

doi:10.3799/dqkx.2011.100

# 南沙海域构造沉降特征

张云帆<sup>1</sup>, 廖杰<sup>2</sup>, 孙珍<sup>1</sup>, 李付成<sup>1</sup>, 夏斌<sup>3</sup>

1. 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广东广州 510301

2. 瑞士联邦理工学院, 瑞士苏黎世州 8092

3. 中山大学海洋学院, 广东广州 510275

**摘要:** 南海在新生代期间发生多次裂解和离散, 在南海南部陆缘地层中留下了多次构造运动的痕迹. 选取南沙海域内覆盖曾母、北康、南薇西、万安盆地的24个模拟井位, 分别进行构造沉降速率的计算, 并分析了自中生代末期以来的4次重要构造运动对南沙海域盆地的形成和构造演化的控制作用. 结果显示, 南沙海域构造沉降分为3幕: 第一幕为40.5~30.0 Ma, 在西卫运动的影响下, 南沙海域盆地进入断陷阶段, 发生大规模的沉降作用, 构造沉降速率最大达到了160 m/Ma; 第二幕为30.0~10.2 Ma, 随着南海的张开, 区内盆地相继发生热沉降作用, 进入拗陷期, 由于古南海与婆罗洲的碰撞, 区内盆地地层发生整体抬升, 构造沉降速率达到最小值20~50 m/Ma; 第三幕为10.2~0 Ma, 晚中新世由于南沙运动影响, 研究区内盆地发生了一次大规模的快速沉降作用, 随着南沙地区一起进入区域沉降阶段.

**关键词:** 南沙海域; 构造; 回剥反演; 沉降速率; 海洋地质.

**中图分类号:** P736.1

**文章编号:** 1000-2383(2011)05-0949-07

**收稿日期:** 2011-04-30

## Characteristics of Tectonic Subsidence of Nansha Area

ZHANG Yun-fan<sup>1</sup>, LIAO Jie<sup>2</sup>, SUN Zhen<sup>1</sup>, LI Fu-cheng<sup>1</sup>, XIA Bin<sup>3</sup>

1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China

2. Swiss Fed Inst Tech, Zurich 8092, Switzerland

3. School of Marine Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

**Abstract:** Tectonic subsidence histories of Zengmu basin, Beikang basin, Nanweixi basin and Wan'an basin in Nansha area are analyzed with back-stripping technique. 1D tectonic subsidence histories of 24 presumed wells are calculated. The results show that Nansha area experienced 3 main subsiding stages in Cenozoic: (1) Nansha area experienced rifting stage in 40.5–30.0 Ma with a wide range of subsidence. In the first subsiding stage, the max tectonic subsidence rate is 160 m/Ma, which was supposed to be controlled by Xiwei movement. (2) In the second stage (30.0–10.2 Ma), Nansha area ended rifting stage and shifted to depression stage in connection with collision between ancient South China Sea and Borneo. The max tectonic subsidence rate decreased to 20–50 m/Ma. (3) For the third stage (10.2–0 Ma), the regional basins experienced a stage of accelerated subsidence in connection with Nansha movement since Late Miocene. Nansha area experienced regional subsiding stage.

**Key words:** Nansha area; tectonics; back-stripping technique; subsidence rate; marine geology.

南沙海区位于中国南海的南部, 总面积约82万 km<sup>2</sup>, 该区油气资源丰富, 是我国重要的油气后备接替区. 早在20世纪70年代, 我国就投入力量进行南沙的区域地质研究. 1987年开始进行地质—地球物理综合调查, 在南沙海区采集了十余万公里的地震资料, 做了大量的地质研究工作(金庆焕和李

唐根, 2000). 但由于资料和技术手段等的限制, 该区盆地分析的定量研究较为薄弱. 本文综合钻井、地震资料, 运用数值模拟技术, 定量地、动态地分析南沙海区构造沉降史, 这不仅对该区沉积物的充填具有重要的控制作用, 而且对盆地热流的演化具有重大影响.

**基金项目:** 中国科学院知识创新工程重要方向项目群项目(No. KZCX2-YW-Q05-04); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No. 2007CB41170405); 国家科技重大专项(No. 2008ZX05025-005).

