

琼东南盆地构造沉降的时空分布 及裂后期异常沉降机制

李亚敏^{1, 2}, 施小斌¹, 徐辉龙¹, 何家雄³, 刘 兵⁴

1. 中国科学院边缘海地质重点实验室/南海海洋研究所, 广州 510301
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049
3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640
4. 中海石油有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057

摘要:为考察琼东南盆地构造沉降的时空分布及裂后期异常沉降机制,利用回剥技术计算了盆内 68 口井的构造沉降史,并选择 15 口代表井进行拉张应变速率反演及拉张因子计算。结果表明:琼东南盆地构造沉降空间上表现为中央凹陷带和南部凹陷带强于北部凹陷带;时间上在裂陷期出现局部快速沉降—整体慢速沉降—局部快速沉降的阶段特征,进入裂后期逐渐减缓并在 15.5~10.5 Ma 期间减至最低值,但自 10.5~5.5 Ma 以来又明显增大。裂后期异常沉降在盆地东西部都有明显表现,在北部凹陷带较小,在中央凹陷带内往东区有逐渐增大趋势;时间上裂后期异常构造沉降随时间增大,增长过程具有快—慢—快的阶段性。分析认为:裂后期早期的快速沉降可能是裂陷期非均匀拉张的结果,而晚中新世以后的快速构造沉降主要与岩浆活动有关。

关键词:构造沉降;裂后期异常沉降;应变速率反演;拉张因子;琼东南盆地

中图分类号:P548.265 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5888(2012)01-0047-11

Temporal and Spatial Distribution of Tectonic Subsidence and Discussion on Formation Mechanism of Anomalous Post-Rift Tectonic Subsidence in the Qiongdongnan Basin

LI Ya-min^{1, 2}, SHI Xiao-bin¹, XU Hui-long¹, HE Jia-xiong³, LIU Bing⁴

1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology/South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510301, China
2. Graduate School, Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China
3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China
4. Zhanjiang Branch Company, China National Offshore Oil (China) Corporation Limited, Zhanjiang 524057, Guangdong, China

Abstract: To investigate the temporal and spatial distribution of tectonic subsidence and the formation mechanism of anomalous post-rift tectonic subsidence in the Qiongdongnan basin, we calculated the tectonic subsidence history of sixty-eight wells by back stripping method. Then fifteen representative wells were chosen to estimate stretching strain rate using inverse theory and to calculate stretching factors. The results suggest that the extent of tectonic subsidence in the center and southern depressions is greater than that in northern depression. Tectonic subsidence rate that varied with time

收稿日期:2011-05-04

基金项目:国家自然科学基金项目(40676041);国家“973”计划项目(2007CB41170104, 2007 CB41170401)

作者简介:李亚敏(1979—),女,博士研究生,主要从事盆地分析方面研究, E-mail:liyamin05@scsio.ac.cn。

can be summarized as “locally quick-holistically slow-locally quick” followed by gradually decreasing in the post-rift period and attained its minimum during 15.5–10.5 Ma, but it started to increase again since 10.5–5.5 Ma. Anomalous post-rift tectonic subsidence is more obvious in both east and west than in the north of the Qiongdongnan basin and the extent in center depressions increases from west to east. In time scale, the post-rift subsidence increases with time, and the process can be summarized as quick-slow-quick multiple stages. Our results suggest that the quick subsidence in the early post-rift stage likely resulted from the diversity of stretching during the rift period, and the quick tectonic subsidence since Later Miocene was likely caused by magmatic activities.

Key words: tectonic subsidence; anomalous post-rift subsidence; strain rate inversion; stretching factor; Qiongdongnan basin

0 前言

莺—琼盆地是南海北部陆缘重要的含油气沉积盆地。前人已发现该盆地在裂后期存在异常快速的构造沉降现象^[1-7],但对其成因机制,尤其是晚中新世以后的快速沉降机制认识不一:陈红汉等^[1]、张启明等^[2]认为这一现象是一期新的构造热事件或岩浆活动的结果;孙珍等^[3]和袁玉松等^[4]认为与红河断裂的右旋走滑有关;Xie 等^[5]和崔涛等^[6]引入动力地貌(dynamic topography)来解释这一现象,并且认为莺—琼盆地的异常沉降还与红河断裂的右旋走滑、岩浆后期侵入有关;佟殿君等^[7]则认为是岩石圈发生与深度相关的伸展过程,下地壳强烈减薄后的上地壳及岩石圈表层出现挠曲均衡响应,引起快速而大规模的沉降。由于裂后期异常快速沉降是该盆地演化的重要特点,而且对油气成藏有重要影响,因此有必要对其形成机制进行探讨。

由于红河断裂带右旋走滑发生时间^[3,8]与莺—琼盆地裂后异常沉降阶段具有很好的对应性,前人把异常沉降事件与红河断裂带的右旋走滑相联系是可以理解的。为了考察该期异常沉降是否还有其他影响因素,笔者选择琼东南盆地作为研究区,尤其关注远离西部边界①号断裂带影响的琼东南盆地中东部区域,通过分析其构造沉降和裂后异常沉降的时空分布特征,考察是否还有其他的主要影响因素。

1 区域地质背景

琼东南盆地位于海南岛与西沙地块之间,往东通过西沙海槽与南海西北次海盆相通,往西以①号断裂与莺歌海盆地相接(图 1),是在古生代变质岩、白云岩,中生代花岗岩等^[9]前新生代基底上发育起来的北东向新生代陆缘拉张含油气盆地^[10-11]。琼东

南盆地在平面上具有南北分带特征,北部凹陷带包括崖北凹陷、松西凹陷、松东凹陷等,中央凹陷带包括崖南凹陷、乐东凹陷、陵水凹陷、北礁凹陷、松南凹陷和宝岛凹陷等,各凹陷之间分布有崖城凸起、松涛凸起、中央凸起等,这些 NE 向、NEE 向的凹陷和凸起构成了盆地的条带状构造格局;在剖面上,盆地的构造样式由一系列正断层控制的地垒、地堑、半地堑等构成(图 2),表明盆地为伸展型盆地。琼东南盆地地壳结构的形成经历了多次张裂阶段^[12]。

琼东南盆地西部边界①号断裂可能为红河断裂带在海上的延伸分支^[13]。红河断裂带约在 21 Ma 前为左旋走滑,10.4 Ma 或者 5 Ma 以后逐渐表现为右旋走滑^[3,8]。琼东南盆地西部靠近①号断裂呈明显散开可能就是受其走滑作用的影响。盆地具典型裂谷盆地的双层结构,裂陷期地层有始新统、崖城组和陵水组,陵水组顶界面(T60, 21 Ma)为裂后不整合面;T60 以后断层活动明显减弱^[10],盆地进入拗陷沉降阶段,拗陷期地层由三亚组、梅山组、黄流组、莺歌海组及第四系组成,最大沉积厚度超过 10 km^[14-15]。南海西北次海盆的海底扩张时期大约为 30 Ma,西沙海槽为夭折的裂谷,莫霍面埋深仅 16~17 km^[16-18],往琼东南方向莫霍面埋深逐渐加大^①。晚中新世以来南海北部陆架及其邻区广泛存在碱性和拉斑玄武岩岩浆活动^[19]。许惠平等^[20]对琼东南盆地布格重力异常进行分析发现:异常走向以 NE 向为主,总趋势向 SE 方向增加,与海底地貌成镜像关系,且主要断裂上方分布有串珠状重力异常,可能为沿断裂侵入(或喷出)的火山岩所引起。

① 王万银,党炜. 中国及其临近海域重磁资料处理报告. 西安:西安工程学院,2000.

