al.*, 1997; Lithgow-Bertelloni and Gurnis, 1997).地球物理资料证实中国大型盆地深部显示了不同地幔活动样式(宋晓东等,2004).莺歌海盆地处于欧亚板块、印度—澳大利亚板块和太平洋板块的交汇地带,因此,南海及周缘板片俯冲导致南海北部大陆边缘莺歌海盆地发生了复杂的动力地貌变化.

Wheeler and White(2002)认为南海北部边缘盆地动力地貌沉降量约为 300 m,其范围为 0~500 m.为了更好地理解动力地貌对南海北部大陆边缘的影响,Xie *et al.* (2006)利用 Hager and O'Connell(1981)提出的谱系分析方法结合新的地幔对流模型(Steinberger *et al.*, 2004),计算了南海

北部大陆边缘自 40 Ma 以来的动力地貌沉降量.计算结果表明现今的动力地貌的情况和 Wheeler and White(2002)得出的结果差不多.有意义的是莺歌海盆地裂陷期和裂后期动力地貌发生了明显变化,即在 40~20 Ma 表现抬升 0~100 m,而 20 Ma 至今表现为沉降,约为 100~300 m(Xie *et al.*, 2006).

莺歌海盆地的异常沉降量在 300~1 200 m 之间,且向海和东南方向增加.动力地貌的计算结果和盆地西北部的异常沉降量基本吻合.但是,在盆地中部及南部的异常构造沉降量要比动力地貌沉降量要小得多.这表明,莺歌海盆地中南部的异常沉降量远大于动力地貌沉降量,这还需要其他机制来解释.

4.2 盆缘断裂的右旋走滑作用

莺歌海盆地沉积物和构造记录表明,在 36~21 Ma(Sun *et al.*, 2003)期间印支板块伴有顺时针旋转的左旋活动导致了裂陷作用的发生.21 Ma 之后,印支地块左旋走滑作用对莺歌海盆地中南部沉降的影响显著减小.随着南海海底扩张(Briais *et al.*, 1993)的停止,南海北部大陆边缘盆地裂陷作用结束并进入裂后沉降阶段,但 5.5 Ma 以来,莺歌海盆地边缘断裂(1 号断裂等)发生右旋走滑作用,从而导致盆地中部和东南部大量沉积物的堆积,显然,在盆地中部及中南部由于走滑拉分作用出现快速构造沉降,并形成了巨厚的沉积物.这一认识与莺歌海盆地异常裂后沉降,特别是 5.5 Ma 以来异常裂后沉降量急剧增加是吻合的.

4.3 强烈的岩石圈减薄

莺歌海盆地裂陷期和裂后期沉积物厚度较大.如图 4b 所示,盆地中央的破裂不整合埋深可以达到

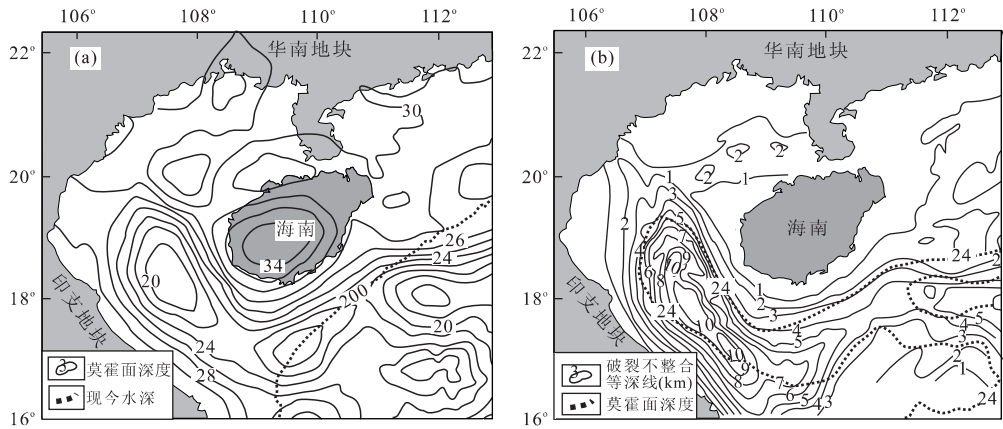


图 4 莫霍面和破裂不整合深度对比(Xie *et al.*, 2006)