**作者简介:** 张云帆(1983—), 女, 博士, 从事盆地分析及物理模拟的研究. E-mail: geoyf@yahoo.com.cn



$$\varphi(z) = \varphi_0 \exp(-cz), \quad (1)$$

式中,  $\varphi(z)$  为深度  $z$  处岩石的孔隙度;  $\varphi_0$  为初始沉积时岩石的孔隙度;  $c$  为压实系数.  $\varphi_0$  和  $c$  与岩性有关. 砂岩、泥岩等单一岩性的表面孔隙度已有较成熟的定量, 混合的岩性可按比例通过加权近似求出.

假设  $Y_1$  和  $Y_2$  为某一深度的岩层的顶底界面, 当把岩层回剥到  $Y_1^1$  和  $Y_2^1$  的高度时, 沉积物部分不变, 只有孔隙中的水随之发生变化, 因此在回剥的位置上岩层的厚度为:

$$Y_2^1 - Y_1^1 = Y_2 - Y_1 + \varphi_0 \frac{e^{-cY_2} - e^{-cY_1}}{c} + \varphi_0 \frac{e^{-cY_1^1} - e^{-cY_2^1}}{c}. \quad (2)$$

采用数值迭代法计算, 即可求出不同地质时期的地层古厚度或古埋深.

### 2.2 沉积物和水的负载沉降

从艾利地壳均衡模型可看出, 任何垂向负荷柱都可在局部得到补偿. 地壳的均衡补偿作用就是当沉积盆地空间被沉积物充填时, 沉积物本身的重量使基底进一步下沉, 形成被动增加的沉降, 即沉积物的负载沉降. 南沙海域位于陆架陆坡过渡区, 岩石圈有效弹性厚度小, 接近局部均衡. 利用上述的孔隙度与深度的关系, 可以恢复不同地质时期各地层的顶、底界深度, 最老地层的深度即为基底总沉降量  $S_t$ . 假设局部均衡, 构造沉降量  $S_{tt}$  可表示为:

$$S_{tt} = S_t \frac{\rho_s - \rho_m}{\rho_w - \rho_m}, \quad (3)$$

式中,  $\rho_s$  是某一时刻沉积层的平均密度;  $\rho_m$  和  $\rho_w$  分别为地幔和地层水的密度. 根据以上公式, 可以求得每一时刻的地层埋藏深度和沉降量.

### 2.3 古水深校正

当沉积盆地的古水深较大时, 需通过古水深校正得出正确的构造沉降量. 沉积物沉积时, 其沉积界面在水下一定深度, 所以沉积物厚度不能代表沉降深度. 古水深资料  $W_d$  加上沉积物厚度, 可以直接得到真正的深度. 因此构造沉降可表达为:

$$S_{tt} = S_t \frac{\rho_s - \rho_m}{\rho_w - \rho_m} + W_d. \quad (4)$$

## 3 方法步骤及选取参数

本文选取研究区内覆盖了曾母盆地、北康盆地、南薇西盆地和万安盆地的 24 个模拟井位, 共识别了新生代  $T_g$ 、 $T_{70}$ 、 $T_{60}$ 、 $T_{40}$ 、 $T_{32}$ 、 $T_{30}$  和海底 7 个区域反射界面, 依据这 7 个界面划分层序, 参照中海油提供的时间—速度曲线对剖面进行时深转换, 从所得的深度剖面中选取模拟井位, 运用 Fortran 程序进行构造沉降史的分析研究.

沉降速率计算中用到的重要参数是地层的孔隙度、沉积物颗粒密度以及压实系数. 本文根据文献识别了南沙地区每套地层的岩性, 并计算出南沙地区的地层参数(表 1).

一维沉降速率计算过程中, 古水深是一个重要参数. 南沙海域从始新世到第四纪经历了几次大的沉积旋回变化, 总体反映了海侵和海域扩大的过程. 始新世到渐新世主要为河湖相沉积, 渐新世至今其沉积环境逐渐演变为滨浅海至半深海, 因此本文取  $T_g - T_{70}$  古水深为 0,  $T_{70}$  至海底古水深由 0 线性增加至现今深度.