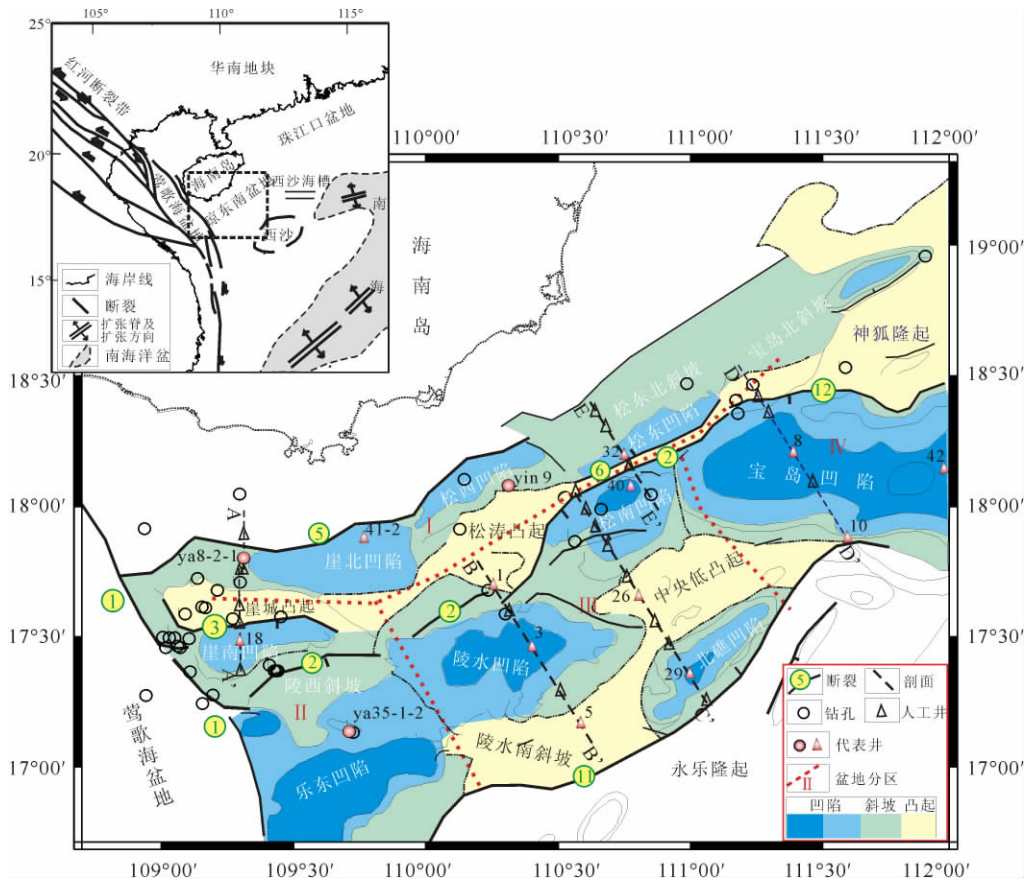


图 1 研究区构造区划及井位分布

Fig. 1 Tectonic units and sections and distribution of wells in the study area

2 研究思路与方法

为了获得研究区构造沉降及裂后异常构造沉降的时空分布特征,首先利用回剥技术计算单井的构造沉降史(图 3(a));随后根据 White^[21]方法由构造沉降史反演该井的拉张应变速率史(图 3(b)),进而求得随时间变化的拉张因子(图 3(c));然后根据裂隙陷阶段的拉张应变速率史计算出理论的裂后构造沉降史;最后计算出裂后异常的构造沉降史(图 3(d))。

2.1 构造沉降

利用回剥技术可以获得单井的构造沉降曲线。假设艾利均衡, t 时刻载水构造沉降 Y_t 可以由下式^[22]获得:

$$Y_t = Y \frac{\rho_m - \rho_s}{\rho_m - \rho_w} - \Delta_{SL} \left(\frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_w} \right) + W_d \quad (1)$$

式中: Y 为 t 时刻沉积层厚度,m; ρ_s 是沉积层平均密度, kg/m^3 ; ρ_m 和 ρ_w 分别为地幔和水层密度, $\text{kg}/$

m^3 ; W_d 为古水深,m,参考龚再升等^[23]和朱伟林等^[24]对沉积相的研究确定; Δ_{SL} 为海平面变化,m,为方便与前人结果对比,这里仍旧采用 Haq 等^[25]的海平面变化曲线。式中 t 时刻的沉积层厚度 Y 是通过移去 t 时刻之后沉积的地层,并对剩余地层进行解压实的结果。解压实中孔隙度随深度变化如下式^[26-27]:

$$\varphi(z) = \varphi_0 \exp(-cz) \quad (2)$$

式中: φ_0 为地表孔隙度; c 为压实系数, km^{-1} ; z 为深度,km。有关参数取值见表 1。

2.2 应变速率和拉张因子

应变速率 $G(t)$ 的计算采用 White 的反演算法^[21,28]。该方法的正演模块部分假定岩石圈以水平速度 $u(x,t)$ 伸展,同时软流圈物质通过 $z=0$ 界面充填因岩石圈伸展产生的空间(图 4)。

