

台西南盆地岩石圈伸展及裂后沉降特征分析

吴哲¹, 杨风丽¹, 钟家良², 钟广见³

(1. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 2. 中海石油能源发展钻采工程研究院 湛江实验中心, 广东 湛江 524057; 3. 国土资源部 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760)

摘要: 计算有效弹性厚度和不同尺度的拉张因子, 并结合裂后的沉积记录可以反映一个伸展性盆地的形成演化特征. 运用基于弹性梁模型和挠曲均衡原理的二维构造模拟软件重点对横穿台西南盆地的一条地震-地质剖面进行模拟. 分析结果表明: 1.5 km 为台西南盆地最合适的有效弹性厚度; 岩石圈尺度的拉张因子在 1.2~4.8 之间, 上地壳尺度的拉张因子在 1.0~1.2 之间, 全地壳尺度的拉张因子在 1.1~3.0 之间, 岩石圈伸展具有横向的非均质性和深度的依赖性; 台西南盆地裂后阶段受陆架坡折形成、东沙运动两期构造运动影响较大, 不同于典型伸展性盆地裂后沉降模式, 沉降特征无明显规律性.

关键词: 台西南盆地; 岩石圈伸展; 有效弹性厚度; 不同尺度拉张因子; 裂后沉降速率

中图分类号: P67, P741

文献标识码: A

Analysis of Lithospheric Extension and Post-rift Subsidence in Taixinan Basin

WU Zhe¹, YANG Fengli¹, ZHONG Jialiang², ZHONG Guangjian³

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. CNOOC Energy Technology & Service-Oilfield Engineering Research Institute, Zhanjiang 524057, China; 3. Guangzhou Marine Geological Investigation Bureau, Guangzhou 510760, China)

Abstract: The effective elastic thickness, different scales of extension factors and post-rift subsidence are important in reflecting characteristics of an extensional basin. 2D structural simulation softwares based on the flexure isostasy model and the flexural cantilever mode were employed to model the interpreted seismic profiles across Taixinan Basin. Results show that the appropriate effective elastic thickness value in Taixinan basin is 1.5 km. The extension is characterized by the lateral heterogeneity and depth-dependence of lithospheric extension in Taixinan Basin, the

extension factor changing between 1.2 and 4.8 in lithosphere, between 1.2 and 2.9 in the whole crust, and between 1.0 and 1.2 in the upper crust. Being different from subsidence characteristics of a classical extensional basin, the post-rift subsidence rate in Taixinan Basin is not of obvious regularity, which is mainly affected by the formation of slope and Dongsha tectonic movement.

Key words: Taixinan Basin; lithospheric extension; the effective elastic thickness; different scales of extension factors; subsidence rate in post-rift

一个典型伸展性盆地的形成和演化包括裂陷阶段和裂后阶段, 有效弹性厚度(T_e)和拉张因子是表征伸展性盆地形成机制和演化特征的两个重要参数, 能够很好地反映裂陷阶段岩石圈的纵向抗变形能力和横向伸展情况, 并且由于隆升的岩石圈热物质在裂后阶段逐渐冷却、体积变小, 从而形成裂后热沉降作用^[1-2]. 伸展性盆地岩石圈伸展的机制主要有四种模型: 纯剪切模型^[3]、简单剪切模型^[4]、弹性梁伸展模型^[5-6]和分层剪切变形模式^[7]. 其中弹性梁模型是在 Mckenzie 模型的基础上添加了挠曲均衡的机制, 并且考虑了上地壳的脆性断裂对伸展盆地的影响作用, 更接近实际地质情况. 目前针对南海北部被动大陆边缘伸展性盆地岩石圈伸展机制和深部构造特征的大量研究中, 南海被动陆缘有效弹性厚度的研究结果各不相同. 庞雄等^[8]认为白云凹陷有效弹性厚度为 3 km 时, 所得到的古地形起伏太大, T_e 为 0 km 时符合白云凹陷的情况; 利用自由空间重力异常数据计算的方法得出靠近台湾的南海大陆架的有效弹性厚度应该在 13 km 左右^[9]; 运用响应函数的方法计算得出南海周缘地区的有效弹性厚度在 1~3 km 之间^[10]; 曹洁冰等^[11]运用构造模拟的方法