## 4 南沙海域沉降史分析

笔者选取研究区内 4 个盆地内 24 口模拟井位计算一维构造沉降速率, 从中找出沉降中心的迁移规律, 并计算出每个盆地的平均构造沉降速率, 将研究区内几个盆地进行对比, 分析构造演化对沉降的影响.

### 4.1 曾母盆地

曾母盆地位于南海聚敛边缘, 对南海南部陆缘的沉降起重要的控制作用. 曾母盆地内构造沉降速率最大值出现在 37~30 Ma, 有由南向北逐渐增大

表 1 南沙地区的地层及岩性

Table 1 Proportion of mudstone and sandstone of Nansha area

地震反射层	年代(Ma)	主要岩性	颗粒密度( $g \cdot cm^{-3}$ )	地表孔隙度(%)	压实递减系数( $km^{-1}$ )
海底— $T_{30}$	0~5.3	砂泥岩	2.69	57.4	0.41
$T_{30}$ — $T_{32}$	5.3~10.2	碎屑岩(含部分灰岩)	2.67	53.2	0.35
$T_{32}$ — $T_{40}$	10.2~16.0	碎屑岩(含部分灰岩)	2.67	53.2	0.35
$T_{40}$ — $T_{60}$	16.0~23.8	砂页岩(夹煤层)	2.69	57.1	0.41
$T_{60}$ — $T_{70}$	23.8~30.0	砂页岩(夹灰岩、砾岩)	2.69	58.1	0.43
$T_{70}$ — $T_g$	30~37(万安为 30.0~40.5)	砂页岩(夹灰岩、砾岩)	2.69	58.1	0.43

的趋势,位于北部的 5# 模拟井达到了 200 m/Ma (图 3e). 渐新世期间曾母盆地呈稳定沉降趋势,沉降速率为 50~90 m/Ma,中新世沉降速率逐渐减小,各模拟井位均在 16 Ma 达到最低值. 上新世以来沉降再次加速,位于北部的 4 口模拟井位沉降速率达 120 m/Ma. 控制曾母盆地南缘和南沙海槽的构造带在上新世也表现出强烈的活动性(吴能友等, 2003). 曾母盆地的沉降中心一直位于盆地的北部,其沉降中心并非在碰撞带附近,而是远离碰撞带,故曾母盆地属走滑一周缘前陆盆地,这也印证了前人(钟广建等, 1995)对曾母盆地的定义.

#### 4.2 北康盆地

与曾母盆地相比,北康盆地的沉降速率无论早期还是后期都有明显增高,且盆地的沉降中心一直位于盆地的中部. 始新世到早渐新世,北康盆地北部 7#、8# 和 9# 这 3 个模拟井沉降速率平均为 130 m/Ma(图 4b~4d),而盆地中部的 6# 模拟井沉降速率在 160 m/Ma 左右(图 4a). 进入渐新世,盆地进入热沉降的时间晚于南海海盆的张开,各模拟井沉降速率的最低值都出现在 16.5 Ma. 上新世以来在南沙区域性沉降的背景下,沉降速率逐渐升高.

#### 4.3 南薇西盆地

南薇西盆地的沉降特点是早期快速沉降,渐新世以后有由南向北沉降速率逐渐增大的趋势. 在 37~30 Ma,位于盆地北部的 10#、11# 模拟井的沉

降速率都达到了 160 m/Ma(图 5a,5b),而位于盆地南部 13#、14# 模拟井这一时期的沉降速率达到了 180 m/Ma 左右(图 5d,5e),明显高于其他时期. 推测始新世到早渐新世,南薇西盆地的沉降中心都位于盆地的中心. 渐新世中期盆地的沉降速率逐渐降低,北部的 3 口井均大于南部的 4 口井. 到了上新世以后沉降速率逐渐增加,位于盆地中部的 12# 模拟井沉降速率达到 160 m/Ma 以上(图 5c),可见南薇西盆地的沉降中心从渐新世中期到上新世迁移至盆地的北部.