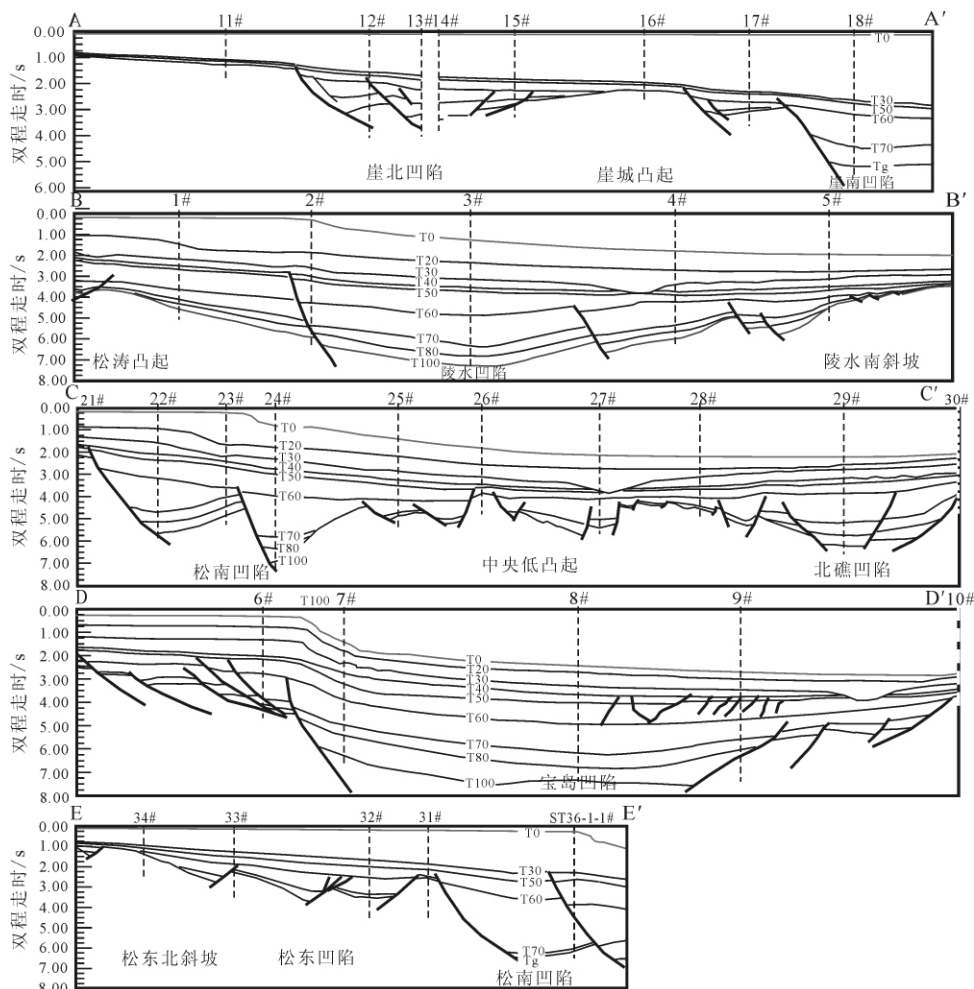


图 2 地震剖面简图及人工井位置

Fig. 2 Simplified seismic sections and the locations of man-made wells

表 1 模型参数值

Table 1 Values of used parameters

参数	物理含义	参数值
a/km	岩石圈初始厚度	125
t_c/km	地壳初始厚度	32
$\rho_w/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	海水密度	1 030
$\rho_c/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	地壳密度(0°C)	2 800
$\rho_m/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	地幔密度(0°C)	3 330
$\rho_n/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	软流圈密度($1\ 333^\circ\text{C}$)	3 185
$\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$	热膨胀系数	3.28×10^{-5}
φ_0	岩层表面孔隙度	0.49(砂岩)
		0.63(泥岩)
		0.70(灰岩)
c/km^{-1}	岩层压实系数	0.27(砂岩)
		0.51(泥岩)
		0.71(灰岩)

在均匀拉张模型中,如果 $G(t)$ 为垂向应变速率 (s^{-1}),则水平应变速率为 $-G(t)$ 。已知 $G(t)$ 时,可根据下式求不同时刻拉张后均衡调整前的节点位置:

$$v(z, t) = (a - z)G(t), \quad (3)$$

$$u(x, t) = xG(t). \quad (4)$$

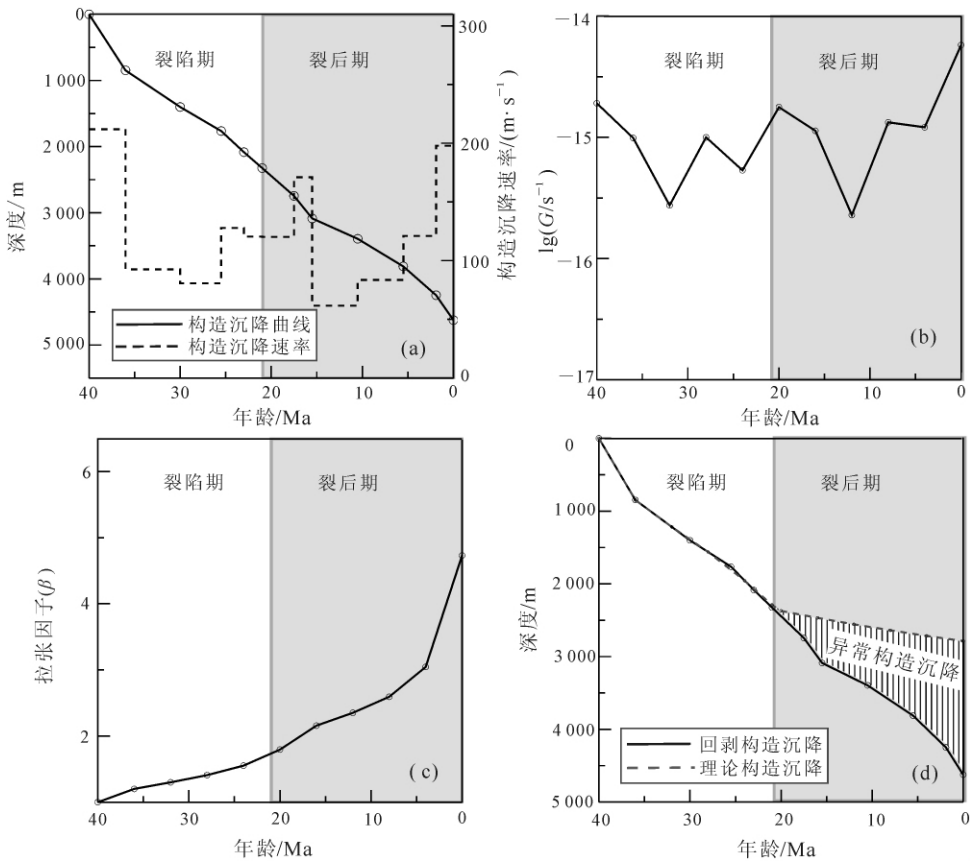
均衡调整需要计算补偿深度以上的负载。计算负载时物质密度与温度的关系为

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha T). \quad (5)$$

式中: ρ_0 为物质在 0°C 时的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; α 为热膨胀系数, $^\circ\text{C}^{-1}$ 。其中温度场 $T(z, t)$ 按热传输方程计算:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + G(a - z) \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (6)$$