认为曾母盆地最合适的有效弹性厚度为 3 km. 对于南海北部拉张因子的计算研究主要集中在珠江口盆地和琼东南盆地,并且利用不同方法计算得到的拉张因子结果存在差别. 以珠江口盆地为例,利用平衡剖面技术研究珠江口盆地深水珠二坳陷得到新生代拉张系数在 1.15~1.35 之间^[12];通过模拟计算得到珠江口盆地总的拉张因子约在 1.70~2.00 之间^[13];根据地震剖面 and 测井资料计算得出珠江口盆地总的地壳拉张因子为 1.40^[10];Westaway^[14] 计算出珠江口盆地总的拉张因子为 1.80,上地壳最大拉张因子为 1.30. 这些结果存在差异的主要原因是不同方法反映的是不同尺度的拉张因子,在没有明确所计算拉张因子地质意义的前提下,不能随意进行比较. 总的来说,目前针对台西南盆地岩石圈伸展特征和裂后沉降特征的研究较少,从弹性梁模型和挠曲均衡原理角度进行研究是一个较新的方向.

针对以上问题,本次研究利用横穿台西南盆地的地震-地质解释剖面,采用基于弹性梁模型和挠曲均衡原理的二维正反演相结合的构造模拟分析方法,计算台西南盆地的有效弹性厚度、陆架和陆坡区不同尺度(上地壳、地壳、岩石圈)拉张因子来反映岩石圈伸展特征,并结合裂后阶段不同时期沉降速率特征的分析来再现一个伸展性盆地的形成、演化过程.

1 区域地质概况

台西南盆地是新生代发育于南海东北部被动陆缘的伸展性盆地,位于台湾的西南部,东侧是菲律宾

海板块和欧亚板块的碰撞挤压结合部位,南与南海海盆相接,从北向南分割为北部坳陷、中央隆起及南部坳陷 3 个构造单元(图 1),台西南盆地中的断裂十分发育,既有北东、北东东和近东西走向的正断层,又有北西—北西西和南北走向的逆断层,盆地内发育中生代(J-K)、新近纪和古近纪地层,新生代地层厚度大^[15-17]. 从横穿该地区的地震-地质解释剖面 A—B 可以发现(图 2),以不整合面 T7(29.3 Ma 晚渐新世初期)为界,可以将新生代以来的地层划分为两个特征明显不同的构造层:裂陷阶段构造层和裂后阶段构造层^[18]. 不整合面 T7 上、下地层为明显的角度不整合关系,可见明显的削蚀或侵蚀现象,其中裂陷阶段的沉积受主干断层控制,靠近主干断裂的区域快速沉积,形成地堑、半地堑的构造样式,不整合面 T7 之上为披覆式坳陷发育期的构造样式.

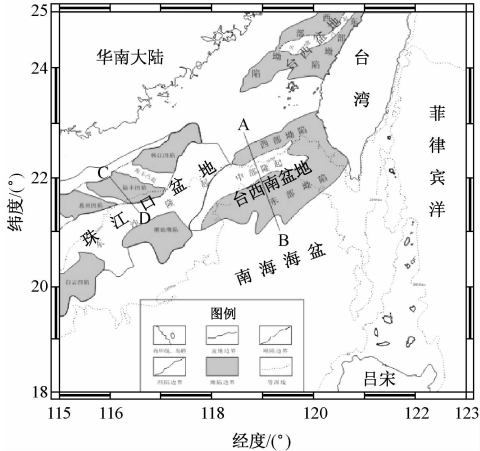


图 1 台西南盆地及邻区构造区划简图
Fig.1 Tectonic subdivision sketch of the Taixinan Basin and its neighboring areas

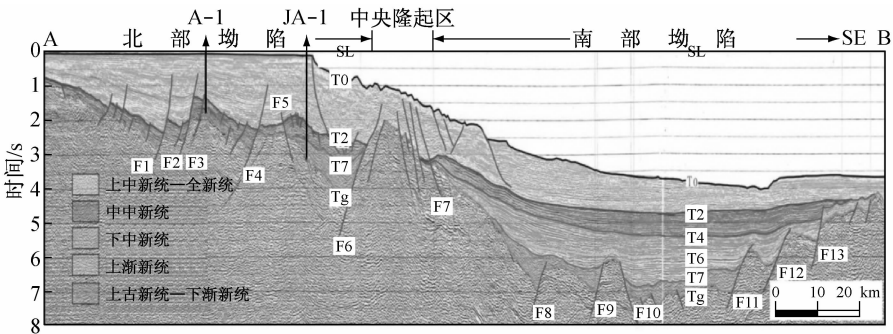


图 2 横穿台西南盆地的地震-地质解释剖面^[18]
Fig.2 Seismic-geological structure interpretation profiles across Taixinan Basin