#### 4.4 万安盆地

选取 8 个模拟井位覆盖万安盆地(图 6),万安盆地的沉降特征是早期的沉降速率大于后期沉降速率,在 40.5~30.0 Ma 各模拟井位都出现最大值,大部分在 160 m/Ma 以上,沉降中心位于盆地的中心. 该时期由于万安走滑断裂发生右旋活动,在该断裂西侧派生的一系列拉张应力作用下,万安盆地第一次快速沉降. 此时期构造沉降速率明显大于其他各时期,说明 40.5~30.0 Ma 为万安盆地的张裂期,沉降幅度大. 30.0 Ma 以后进入裂后期,以热沉降为主,构造沉降速率明显减小,热沉降期间盆地局部派生出挤压应力场致使盆地局部发生抬升褶皱. 渐新世以来万安盆地呈稳定沉降之势,构造沉降速率在 40 m/Ma 上下浮动. 上新世以来,万安盆地的沉降速率又开始增加. 5 Ma 以后,构造沉降速率有

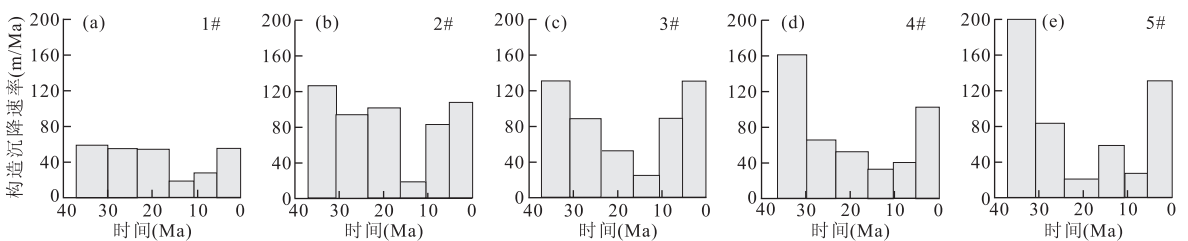


图 3 曾母盆地构造沉降速率

Fig. 3 Tectonic subsidence rate of Zengmu basin

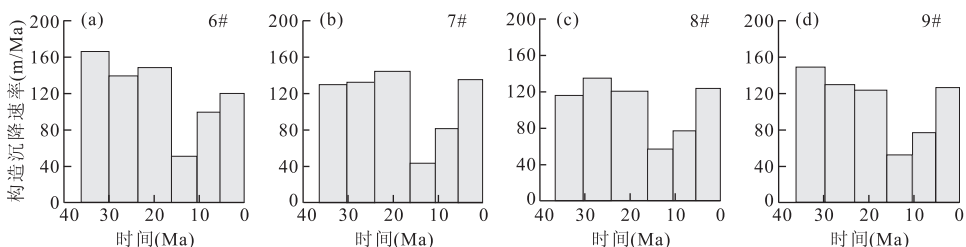


图 4 北康盆地构造沉降速率

Fig. 4 Tectonic subsidence rate of Beikang basin

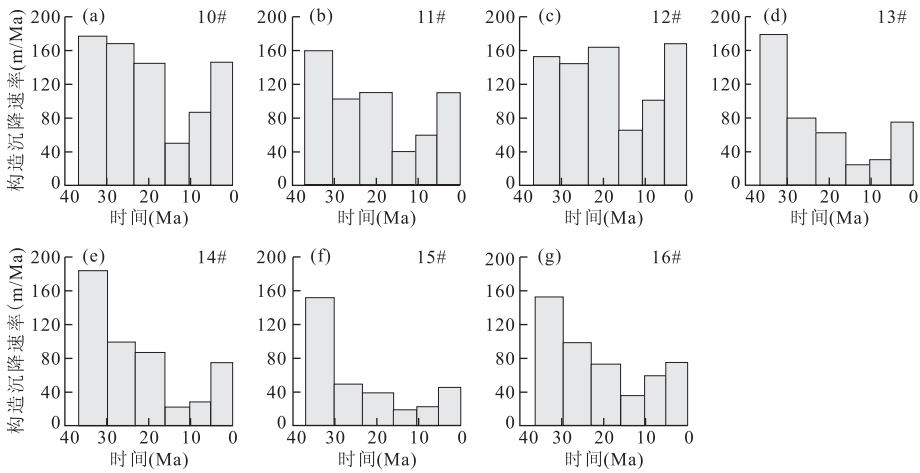