Fig. 4 Comparison of the Moho depth (a) and isobath of the breakup unconformities (b)

10 km. 图 4a 和图 4b 对比显示,最大的裂后沉降位置和最浅的 Moho 面位置相互对应。例如,破裂不整合深度超过 6 km 区域的 Moho 面深度小于 22 km。实际上,如果假定裂陷期沉积物的厚度为 6 km,那么这些区域的地壳厚度不足 10 km。而在地壳岩石圈负荷扰曲机制中,地壳厚度是控制其扰曲刚度的主控因素(李思田等,2004),所以强烈的岩石圈减薄作用,致使盆地基底地块刚度明显降低。同时,在红河充足物源的基础上,裂陷期充填了大量沉积物。较厚的裂陷期沉积物和较弱的地块刚度,便可以产生明显的裂后异常沉降。

综上所述,莺歌海盆地基底强烈的岩石圈减薄作用为该巨厚热沉降提供了有利的条件,同时晚期盆缘断裂的右旋走滑作用以及动力地貌的沉降强化了裂后沉降,进而导致异常构造沉降量的增大,这一结论与中新世以来盆地沉降中心的向南快速迁移相一致(李思田等,1998;Ren *et al.*, 2001)。

5 结论

(1) 莺歌海盆地存在明显异常裂后沉降,向东南和向海方向递增。通过回剥法和应变速率反演方法的分析,发现盆地内观测裂后沉降和模拟预测的理论裂后沉降结果存在较大差异,西北部异常构造沉降量为 300~500 m,中部和东南部为 900~1 200 m。

(2) 盆地西北部自 20 Ma 以来的动力地貌沉降量为 100~300 m,与该区域 300 m 左右的异常沉降量基本吻合,因此可以用动力地貌的沉降机理来解释。

(3) 盆地中央凹陷的基底强烈的岩石圈减薄作用为盆地内巨厚裂后沉积物堆积提供了有利的条件,同时晚期盆缘断裂的右旋走滑作用以及动力地貌的沉降是盆地内裂后异常构造沉降的主要控制因素。

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. *Geological Society of America Bulletin*, 95: 686—700.

Baldwin, S., 1999. Quantifying the development of a deep sedimentary basin: The Bonaparte basin, NW Australia [Dissertation]. Cambridge University, Cambridge, 236.

Briais, A., Patriat, P., Tapponnier, P., 1993. Updated inter-

pretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research*, 98(B4): 6299—6328.

Burgess, P. M., Gurnis, M., Moresi, L., 1997. Formation of sequences in the cratonic interior of North America by interaction between mantle, eustatic, and stratigraphic processes. *Geological Society of America Bulletin*, 109(12): 1515—1535.

Clift, P., Lin, H., 2001. Preferential mantle lithospheric extension under the South China margin. *Marine and Petroleum Geology*, 18(8): 929—945.

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.

Clift, P. D., Lin, J., ODP Leg 184 Scientific Party, 2001. Patterns of extension and magmatism along the continent-ocean boundary, South China margin. In: Wilson, R. C., Whitmarsh, R. B., Taylor, N., et al., eds., Non-volcanic rifting of continental margins: A comparison of evidence from land and sea. *Geological Society, London, Special Publication*, 187: 489—510.

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., Xie, T. J., et al., 1997. Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea. Science Press, Beijing, 193—256 (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).

Hager, B. H., O'Connell, R. J., 1981. A simple global model of plate dynamics and mantle convection. *Journal of Geophysics Research*, 86(B6): 4843—4867.

Hayes, D. E., Nissen, S. S., Buhl, P., et al., 1995. Throughgoing crustal faults along the northern margin of the South China Sea and their role in crustal extension. *Journal of Geophysical Research*, 100(B11): 22435—22446.

Leloup, P. H., Lacassin, R., Tapponnier, P., et al., 1995. The Ailaoshan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251(1—4): 3—84.