2 有效弹性厚度和不同尺度拉张因子的计算原理

有效弹性厚度 T_e 是一个抽象的物理量,反映了

现今岩石圈抵抗变形的能力,代表岩石圈的综合强度. 将正演软件 Stretch 和反演软件 Flex-Decomp 相结合可求得 T_e 值. 首先利用挠曲回剥后的地层厚度计算公式求得弹性挠曲刚度 D ^[6].

$$Y = \left\{ Y' \left(\frac{\rho_{\text{地幔}} - \overline{\rho_{\text{总}}}}{\rho_{\text{地幔}} - \rho_{\text{水}}} \right) - \Delta_{\text{sl}} \left(\frac{\rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{地幔}} - \rho_{\text{水}}} \right) + \right. \\ \left. (W_{\text{d}} - \Delta_{\text{sl}}) \right\} \left\{ \frac{(\rho_{\text{地幔}} - \overline{\rho_{\text{总}}})}{\rho_{\text{地幔}} - \overline{\rho_{\text{总}}} + \frac{D}{g} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4} \right\} \quad (1)$$

式中: Y 为回剥后的厚度; Y' 为回剥前的厚度; $\rho_{\text{地幔}}$, $\rho_{\text{水}}$ 和 $\overline{\rho_{\text{总}}}$ 分别为地幔、水以及地层总的平均密度; W_{d} 为古水深的深度; Δ_{sl} 为海平面的变化; λ 的数值为盆地宽度的两倍; D 为岩石圈的挠曲刚度. 再依据 T_{e} 和弹性挠曲刚度 D 之间的关系式可以计算得到 T_{e} .

$$D = ET_{\text{e}}^3/[12(1-\nu^2)] \quad (2)$$

式中: E 为杨氏模量; ν 为泊松比.

拉张因子是指岩石圈(或全地壳、上地壳、下地壳、某一时地层)伸展后与伸展前长度的比值. 本次研究中岩石圈、上地壳、全地壳尺度拉张因子的计算方法互不相同^[19], 其中岩石圈尺度的拉张因子是基于 Mckenzie^[3] 提出的岩石圈拉张因子与热的关系, 应用 Flex-Decomp 软件, 采用挠曲回剥、去压实以及裂后热沉降反演模拟等关键技术求取; 上地壳尺度的拉张因子主要是由断裂性质控制, 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属性参数, 包括断层位置、极性、倾角和水平断距等信息, 应用 Stretch 软件求取; 受新生代拉伸作用影响较小的相邻华南地区的地壳厚度在 30~35 km 之间^[20], 本次研究中将 32 km 作为初始地壳的厚度, 利用现今台西南盆地莫霍面深度数据可求取全地壳尺度的拉张因子.

运用反演软件 Flex-Decomp 和正演软件 Stretch 相互结合、互相验证的模拟方法可以定量再现一个伸展盆地的发育演化过程. 反演模拟可以运用挠曲回剥法恢复盆地的裂后时期演化历史, 正演模拟可以运用挠曲悬臂模型正演盆地裂陷时期和裂后时期的演化历史. 本次模拟过程中的关键参数取值主要有: 上地壳脆性厚度 15 km、地幔厚度 32 km、地壳密度 $2.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、地幔密度 $3.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、水密度 $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、岩石圈温度 $1\,333.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、热扩散系数 3.28×10^{-5} . 研究中所使用软件已成功应用于北海、东非大裂谷、珠江口盆地、琼东南盆地等伸展性盆地^[21-27].

3 台西南盆地岩石圈伸展特征分析

3.1 有效弹性厚度的计算

将从地震剖面上读取的 9 条控制断裂的属性参数(表 1)输入 Stretch 软件中, 保持其他参数一定, 调

整 T_{e} 值得到不同盆地形态的模拟结果(图 3), 与现今地质剖面回剥反演至 T7 界面拉平后的剖面(图中虚线部分)相比较可以发现, T_{e} 为 1.5 km 时与去压实回剥拉平后的剖面的地层厚度以及分布范围吻合度最高, 在剖面 60~75 km, 105~130 km, 140~165 km 位置都出现 Tg~T7 的地层, 与实际情况相吻合; T_{e} 为 0 km 即没有考虑岩石圈弹性强度的情况下, 模拟结果与实际情况相差很大, 说明该地区岩石圈性质为挠曲均衡而不是 Airy 均衡; T_{e} 为 3 km 或者 6 km 时与实际沉积地层相比较在剖面位置 40~60 km 的分布范围内沉积厚度都过大. 有效弹性厚度能够影响盆地的整体形态, 对伸展性盆地内断块下盘翘起和上盘沉降起重要作用. Robert 等^[23] 通过综合研究指出被动陆缘伸展性盆地岩石圈的有效弹性厚度在 1.5~5.0 km 之间. 本次模拟结果表明 1.5 km 为台西南盆地最合适的有效弹性厚度, 表征被动大陆边缘环境.