式中: κ 为热扩散率, m^2/s ; z 为深度, km 。求解温度场的上下边界条件见图 4, 两侧取绝热边界。



(a) 构造沉降史; (b) 拉张应变速率史; (c) 拉张因子变化史; (d) 裂后异常构造沉降。

图 3 3# 的计算结果

Fig. 3 Calculated results for well 3

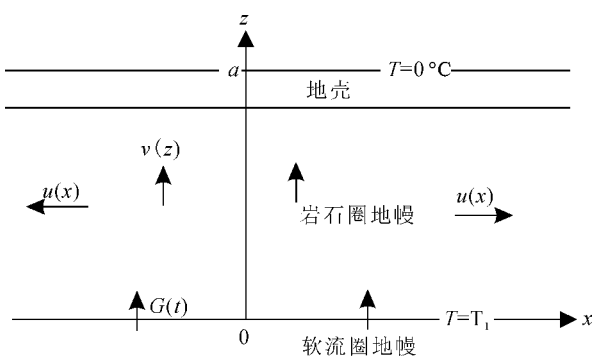


图 4 与时间相关的岩石圈拉伸模型^[21]

Fig. 4 Physical model for time-dependent stretching of the lithosphere

计算单井的拉张应变速率时, 首先假定初始的 $G(t)$, 由公式(3)–(6)计算出各时刻拉张后的负载, 通过艾利均衡调整得到载水基底深度, 即载水构造沉降。如果所得构造沉降曲线与回剥计算的构造沉

降曲线相符, 即认为 $G(t)$ 是所求的应变速率史; 否则, 采用 Powell 算法^[29] 调整 $G(t)$ 重新计算。南海北部陆缘正常裂陷期的 $\log_{10}(G(t)/s^{-1})$ 值一般介于 $-15 \sim -16$ ^[28]。当 $\log_{10}(G(t)/s^{-1})$ 小于 -17 时, 表示拉张非常弱^[21]; 当 $\log_{10}(G(t)/s^{-1})$ 大于 -15 , 表示盆地处于强烈拉张状态。

根据获得的 $G(t)$, 拉张因子演化史 $\beta(t)$ 可以由下式计算:

$$\beta(t) = \exp\left(\int_0^{\Delta t} G(t) dt\right) \quad (7)$$

式中, Δt 是拉张持续时间, s。

2.3 异常构造沉降

如果已知裂陷期结束时间, 根据裂陷期的 $G(t)$, 不仅可以再现由式(1)获得的裂陷期构造沉降史, 而且可以预测由裂陷期 $G(t)$ 产生的裂后理论热沉降史。由式(1)得到的实际裂后构造沉降与理论裂后构造沉降之差即可视为异常的构造沉降史(图 3

(d))。

3 结果分析

由于现有钻孔在盆地内分布不均,为了尽可能多地了解盆地不同构造单元的构造沉降时空分布特征,笔者在 5 条地震剖面(图 2)的斜坡、凹陷中心等不同构造位置选择大量人工井,以弥补钻孔分布的局限。同时,对钻孔中未揭示的地层利用相应的地震剖面补充地层信息。最后共计算了 68 口井(图 1)的构造沉降史(其中钻孔 24 口,人工井 44 口);并选择其中 15 口代表井计算应变速率史和拉张因子变化史,以及这些井的裂后异常构造沉降量随时间的变化(图 5、表 2)。

3.1 构造沉降的时空分布特征

盆地不同区域的构造沉降强度有差异。其中,盆地北部凹陷带(I区)最弱,区内最大构造沉降不足 3 000 m,中央凹陷带构造沉降强度大于北部凹陷带,并且由中部陵水凹陷区向东部宝岛凹陷区有逐渐增大趋势;中央凹陷带西区(II区)内 ya35-1-2 井最大构造沉降大约 4 000 m(乐东凹陷中心因缺少地层厚度信息而未能计算构造沉降,但理论上要大于斜坡位置 ya35-1-2 井的构造沉降);中央凹陷带中区(III区)最大构造沉降 4 500 m 左右;中央凹陷带东区(IV区)最大构造沉降接近 5 000 m(图 5 a)。受资料限制,没能约约束南部凹陷带的构造沉降特征,但是参照乐东凹陷北侧斜坡区 ya35-1-2 井的结果以及张云帆^[30]研究结果,可以推测乐东凹陷和华光凹陷的构造沉降都大于崖北凹陷,甚至可能大于陵水凹陷。吴敬武^[31]对南部凹陷进行了构造恢复,显示凹陷内现今基底可达万米深度,说明其构造沉降量和地壳拉张程度都远大于北部凹陷带,甚至可能大于中央凹陷带西区(II区)。除了有整体的强度分异外,构造沉降在不同阶段也存在强度和速率的空间差异。