图 5 南薇西盆地构造沉降速率

Fig. 5 Tectonic subsidence rate of Nanwei basin

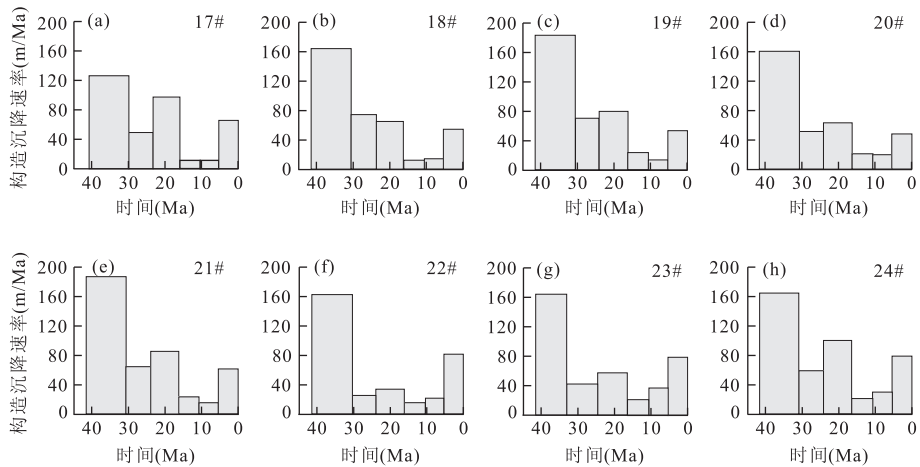


图 6 万安盆地构造沉降速率

Fig. 6 Tectonic subsidence rate of Wan'an basin

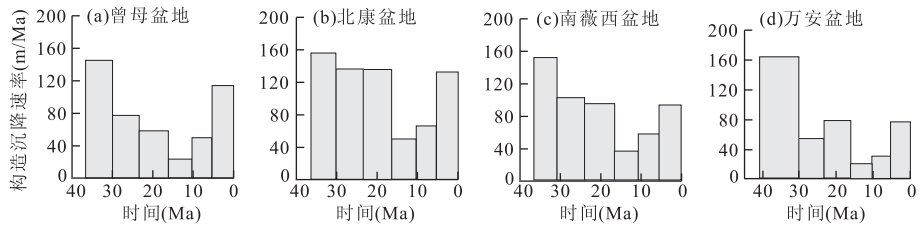


图 7 研究区内各盆地平均构造沉降速率

Fig. 7 Average tectonic subsidence rate of four basins in Nansha area

从西向东、从南向北加快的趋势。

将研究区内各盆地的构造沉降速率按照盆地范围进行归纳,计算得到每个盆地的平均构造沉降速率(图 7)。结果显示,始新世到早渐新世研究区各盆地均呈快速沉降趋势,沉降速率都在 160 m/Ma 左右,各盆地均呈快速沉降特征。渐新世中期( $T_{70}$ 以

后)各盆地沉降速率逐渐减小,北康、南薇西盆地的沉降速率大于曾母、万安盆地,此时的沉降中心位于研究区的北部,呈现出北高南低的不对称性。其北侧陡峻,显然受区域边缘两侧的强烈差异沉降机制所控制,而向南缓斜的沉降趋势则与该区向南漂移及俯冲活动密切相关。中新世末各盆地沉降速率降至