表 1 正演模拟中所设置的断裂属性参数
Tab.1 Property fault parameters used in the forward modeling

序号	位置/km	伸展量	倾角/($^{\circ}$)	倾向
F5	63.0	1.0	40	NW
F6	76.0	1.8	65	NE
F7	112.0	3.0	30	NW
F8	120.0	0.8	60	NE
F9	133.5	1.2	71	NE
F10	136.0	0.8	71	NW
F11	165.4	0.8	64	NE
F12	174.3	0.2	75	NE
F13	185.0	0.1	62	NE

3.2 不同尺度拉张因子的计算

依据不同尺度拉张因子的计算方法, 首先将图 2 的地震-地质剖面数字化后输入 Flex-Decomp 软件(图 4a), 然后将现今的地质剖面回剥至裂陷阶段结束时的 T7 界面(图 4b), 该时期的沉积环境为湖沼相^[13], 以此作为约束条件计算求得岩石圈尺度的拉张因子在 1.2~4.8 之间, 减薄系数在 0.20~0.80 之间变化; 运用 Stretch 软件将盆地从基底断裂发育时期正演至裂陷阶段结束时的 T7 界面, 计算求得上地壳尺度的拉张因子在 1.0~1.2 之间, 减薄系数在 0~0.15 之间变化; 通过现今的莫霍面深度^[28] 计算求得全地壳尺度的拉张因子在 1.1~3.0 之间, 减薄系数在 0.11~0.66 之间变化. 将三种尺度的拉张因子进行比较(图 4c, 4d), 可以发现台西南盆地岩石圈、全地壳和上地壳尺度的拉张因子都随剖面位置变化, 表现为横向的非均质性: 从盆地边缘向坳陷中

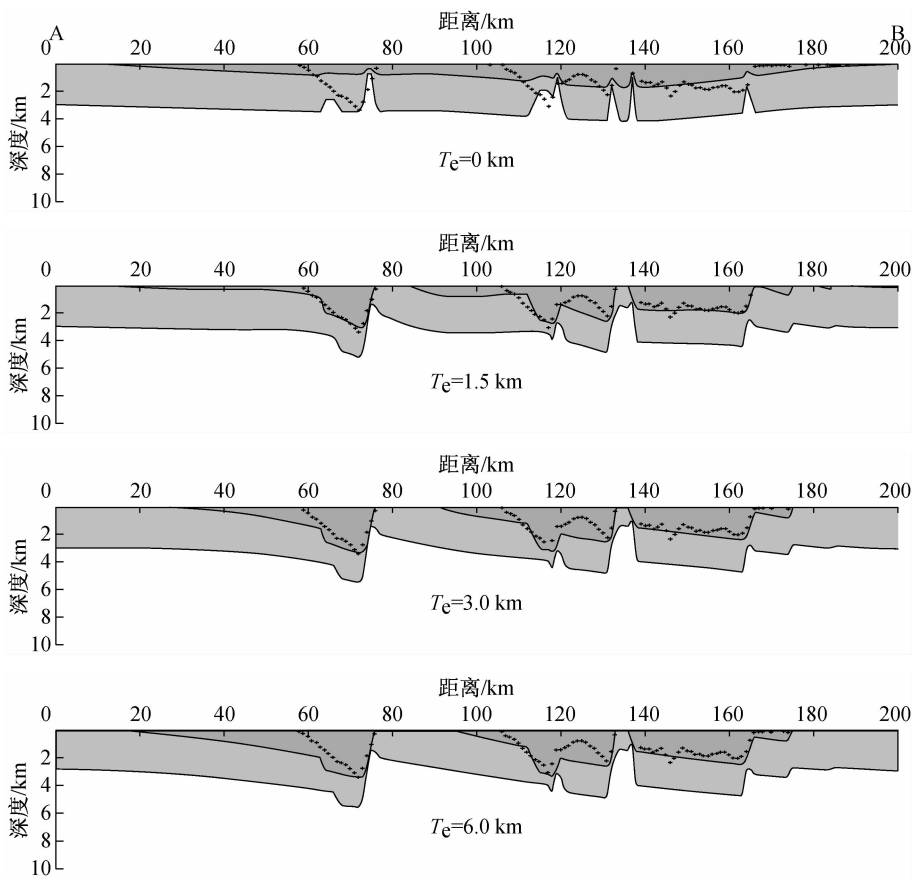


图 3 台西南盆地 A—B 测线不同有效弹性厚度取值的模拟结果比较
Fig.3 Results with various T_e across Line A—B profile in Taixinan Basin