Li, S. T., Lin, C. S., Zhang, Q. M., et al., 1998. Dynamic process of episodic rifting in continental marginal basin and tectonic

- events since 10 Ma in South China Sea, *Chinese Science Bulletin*, 43(8):797—810 (in Chinese).
- Li, S. T., Xie, X. N., Wang, H., et al., 2004. Principle and application of sedimentary basin analysis. Higher Education Press, Beijing (in Chinese).
- Lin, C. S., Li, S. T., Zhang, Q. M., 1997. Lithospheric stretching, subsidence and thermal history modeling: Application to Yinggehai, Qiongdongnan and Songliao basins in East China. *Journal of China University of Geosciences*, 8:83—89.
- Lithgow-Bertelloni, C., Gurnis, M., 1997. Cenozoic subsidence and uplift of continents from time-varying dynamic topography. *Geology*, 25(8):735—738.
- Lü, M., Zhang, G. H., 1995. Study on depositional systems and sequence stratigraphy in the Yinggehai and Qiongdongnan basins. Research Report of Nanhai West Corporation of China Offshore Oil, Zhanjiang (in Chinese).
- Müller, R. D., Lim, V. S. L., Isern, A. R., 2000. Late Tertiary tectonic subsidence on the northeast Australian passive margin: Response to dynamic topography. *Marine Geology*, 162(2—4):337—352.
- Rangin, C., Huchon, P., Le Pichon, X., et al., 1995. Cenozoic deformation of Central and South Vietnam. *Tectonophysics*, 251(1—4):179—196.
- 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*, 344:175—205.
- Richards, M. A., Hager, B. H., 1984. Geoid anomalies in a dynamic Earth. *Journal of Geophysical Research*, 89:5987—6002.
- Ru, K., Pigott, J. D., 1986. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 70(9):1136—1155.
- Slater, 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.
- Song, X. D., Li, S. T., Li, Y. C., et al., 2004. Structure of lithospheric mantle and its implications for the evolution of major basins in China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(5):531—538 (in Chinese with English abstract).
- Steinberger, B., Sutherland, R., O'Connell, R. J., 2004. Prediction of Emperor-Hawaii seamount locations from a revised model of global plate motion and mantle flow. *Nature*, 430:167—173.
- Su, D. Q., White, N., McKenzie, D., 1989. Extension and subsidence of the Pearl River Mouth basin, northern South China Sea. *Basin Research*, 2:205—222.
- Sun, Z., Zhong, Z. H., Zhou, D., 2007. The analysis and analogue modeling of the tectonic evolution and strong subsidence in the Yinggehai basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(3):347—356 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Wheeler, P., White, N., 2000. Quest for dynamic topography: Observations from Southeast Asia. *Geology*, 28(11):963—966.
- Wheeler, P., White, N., 2002. Measuring dynamic topography: An analysis of Southeast Asia. *Tectonics*, 21(5): Art. No. 1040 SEP-OCT.
- White, N., 1993. Recovery of strain-rate variation from inversion of subsidence data. *Nature*, 366(6454):449—452.
- White, N., 1994. An inverse method for determining lithospheric strain rate variation on geological timescales. *Earth and Planetary Science Letters*, 122:351—371.
- 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*, 23:745—765.

附中文参考文献

- 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, 谢泰俊, 等, 1997. 南海北部大陆边缘盆地分析 & 油气聚集. 北京: 科学出版社, 193—256.
- 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.
- 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.
- 李思田, 解习农, 王华, 等, 2004. 沉积盆地分析理论与应用. 北京: 高等教育出版社.
- 吕明, 张国华, 1995. 莺—琼盆地层序地层及沉积体系研究. 85-102-10-02. 湛江: 中国海洋石油南海西部公司.
- 宋晓东, 李思田, 李迎春, 等, 2004. 岩石圈地幔结构及其对中国大型盆地的演化意义. 地球科学——中国地质大学学报, 29(5):531—538.
- 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 2007. 莺歌海盆地构造演化与强烈沉降机制的分析和模拟. 地球科学——中国地质大学学报, 32(3):347—356.