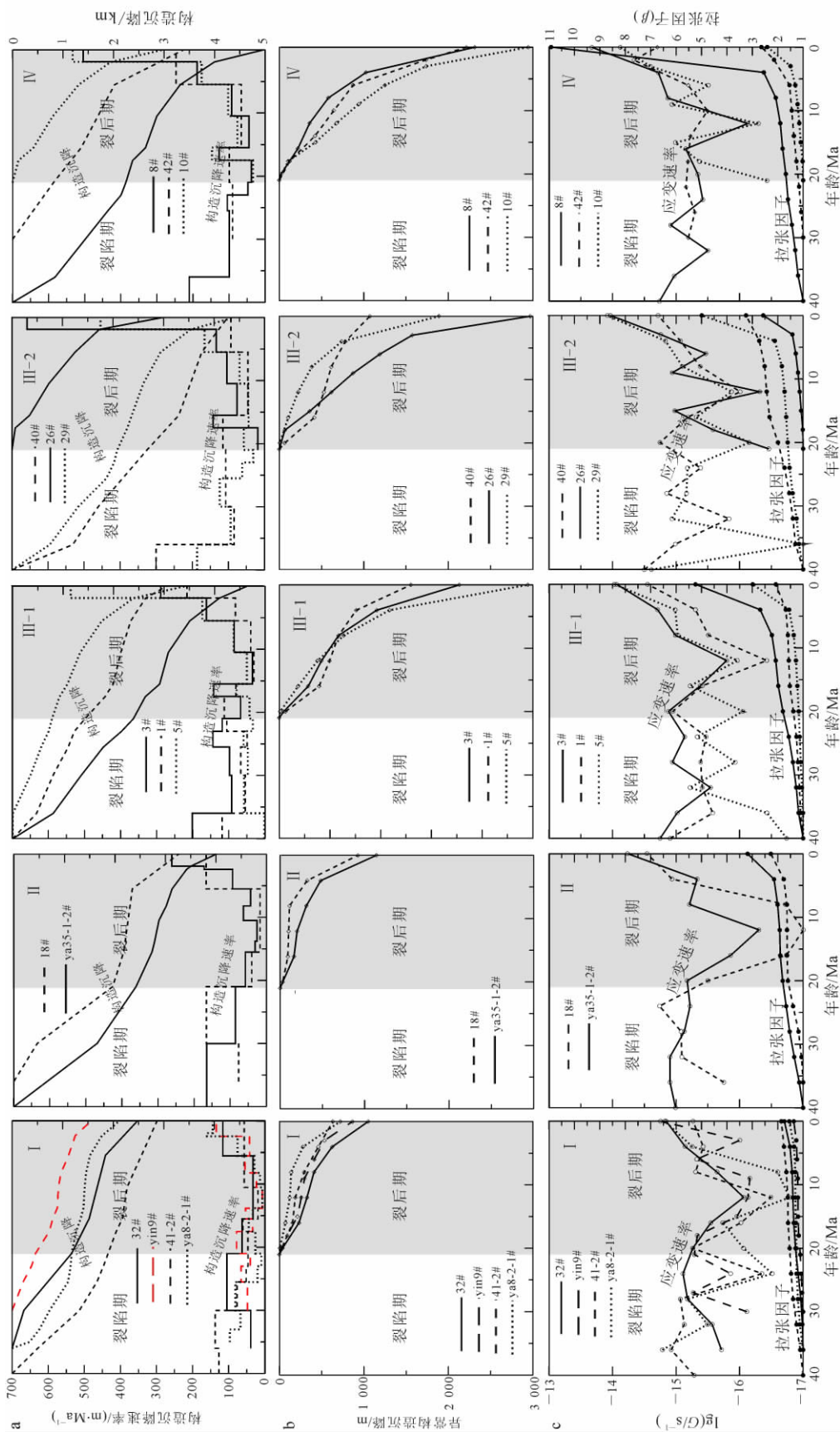
1) 裂陷阶段可细分 3 期(图 5 a):第一期(40~36 Ma),盆地发生局部快速沉降形成了几个主要凹陷区,并且北部凹陷沉降相对较弱,南部和东部凹陷沉降相对较强。北部凹陷带(I区)沉降中心在崖北凹陷,构造沉降速率约 125 m/Ma;中央凹陷带西区(II区)沉降中心在乐东凹陷,构造沉降速率超过 160 m/Ma;中央凹陷带中区(III区)和东区(IV区)在陵水凹陷、北礁凹陷、松南凹陷以及宝岛凹陷等处,构造沉降速率接近甚至超过 200 m/Ma,其中又以

III区松南凹陷的构造沉降速率最大,高达 300 m/Ma。第二期(36~30 Ma),盆地进入平缓沉降期,盆地整体构造沉降速率减缓但沉降区域扩大。北部凹陷带(I区)沉降中心仍然在崖北凹陷,但沉降区域开始向东西两侧延展;中央凹陷带除西区乐东凹陷保持较高的构造沉降速率外,其他凹陷的构造沉降速率普遍减缓至 50~100 m/Ma,同时沉降区域扩大,多处初次显现沉降。第三期(30~21 Ma),盆地出现第二次快速沉降和拉张,相比第一次,本次沉降强度较小,且沉降中心发生转移。北部凹陷带(I区)沉降中心转移到东部松东凹陷(构造沉降速率约 100 m/Ma);中央凹陷带主要在西区(II区)崖南凹陷发生快速构造沉降(构造沉降速率约 160 m/Ma),而中区(III区)和东区(IV区)延续前一期的低速构造沉降。

2) 裂后阶段同样可分 3 期(图 5 a):第一期(21~15.5 Ma),北部凹陷带(I区)和中央凹陷带西区(II区)的构造沉降速率基本都显示比裂陷期下降,低至 60 m/Ma 以下;但是中央凹陷带中区(III区)和东区(IV区)构造沉降速率相比裂陷期下降不明显,甚至个别出现增大,最大构造沉降速率可达 150 m/Ma。第二期(15.5~10.5 Ma),盆地构造沉降速率普遍降低,构造沉降速率为 0~80 m/Ma。本期是裂后沉降阶段构造沉降速率最低的时段,但是空间上中央凹陷带中区(III区)和东区(IV区)相对高于北部凹陷带(I区)和中央凹陷带西区(II区)的构造沉降速率。第三期(10.5 Ma 至今),盆地出现异常加速沉降,尤其 5.5 Ma 以来更明显处于高速沉降。本期平均构造沉降速率,北部凹陷带向中央凹陷带增大,中央凹陷带内西区向东区增大。

3.2 拉张应变速率和拉张因子的时空分布

拉张应变速率是裂陷期盆地伸展速率的反映,拉张因子是裂陷期盆地伸展程度的衡量。琼东南盆地应变速率的对数 $\log_{10}(G(t)/s^{-1})$ 总体变化范围为 -17~-13,其中裂陷期 $\log_{10}(G(t)/s^{-1})$ 主要变化于 -17~-14.5(图 5c),分阶段特征与构造沉降的时空分布特征基本对应:高速构造沉降对应高 $\log_{10}(G(t)/s^{-1})$ 值,最高值大于 -15,属于强烈伸展;低速构造沉降对应低 $\log_{10}(G(t)/s^{-1})$ 值,低至 -17,属于微弱伸展。北部凹陷带(I区)和中央凹陷带西区(II区)代表井的 $\log_{10}(G(t)/s^{-1})$ 在裂后期比较明显地显示出减小趋势,至 15.5~10.5 Ma 达到最低值,随后又开始出现增大趋势;而中央凹陷



a. 构造沉降史与构造沉降速率史; b. 裂后异常构造沉降史; c. 应变速率与拉伸因子变化史。

图 5 代表井构造沉降和拉伸应变特征

Fig. 5 Characteristics of tectonic subsidence and stretching strain about the representative wells

带中区(Ⅲ区)和东区(Ⅳ区)内代表井 $\log_{10}(G(t)/s^{-1})$ 的变化相对复杂,但自 10.5 Ma 以来的增大趋势同样明显。裂后期 $\log_{10}(G(t)/s^{-1})$ 大于 -17,表明该盆地在裂后期并不属于单纯的热沉降阶段,而是发生了异常构造沉降。

根据(7)式计算的盆地拉张因子 β 在裂后期连续增大,特别是晚中新世以后大幅度增大(图 5c),而并非常规张裂模型在热沉降阶段应有的迅速收敛,这也直观说明盆地在裂后期存在明显的异常构造沉降。根据 β 值异常增大特征的空间分布,盆地在北部凹陷带(Ⅰ区)的异常沉降最小,中央凹陷带西区(Ⅱ区)有所增大,中央凹陷带中区(Ⅲ区)和东区(Ⅳ区)最大。

拉张因子在裂后期强烈增加是一种假象,表面看来是盆地发生了新的拉张事件,实际上是盆地在裂后期出现了大幅的构造沉降,而拉张应变速率和拉张因子的计算程序将盆地在裂后期的迅速沉降作为拉张事件处理而得到的拉张假象;因此,在利用拉张应变速率和拉张因子衡量盆地伸展特征时只需观察拉张应变速率和拉张因子在裂陷期的变化曲线。