心逐渐增大,从坳陷位置向隆起地区逐渐减小,拉张因子的极值都出现在坳陷中心,靠近洋壳的南部坳陷中心的拉张因子数值大于北部坳陷中心的数值,拉张因子中心有从北向南增大的趋势.同时从加入 15%标准误差量的模拟结果中发现,台西南盆地岩石圈伸展具有深度依赖性:岩石圈和全地壳尺度的拉张因子明显大于上地壳尺度的拉张因子,在陆架范围内(0~60 km)上地壳和全地壳尺度的拉张因子不能明显分开,而向南处于深水区的陆坡范围内,岩石圈、全地壳与上地壳尺度拉张因子的差别越来越明显,即岩石圈在陆架和陆坡地区所发生的伸展作用特征有所不同.

在不同尺度拉张因子计算结果的基础上,依据公式(3)求得台西南盆地岩石圈、全地壳、上地壳尺度的伸展量如图 4 所示,分别为 (138 ± 20) km, (90 ± 14) km, (13 ± 2) km(15%的标准误差量).

$$E = \int \epsilon dx = \int \left(1 - \frac{1}{\beta(x)}\right) dx \tag{3}$$

式中: E 为伸展量; $\beta(x)$ 为剖面 x 处的拉张因子.

4 台西南盆地裂后沉降特征分析

反演模拟回剥分析中,考虑沉积物荷载、水的荷载以及构造荷载等作用的影响后恢复不同时期的地层厚度,计算各个时期的沉降速率曲线.理论上的热沉降沉积应该是大致分布在通过主凹中心并沿陆坡方向延伸的一个长垣形范围内,同时沉降速率随深度呈幂指数减小^[2],但是如图 6 所示,台西南盆地裂后阶段各个时期不同位置的沉降速率变化很大,没有明显的规律性,不同与 McKenzie 典型的伸展性盆地裂后阶段热沉降模式.只是南部坳陷的沉降中心在不断变化,与所处的沉积环境相对应,北部坳陷沉降速率波动如此之大,分析与 10.5 Ma 发生的东沙运动导致北部局部隆起密切相关.南海北部的琼东南盆地裂后沉降特征具有明显的规律性,从盆地隆起区到深水坳陷区沉降速率逐渐增大,并存在沉降速率突然加速的现象^[27].将台西南盆地裂后沉降特征与珠江口盆地(图7)、琼东南盆地^[27]相比较可以