最低,之后进入快速沉降过程,构造沉降速率增加,曾母、北康盆地的构造沉降速率大于南薇西、万安盆地,此时的沉降中心迁移至研究区的东南部。

综合分析区内各个盆地的沉降速率,并按照由快到慢的幕式特征将其划分为 3 个沉降幕. 沉降的多幕性,反映了盆地拉张作用的多期性。

第一沉降幕(40.5~30.0 Ma): 42 Ma 前,太平洋板块运动方向由 NNW 变为 N,促使东南亚大陆裂解,研究区内各盆地进入裂陷期,初始沉降量大. 该区 4 个盆地在南沙地块向东南漂移的过程中,发生大规模的地壳拉伸作用,并开始断陷发育阶段,断块活动强烈,构造沉降速率都达到 160 m/Ma 左右,断裂活动强. 盆地形成早期,由于受到强烈的拉伸作用,沉积物主要分布于断陷及深凹底部,断陷阶段主要形成掀斜断块和半地堑的构造格架。

第二沉降幕(30.0~10.2 Ma): 晚渐新世晚期,由于南海中央海盆发生海底扩张(32 Ma),研究区内各盆地逐渐进入热沉降阶段,沉降速率逐渐减小. 中中新世末,受南沙运动的影响,区域应力场由 NW 向拉张转为 NWW 向压剪,盆地局部地区派生出挤压性应力场,区内各盆地沉降速率降至最低. 构造沉降速率为 30~50 m/Ma 之间,地层发生整体抬升、褶皱,遭受长时期剥蚀。

第三沉降幕(10.2~0 Ma): 中中新世以后,随着全球海平面上升使盆地进一步接受大规模海进,在南沙地区进入区域沉降的背景下,研究区内盆地进入加速沉降阶段,曾母、北康盆地的沉降速率都达到了 120 m/Ma 以上,持续到上新世末区域应力场处在平静松弛状态。

## 5 沉降与构造的时空关系

根据盆地地质构造和沉降作用的关系,南沙海域的构造运动与南海区域地质构造运动密切相关. 晚白垩世到早始新世期间(68.5~53 Ma),发生了一期张裂运动称为礼乐运动,太平洋板块的运动方向由 NWW 变为 N 向运动(Northrup *et al.*, 1995),造成欧亚大陆东南缘区域应力场的转变,以拉伸作用为主,南沙海域各盆地发育在礼乐运动所形成的区域裂陷上. 在中始新世大约 43 Ma 时,印度板块和欧亚板块发生了碰撞作用,导致亚洲板块向东南方向运动,在东亚边缘产生了一次张性构造运动(Tapponier *et al.*, 1982),在南海地区被称作西卫运动(姚伯初等, 1994). 这次运动使礼乐运动形

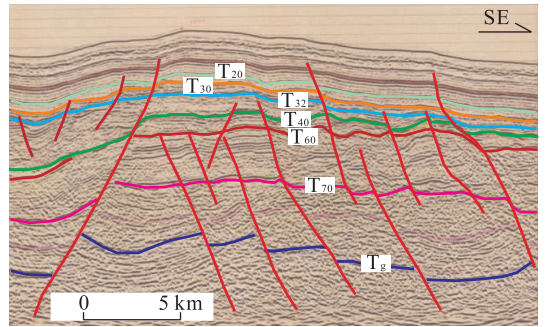


图 8 90N9 测线剖面局部反射特点

Fig. 8 Characteristic of line 90N9

成的小型半地堑、地堑被进一步拉开,研究区内各盆地发生了第一次大规模的快速裂谷沉降作用,即初始沉降作用,区内断层普遍发育(图 8).  $T_g - T_{70}$  各盆地沉降速率达到最大值. 渐新世末盆地受西卫运动影响的程度逐渐减弱,沉降速率逐渐降低;在晚始新世早期,南沙地块向东南方向运动. 约 32 Ma,随着南海海盆张开,南沙块体逐渐向南推挤,研究区内各盆地相继发生热沉降作用,盆地构造运动趋于平静,进入拗陷期; $T_{70}$  以后沉降速率逐渐减小,随着南海运动的影响,南沙海域处于挤压的构造环境;15.5 Ma 古南海与婆罗洲发生碰撞,南沙地区地层受到进一步挤压抬升,各沉积盆地普遍发生构造反转,中中新世各盆地沉降速率均达到最低值;在中中新世末,由于太平洋板块向欧亚板块进一步俯冲,导致南海整体发生区域沉降,使研究区内各盆地发生了新一期大规模的快速沉降作用,此期运动称为南沙运动(又名万安运动),盆地进入区域沉降阶段,各盆地的沉降速率又逐渐增加. 上述研究表明,南海扩张后随着地幔冷却收缩和地幔岩石圈固结增厚,出现区域性的大幅度沉降。