3.3 裂后期异常构造沉降特征

异常构造沉降从进入裂后期之初就开始显现,并随时间逐渐增大。从图 5b 可以看出,异常沉降量的增长过程经过快—慢—快 3 个阶段:在裂后阶段早期(21~15.5 Ma)异常构造沉降从无到有,快速增加;到 15.5~10.5 Ma 期间异常沉降持续增加,但增速减缓;10.5~5.5 Ma 至今又出现了快速增大。总的异常构造沉降量在空间上具有从北部凹陷带向中央凹陷带增大、中央凹陷带内从西部向东部增大的趋势,并且与莫霍面的抬升趋势基本一致(表 2)。

4 讨论

上述计算结果表明:琼东南盆地裂后构造沉降普遍存在快—缓—快 3 个阶段变化特征,并且在裂后期初始阶段的回剥构造沉降明显大于依据均匀拉张模型预测的理论裂后沉降,表明琼东南盆地裂陷期并非是均匀拉张的,而可能是经历了与深度有关的非均匀拉张^[7,32];而且岩石圈地幔(可能包括部分下地壳)具有比上部地壳更大的拉张因子。如果下地壳与岩石圈地幔拉张程度确实高于上地壳,那么

表 2 代表井构造特征比较

Table 2 Characters of the representative wells

代表井	现今水深/ m	现今基底深 度/km	莫霍面深度/ km*	现今地壳厚 度/km	总构造沉降 量/m	总异常沉降 量/m	裂陷期 结束时 β	β_0	
Ⅰ区	ya8-2-1	82	4.1	27.5	23.4	2 126	719	1.26	1.37
	41-2#	60	6.9	28.0	21.1	2 867	633	1.50	1.52
	yin9	109	2.7	27.0	24.3	1 567	864	1.10	1.32
	32#	165	5.2	25.0	19.8	2 484	1 050	1.29	1.62
Ⅱ区	18#	98	8.3	25.0	16.7	3 261	922	1.59	1.92
	ya35-1-2	161	11.4	22.0	10.6	4 004	1 140	1.80	3.02
Ⅲ区	1#	150	7.2	24.0	16.8	3 043	1 300	1.38	1.90
	3#	956	11.1	22.5	11.4	4 641	1 780	1.79	2.81
	5#	1 500	5.3	24.0	18.7	3 414	2 450	1.17	1.71
	40#	188	12.1	24.5	12.4	4 269	1 070	1.99	2.58
	26#	1 406	4.4	24.0	19.6	2 980	2 970	1.00	1.63
	29#	1 695	8.0	24.0	16.0	4 403	1 890	1.60	2.00
Ⅳ区	8#	1 808	9.8	23.5	13.7	4 956	2 315	1.68	2.34
	42#	1 905	4.8	22.0	17.2	3 377	2 215	1.16	1.86
	10#	2 033	3.5	20.0	16.5	2 957	2 950	1.00	1.94

注: * 王万银, 党伟. 中国及其临近海域重磁资料处理报告. 西安: 西安工程学院, 2000; β_0 = 初始地壳厚度/现今地壳厚度。

裂陷期因软流圈高温物质抬升,导致构造沉降量减小。这样,根据均匀模型估计的裂陷期拉张应变速率和拉张因子将会低估地壳实际的张裂程度,从而低估裂后的热沉降量,而表现出裂后早期构造沉降的异常特征。佟殿君等^[7]所提差异拉张情况下上地壳和岩石圈的挠曲均衡也是造成裂后早期异常沉降的一个可能原因。笔者的计算结果还表明:裂后早期的异常沉降量(图5b)在盆地中央凹陷带中东部区域(Ⅲ区和Ⅳ区)大于盆地北部凹陷带(Ⅰ区)和中央凹陷带的西部(Ⅱ区),可能表明盆地中东部比西部的差异拉张程度更高。

不管是均匀拉张模型还是非均匀拉张模型,它们预测的裂后沉降随时间变化都表现为先快后缓的特征,而无法预测琼东南盆地自晚中新世以来的快速构造沉降现象。笔者计算结果表明,这些代表井的裂后构造沉降与异常构造沉降经历了中中新世(15.5~10.5 Ma)增长变缓期后,从晚中新世(10.5 Ma)开始出现加速增长,尤其5.5 Ma以来更加明显(图5a, b)。前人研究表明,裂后期琼东南盆地具有拗陷充填特征,断裂活动明显减弱。虽然坡折带存在小型断层^[33],但是数值模拟表明,这种小型断层可以在热沉降引起的基底差异沉降过程中发育^[34];因此,这种大幅度的晚中新世以来的异常构造沉降并非是大规模拉张事件的结果。前人^[3-4]曾提出琼东南盆地晚中新世以来的加速沉降具有从西往东变弱的趋势,并将这种加速沉降与西侧边界①号断裂右旋走滑活动联系起来。笔者的计算结果则显示该阶段中央凹陷带中部和东部也存在大幅度的异常构造沉降,并且往东部有增大的趋势,这与Xie等^[5]揭示的琼东南盆地东部也具有明显的异常构造沉降相符。盆地西部①号断裂的右旋走滑活动可能确实影响了盆地西部的异常快速构造沉降,但是难以解释琼东南盆地中东部的大幅异常沉降。动力地貌^[5]理论上是引起裂后异常构造沉降现象的可能机制,但是,动力地貌模型计算时涉及许多不确定的参数,预测的异常沉降量还存在争议^[5-6,35],而且这种机制因源区埋藏深而影响的范围(波长)往往比较大。而位于琼东南盆地北部的北部湾盆地裂后异常构造沉降量较小^[5],琼东南盆地内部北部凹陷带异常沉降量较小,但与北部凹陷带紧邻的中央凹陷带裂后异常沉降量明显增大(图5b),这种近距离的异常沉降明显差异仅靠动力地貌机制难以解释。