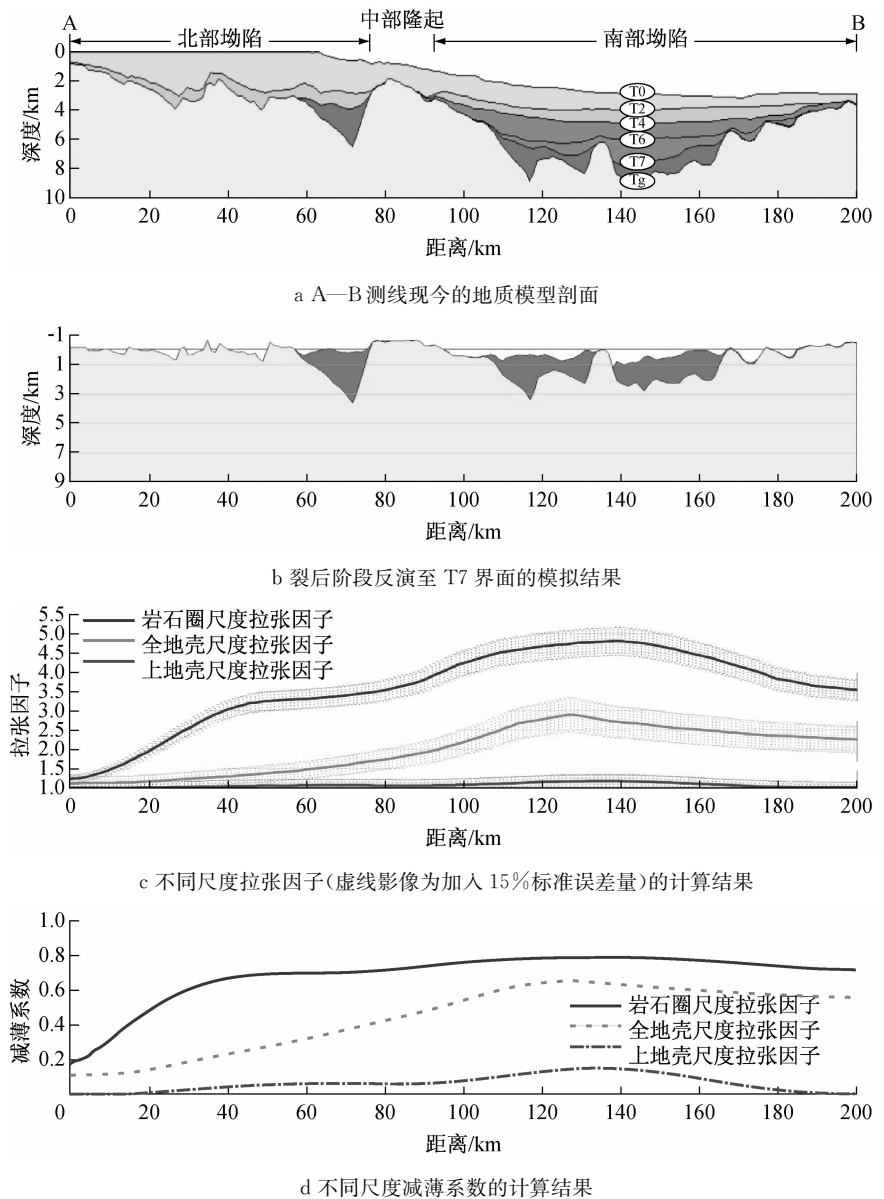


图 4 台西南盆地 A—B 测线不同尺度拉张因子及减薄系数的计算结果

Fig.4 Calculated different scales of extension and thinning factors of Line A—B in Taixinan Basin

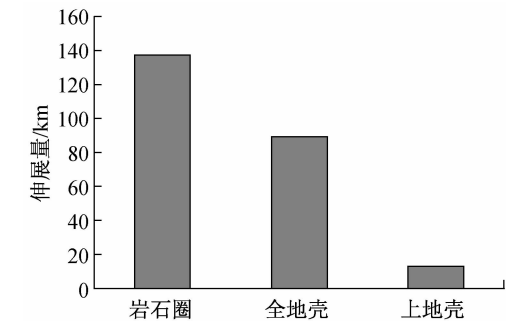


图 5 台西南盆地不同尺度伸展量的计算结果
Fig.5 Calculated results for different scales of extension in Taixinan Basin

异性,台西南盆地受后期构造运动影响较大,裂后沉降特征没有明显的规律性.从沉降特征、基底隆升和地层接触的关系推测与 18.6~16.0 Ma 陆架坡折形成、10.5 Ma 的东沙运动两期构造事件影响较大有关.珠江口盆地和琼东南盆地裂后沉降特征比较有规律性;珠江口盆地在 18.5~16.0 Ma 沉降速率存在重大加速现象,推测与当时陆架坡折形成、海平面的快速上升相对应;而琼东南盆地 5.5 Ma 以来的沉降速率明显增大^[27],与深部地幔对流以及强烈的岩石圈减薄作用有关^[29].东沙运动形成的影响在台西南盆地表现最大,从珠江口盆地传递到琼东南盆地已经很微弱.

发现,南海北部地区的裂后沉降特征具有地区的差

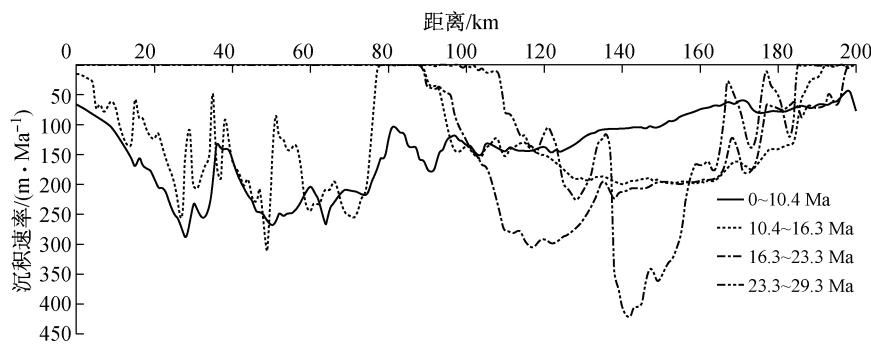


图 6 台西南盆地 A—B 测线裂后阶段不同时期的沉降速率

Fig.6 Subsidence rate of Line A—B in different post-rift periods across Taixinan Basin