综合分析研究区内各个盆地的构造发育过程,发现以中晚始新世的西卫运动、15.5 Ma 古南海与婆罗洲的碰撞和晚中新世的南沙运动,这 3 期构造事件对南沙地区的构造发育影响最强烈. 西卫运动使南沙海域盆地发生初始张裂,构造沉降量达到最大值;古南海与婆罗洲发生碰撞,使盆地挤压应力加剧,沉降速率达到最小值;南沙运动使各盆地普遍发生区域性沉降,构造沉降速率达到新的高峰。

## 6 结论

南沙海域构造沉降受南海区域地质构造的影响分为 3 幕. 第一幕为 40.5~30.0 Ma,在西卫运动的

影响下,南沙海域盆地进入断陷阶段,发生大规模的沉降作用,构造沉降速率最大达到了 160 m/Ma;第二幕为 30.0~10.2 Ma,随着南海的张开,区内盆地相继发生热沉降作用,进入拗陷期,由于古南海与婆罗洲的碰撞,区内盆地地层发生整体抬升,构造沉降速率达到最小值 20~50 m/Ma;第三幕为 10.2~0 Ma,晚中新世由于南沙运动影响,研究区内盆地发生了一次大规模的快速沉降作用,随着南沙地区一起进入区域沉降阶段。

## References

- Allen, P. A., Allen, J. R., 1990. Basin analysis: principles and application. Blackwell Scientific Press, London.
- 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).
- Hilde, T. W. C., Uyeda, S., Kroenke, L., 1977. Evolution of the western Pacific and its margin. *Tectonophysics*, 38(1—2): 145—152, 155—165. doi:10.1016/0040—1951(77)90205—0
- Jin, Q. H., Li, T. G., 2000. Regional geologic tectonics of the Nansha Sea area. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Kusznir, N. J., Ziegler, P. A., 1992. The mechanics of continental extension and sedimentary basin formation: a simple-shear/pure-shear flexural cantilever model. *Tectonophysics*, 215(1—2): 117—131. doi:10.1016/0040—1951(92)90077—J
- Northrup, C. J., Royden, L. H., Burchfiel, B. C., 1995. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia. *Geology*, 23(8): 719—722. doi: 10.1130/0091—7613(1995)023<0719: MOTPPR> 2.3.CO;2
- Roberts, A. M., Kusznir, N. J., Yielding, G., et al., 1998. 2D flexural backstripping of extensional basins: the need for a sideways glance. *Petrol. Geosci.*, 4(4): 327—338. doi: 10.1144/petgeo.4.4.327
- 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.
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A. Y., et al., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10(12): 611—616.
- Wu, N. Y., Zeng, W. J., Song, H. B., et al., 2003. Tectonic subsidence of South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 23(1): 55—65 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., Zeng, W. J., Hayes, D. E., et al., 1994. The geological memoir of South China Sea survey jointly by China and USA. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhong, G. J., Xu, H., Wang, L. L., 1995. The types of Cenozoic basins in the southwest of South China Sea and their evolution. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 15(Suppl.): 87—94 (in Chinese with English abstract).

## 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): 349—356.
- 金庆焕,李唐根,2000.南沙海域区域地质构造. *海洋地质与第四纪地质*, 20(1): 1—8.
- 吴能友,曾维军,宋海斌,等,2003.南海区域构造沉降特征. *海洋地质与第四纪地质*, 23(1): 55—65.
- 姚伯初,曾维军, Hayes, D. E., 等,1994.中美合作调研南海地质专报. 武汉:中国地质大学出版社.
- 钟广见,许红,王嘹亮,1995.南海西南部新生代盆地结构及演化历史. *海洋地质与第四纪地质*, 15(增刊): 87—94.