琼东南盆地晚中新世以来的快速构造沉降可能

还有其他影响因素。笔者的计算结果显示:晚中新世以来的异常构造沉降具有往东部增强的趋势,这种趋势与该区莫霍面往东方向的抬升一致。前人^[19,36]研究发现,琼东南盆地晚中新世以来存在幔源岩浆喷发广泛的特征,位于琼东南盆地西部的y32-1-1井钻遇厚达115 m的拉斑玄武岩。广州海洋地质调查局的反射地震资料显示西沙海槽存在大面积岩体侵入^①。姚伯初等^[16]也指出琼东南东部和西沙海槽存在走向与海槽一致的高磁异常带,经计算后认为该高异常带是侵入地壳下部的基性、超基性物质,经冷却并受反向磁化的结果。Wissmann等^[37]用重力异常模型与岩石圈深度模型拟合,推测西沙海槽下存在岩浆“海山”,即地幔物质向上侵入,形成海山状的侵入体。这些资料表明,琼东南盆地—西沙海槽存在广泛的基性岩体侵入和喷发活动。如果晚中新世以后,研究区确实存在大规模的基性、超基性岩浆活动,这些岩浆活动不仅可以带走深部热量,而导致深部物质的加速冷却、变重,而且数值模拟^[38]也表明这些高温、高密度物质侵入到低密度的地壳与沉积层中将会迅速冷却,从而大大增加浅层的密度。深部与浅部物质密度的增加无疑可以快速增大构造沉降量,因此,推测在琼东南盆地特别是在盆地中、东部,晚中新世以来的快速构造沉降可能与岩浆活动有关。至于岩浆活动的强度与异常沉降之间的定量关系还有待进一步的研究。

5 结论

1) 琼东南盆地总的构造沉降空间上表现为中央凹陷带和南部凹陷带强于北部凹陷带;时间上在裂陷期出现局部快速沉降—整体平缓沉降—局部快速沉降3个阶段特征,进入裂后期构造沉降速率逐渐降低,并在15.5~10.5 Ma降至裂后阶段的最低值,但自10.5~5.5 Ma以来又明显增大。

2) 裂后期异常构造沉降在盆地东西部都有明显表现,并且在北部凹陷带较小,在中央凹陷带内自西区往东区有逐渐增大趋势;时间上裂后期异常构造沉降量随时间增大,并且增长过程表现出快—慢—快的阶段性。

3) 裂后阶段早期显示的快速异常沉降可能是裂陷期非均匀拉张的结果,而晚中新世以来的快速构

① 广州市海洋地质调查局近海调查队. 西沙海槽新生代沉积特征调查. 广州:广州市海洋地质调查局南岗基地,2005.

造沉降主要与岩浆活动有关。

参考文献(References):

- [1] 陈红汉,孙永传,叶加仁,等.莺琼盆地的独特埋藏史[J].中国海上油气:地质,1994,8(5):329-336.
Chen Hong-han, Sun Yong-chuan, Ye Jia-ren, et al. Unique Burial History of Ying-Qiong Basin[J]. China Offshore Oil and Gas:Geology,1994, 8(5): 329-336.
- [2] 张启明.莺—琼盆地的演化与构造-热体制[J].天然气工业,1999,19(1):12-18.
Zhang Qi-ming. Evolution of Ying-Qiong Basin and Its Tectonic-Thermal System[J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(1): 12-18.
- [3] 孙珍,钟志洪,周蒂.莺歌海盆地构造演化与强烈沉降机制的分析和模拟[J].地球科学:中国地质大学学报,2007,32(3):347-356.
Sun Zhen, Zhong Zhi-hong, Zhou Di. The Analysis and Analogue Modeling of the Tectonic Evolution and Strong Subsidence in the Yinggehai Basin[J]. Earth Science:Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(3): 347-356.
- [4] 袁玉松,杨树春,胡圣标,等.琼东南盆地构造沉降史及其主控因素[J].地球物理学报,2008,51(2):376-383.
Yuan Yu-song, Yang Shu-chun, Hu Sheng-biao, et al. Tectonic Subsidence of Qiongdongnan Basin and Its Main Control Factors [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51 (2): 376-383.
- [5] 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]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23: 745-765.
- [6] 崔涛,解习农,任建业,等.莺歌海盆地异常裂后沉降的动力学机制[J].地球科学:中国地质大学学报,2008,33(3):349-356.
Cui Tao, Xie Xi-nong, Ren Jian-ye, et al. Dynamic Mechanism of Anomalous Post-rift Subsidence in the Yinggehai Basin[J]. Earth Science:Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(3): 349-356.
- [7] 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期沉降的控制[J].地球科学:中国地质大学学报,2009,34(6):963-974.
Tong Dian-jun, Ren Jian-ye, 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]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(6): 963-974.
- [8] Rangin C, Klein M, Roques D, et al. The Red River Fault System in the Tonkin Gulf, Vietnam [J]. Tectonophysics, 1995, 243: 209-222.
- [9] 钟志洪,王良书,李绪宣,等.琼东南盆地古近纪沉积充填演化及其区域构造意义[J].海洋地质与第四纪地质,2004,24(1):29-36.
Zhong Zhi-hong, Wang Liang-shu, Li Xu-xuan, et al. The Paleogene Basin-Filling Evolution of Qiongdongnan Basin and Its Relation with Seafloor Spreading of the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(1): 29-36.
- [10] 谢文彦,张一伟,孙珍,等.琼东南盆地断裂构造特征与成因机制分析[J].海洋地质与第四纪地质,2007,27(1):71-78.
Xie Wen-yan, Zhang Yi-wei, Sun Zhen, et al. Characteristics and Formation Mechanism of Faults in Qiongdongnan Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(1): 71-78.
- [11] 李绪宣,朱光辉.琼东南盆地断裂系统及其油气输导特征[J].中国海上油气,2005,17(1):1-7.
Li Xu-xuan, Zhu Guang-hui. The Fault System and Its Hydrocarbon Earrier Significance in Qiongdongnan Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2005, 17(1): 1-7.
- [12] 姚伯初,曾维军,陈艺中,等.南海北部陆缘东部的地壳结构[J].地球物理学报,1994,37(1):27-35.
Yao Bo-chu, Zeng Wei-jun, Chen Yi-zhong, et al. The crustal Structure in the Eastern Part of the Northern Margin of the South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(1): 27-35.
- [13] 殷秀兰,李思田,马寅生,等.莺歌海盆地晚第三纪构造特征的三维泥料模拟实验及其动力学意义[J].地质论评,2001,47(5):535-541.
Yin Xiu-lan, Li Si-tian, Ma Yin-sheng, et al. Three-Dimensional Tectonic Modeling of the Yinggehai Basin in the Late Tertiary and Its Geodynamic Significance[J]. Geological Review, 2001, 47(5): 535-541.
- [14] 周小鹰,魏魁生. QDN 盆地层序地层及生储盖组合分析[J].石油与天然气地质,2000,21(3):244-248.
Zhou Xiao-ying, Wei Kui-sheng. Sequence Stratigraphy and Source Reservoir Cap Rock Assemblage of QDN Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 244-248.
- [15] 魏魁生,崔早云,叶淑芬,等.琼东南盆地高精度层序地层学研究[J].地球科学:中国地质大学学报,2001,