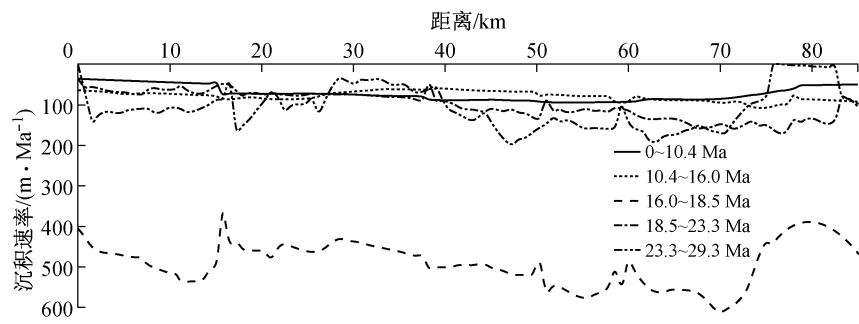


图 7 珠江口盆地东部 C—D 测线裂后阶段不同时期的沉降速率

Fig.7 Subsidence rate of Line C—D in different post-rift periods across Eastern Pearl River Mouth Basin

5 结论

(1)运用基于弹性梁模型和挠曲均衡原理的二维正反演相结合的构造模拟分析方法计算得到台西南盆地在裂陷时期不符合 Airy 均衡现象,最适合的有效弹性厚度数值为 1.5 km,表征大陆边缘环境,接近洋壳性质.依据不同尺度拉张因子的计算方法计算得到台西南盆地岩石圈尺度的拉张因子在 1.2~4.8 之间,上地壳尺度的拉张因子在 1.0~1.2 之间,全地壳尺度的拉张因子在 1.1~3.0 之间.台西南盆地岩石圈伸展具有横向的非均质性和深度的依赖性,极值都在坳陷中心,拉张因子中心有从北向南增大的趋势,同时岩石圈伸展在陆架和陆坡区所具有的深度依赖性存在差别.在研究剖面上岩石圈、全地壳、上地壳尺度的伸展量分别为 (138 ± 20) km, (90 ± 14) km, (13 ± 2) km.

(2)台西南盆地裂后沉降特征不同与典型的伸展性盆地裂后沉降模式,裂后阶段各个时期不同位置的沉降速率变化大,没有明显的规律性,受后期构造运动影响较大,分析主要与 18.6~16.0 Ma 陆架

陆坡形成和 10.5 Ma 的东沙运动两期构造事件相关.

参考文献:

[1] Watts A B. Isostasy and flexure of the lithosphere [M]. London:Cambridge University Press, 2001.

[2] Allen P A, Allen J R. Basin analysis[M]. [S. l.]: Blackwell Publishing, 2005.

[3] McKenzie D P. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 40: 25.

[4] Wernicke B. Uniform-sense simple shear of the continental lithosphere[J]. Canadian Journal of Earth Science, 1985, 22: 108.

[5] Kusznir N J, Marsden G., Egan S S. A flexural cantilever simple shear/pure shear model of continental extension[J]. Geological Society, 1991, 56: 41.

[6] 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.

[7] Yao B C, Hayes D E. Lithospheric deformation under the effect of an extensional stress field[J]. Geological Society of China, 1998, 41: 517.

[8] 庞雄,陈长民,彭大钧,等. 南海珠江深水扇系统及油气[M]. 北京:科学出版社, 2007.