- 26(1):59-66.
- Wei Kui-sheng, Cui Han-yun, Ye Shu-fen, et al. High-Precision Sequence Stratigraphy in Qiongdongnan Basin [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(1): 59-66.
- [16] 姚伯初,曾维军,陈艺中,等.南海西沙海槽:一条古缝合线[J].海洋地质与第四纪地质,1994,14(1):1-10.
- Yao Bo-chu, Zeng Wei-jun, Chen Yi-zhong, et al. Xisha Trough of South China Sea: An Ancient Suture [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1994, 14(1): 1-10.
- [17] Nissen S S, Hayes D E, Buhl P, et al. Deep Penetration Seismic Soundings Across the Northern Margin of the South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100 (B11): 22407-22433.
- [18] Qiu Xue-lin, Ye San-yu, Wu Shi-min, et al. Crustal Structure Across the Xisha Trough, Northwestern South China Sea [J]. Tectonophysics, 2001, 341: 179-193.
- [19] 李思田,林畅松,张启明,等.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[J].科学通报,1998,43(8):797-810.
- Li Si-tian, Lin Chang-song, Zhang Qi-ming, et al. Episodic Rifting Dynamics of Marginal Basins North of South China Sea and Tectonic Accidents Since 10 Ma [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43 (8): 797-810.
- [20] 许惠平,刘万崧,周云轩,等.卫星测高重力资料及其在南海莺—琼盆地中的应用[J].吉林大学学报:地球科学版,2003,33(3):368-371.
- Xu Hui-ping, Liu Wan-song, Zhou Yun-xuan, et al. Altimetry Gravity and Its Applications in South China Sea [J]. Journal of Jilin University : Earth Science Edition, 2003, 33(3): 368-371.
- [21] White N. An Inverse Method for Determining Lithospheric Strain Rate Variation on Geological Timescales [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 122: 351-371.
- [22] Steckler M S, Watts A B. Subsidence of the Atlantic-Type Continental Margin off New York [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 41: 1-13.
- [23] 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,1997:1-178.
- Gong Zai-sheng, Li Si-tian, Xie Tai-jun, et al. Continental Margin Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Northern South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1997: 1-178.
- [24] 朱伟林,张功成,杨少坤,等.南海北部大陆边缘盆地天然气地质[M].北京:石油工业出版社,2007:43-59.
- Zhu Wei-lin, Zhang Gong-cheng, Yang Shao-kun, et al. The Natural Gas Geology in Continental Margin Basin of the Northern South China Sea [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 43-59.
- [25] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of Fluctuating Sea Levels Since the Triassic [J]. Science, 1987, 235: 1156-1167.
- [26] Athy L F. Density, Porosity and Compaction of Sedimentary Rocks [J]. AAPG Bulletin, 1930, 14: 1-24.
- [27] Sclater J G, Christie P A F. Continental Stretching: An Explanation of the Post Mid-Cretaceous Subsidence of the Central North Sea Basin [J]. Journal of Geophysical Research, 1980, 85: 3711-3739.
- [28] 施小斌,丘学林.珠江口盆地北部坳陷带新生代以来的拉张应变速率史[C]//中国地球物理学会第 22 届年会论文集.北京:中国地球物理学会,2006:325.
- Shi Xiao-bin, Qiu Xue-lin. The History of Stretching Strain Rate Since Cenozoic at the North Depressions in Zhujiangkou Basin [C]//Dissertations Abstract of the 22nd CGS Annual Meeting, China. Beijing: CGS, 2006: 325.
- [29] Powell M. An Efficient Method for Finding Minimum of Function of Several Variables Without Calculating Derivatives [J]. Computer, 1964, 1(7): 155-162.
- [30] 张云帆,孙珍,郭兴伟,等.琼东南盆地新生代沉降特征[J].热带海洋学报,2008,27(5):31-38.
- Zhang Yun-fan, Sun Zhen, Guo Xing-wei, et al. Tectonic Subsidence Characteristics of Qiongdongnan Basin in Cenozoic [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, 27(5): 31-38.
- [31] 吴敬武.琼东南盆地南部凹陷构造特征及形成机制[D].杭州:浙江大学,2008.
- Wu Jing-wu. Structural Characteristics and Formative Mechanism of Southern Sag, Qiongdongnan Basin [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

- Physics [M]. Wuhan: Huazhong Technology University Press, 2003:151-162.
- [15] Chen M, Bai M. Modeling Stress-Dependent Permeability for Anisotropic Fractured Porous Rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35 (8):1113-1119.
- [16] 季宗镇,戴俊生,汪必峰.地应力与构造裂缝参数间的定量关系[J].石油学报,2010,31(1):68-72.
Ji Zong-zhen, Dai Jun-sheng, Wang Bi-feng. Quantitative Relationship Between Crustal Stress and Parameters of Tectonic Fracture [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1):68-72.
- [17] 李亚辉.高邮凹陷北斜坡辉绿岩与油气成藏[J].地质力学学报,2000,6(2):17-22.
Li Ya-hui. Diabase and Hydrocarbon Reservoir Formation on the Northern Slope of Gaoyou Sag[J]. Journal of Geomechanics, 2000, 6(2):17-22.
- [18] 王仁民,游振东,富公勤,等.变质岩石学[M].北京:地质出版社,1989:63-78.
Wang Ren-min, You Zhen-dong, Fu Gong-qin, et al. Metamorphic Petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989:63-78.
- [19] Rikitake T. Studies of the Thermal State of the Earth: Part 2: Heat Flow Associated With Magma Intrusion[J]. Bull Earth Inst Tokyo, 1959, 37 (2): 1584-1596.

(上接 57 页)

- [32] Royden L, Keen C E. Rifting Process and Thermal Evolution of the Continental Margin of Eastern Canada Determined from Subsidence Curves [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 51: 343-361.
- [33] Xie X N, Müller R D, Ren J, et al. Stratigraphic Architecture and Evolution of the Continental Slope System in Offshore Hainan, Northern South China Sea[J]. Marine Geology, 2008, 247: 129-144.
- [34] Shi Xiao-bin, Xu He-hua, Qiu Xue-lin, et al. Numerical Modeling on the Relationship Between Thermal Uplift and Subsequent Rapid Subsidence: Discussions on the Evolution of the Tainan Basin[J]. Tectonics, 2008, 27, TC6003, doi: 10. 1029/2007TC002163.
- [35] Wheeler P, White N. Measuring Dynamic Topography: An Analysis of Southeast Asia [J]. Tectonics, 2002, 21 (5), 1040, doi: 10. 1029/2001TC900023.
- [36] Wang T K, Chen M K, Lee C S, et al. Seismic Imaging of the Transitional Crust Across the Northeastern Margin of the South China Sea [J]. Tectonophysics, 2006, 412: 237-254.
- [37] Wissmann G, Kudrass H, Hinz K. Continuing Rifting on the South China Margin, Results of Cooperation by State Geoscience Institutes BGR/Hannover and SOA/Hangzhou in SONNE Cruises 49 and 58 [J]. Geowissenschaften, 1996, 14(7/8): 310-312.
- [38] 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.