- PANG Xiong, CHEN Changmin, PENG Dajun, et al. The Pearl River deep-water fan system and petroleum in South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [9] Lin A T, Watts A B. Origin of West Taiwan Basin by orogenic loading and flexure of a rifted continental margin[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B9): 2185.
- [10] Clift P, 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]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19: 951.
- [11] 曹洁冰, 周祖翼, 吴能友, 等. 曾母盆地西部岩石圈特征与有效弹性厚度: 来自构造模拟的约束[J]. *大地构造与找矿学*, 2005, 29(3): 377.
- CAO Jiebin, ZHOU Zuyi, WU Nengyou, et al. Lithospheric characteristics and effective elastic thickness of western Zengmu Basin, South China Sea: constraints from tectonic modeling[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2005, 29(3): 377.
- [12] 董冬冬, 王大伟, 张功成, 等. 珠江口深水区新生代构造沉积演化[J]. *中国石油大学学报*, 2009, 33(5): 17.
- DONG Dongdong, WANG Dawei, ZHANG Gongcheng, et al. Cenozoic tectonic and sedimentary evolution of deepwater area, Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2009, 33(5): 17.
- [13] 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 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, 1997.
- GONG Zaisheng, LI Sitian, XIE Taijun, et al. Continental marginal basins analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [14] Westaway. Re-evaluation of extension across the Pearl River Mouth basin, South China Sea—implications for continental lithosphere deformation mechanisms[J]. *Journal of Structural Geology*, 1994, 16(6): 823.
- [15] Zhou D, Ru K, Chen H Z. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1): 161.
- [16] Ding W W, Li J B, Li M B, et al. A Cenozoic tectono-sedimentary model of the Tainan Basin, the South China Sea: evidence from a multi-channel seismic profile[J]. *Journal of Zhejiang University Science*, 2008, 9(5): 702.
- [17] 杜德利. 台西南盆地的构造演化与油气藏组合分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(3): 5.
- DU Deli. Tectonic evolution and analysis of oil-gas accumulation in Southwest Taiwan basin [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1994, 14(3): 5.
- [18] 易海, 钟广见, 马金凤. 台西南盆地新生代断裂特征与盆地演化[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(6): 560.
- YI Hai, ZHONG Guangjian, MA Jinfeng. Fracture characteristics and basin evolution of the Taixinan basin in Cenozoic [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2007, 29(6): 560.
- [19] Davis M, Kusznir N. Depth-dependent lithospheric stretching at rifted continental margins [C] // *Proceedings of NSF rifted margins theoretical institute*. New York: Columbia University Press, 2004, 92-137.
- [20] 张云帆, 孙珍, 周蒂, 等. 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: 地球科学*, 2007, 37(12): 1609.
- ZHANG Yunfan, SUN Zhen, ZHOU Di, et al. Stretching characteristics and its dynamic significance of the northern continental margin of South China Sea [J]. *Science in China (Series D): Earth Science*, 2007, 37(12): 1609.
- [21] Roberts A M, Yielding G. Deformation around basin-margin faults in the North Sea/Norwegian rift [J]. *Geological Society, London: Special Publications*, 1991, 56: 61.
- [22] Roberts A M, Yielding G, Kusznir N J, et al. Mesozoic extension in the North Sea: constraints from flexural backstripping, forward modelling and fault populations [C] // *Petroleum Geology of Northwest Europe, Proceedings of the Fourth Conference*. London: Geological Society of London, 1993, 1123-1136.
- [23] Roberts A M, Yielding G, Kusznir N J, et al. Quantitative analysis of Triassic extension in the Northern Viking Graben [J]. *Journal of the Geological Society*, 1995, 152: 15.
- [24] Nadin P A, Kusznir N J. Palaeocene uplift and Eocene subsidence in the northern North Sea Basin from 2D forward and reverse stratigraphic modeling [J]. *Journal of the Geological Society*, 1995, 152: 833.
- [25] 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[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(1): 57.
- ZHANG Zhongjie, LIU Yifeng, ZHANG Sufang, et al. The depth-dependence of crustal extension beneath Qiongdongnan basin area and its tectonic implication [J]. *Geophysics*, 2010, 53(1): 57.
- [26] 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.
- ZHAO Zhongxian, ZHOU Di, LIAO Jie, et al. Lithospheric stretching modeling of the continental shelf in the Pearl River Mouth basin and analysis of post-breakup subsidence [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(8): 1135.
- [27] 佟殿君, 任建业, 雷超, 等. 琼东南盆地深水区岩石圈伸展模式及其对裂后后期沉降的控制[J]. *中国地质大学学报*, 2009, 34(6): 963.
- TONG Dianjun, REN Jianye, LEI Chao, et al. 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*, 2009, 34(6): 963.
- [28] 郝天珧, 黄松, 徐亚, 等. 南海东北部及邻区深部结构的综合地球物理研究[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(6): 1785.
- HAO Tianyao, HUANG Song, XU Ya, et al. Comprehensive geophysical research on the deep structure of Northeastern South China Sea [J]. *Geophysics*, 2008, 51(6): 1785.
- [29] Xie X N, Muller 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]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23: 745.