

doi:10.3799/dqkx.2011.084

南沙海域新生代构造特征和沉降演化

赵中贤^{1,2}, 孙 珍¹, 陈广浩¹, 张云帆¹

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. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要: 为了认识南沙海域新生代的整体沉降规律, 对覆盖南沙海域的 5 条地震剖面进行了构造分析和沉降计算. 结果表明, 南沙海域大部分伸展断层活动到 T_{40} (16 Ma) 和 T_{60} (23.8 Ma), 而 T_{60} (23.8 Ma) 前的构造沉降表现为断陷盆地特征, T_{60} 后为坳陷特征, 所以 T_{60} (23.8 Ma) 应为南沙海域大的构造转换面; 南沙海域的沉降中心出现在 NE 向南沙海槽的延伸带上, 它和前缘的逆冲推覆体一起成为南沙海域最显著的特征; 由逆冲推覆体的构造和地层特征判断其形成于 T_{40} (16 Ma) 后, 构造沉降速率拟合曲线也表明, 南沙海域在 T_{40} (16 Ma)– T_{32} (10.2 Ma) 受到 SE 端的挤压和负载最强烈, 产生宽约 200 km 的相对隆升, 并伴生有火山、张裂活动, 因此, T_{40} (16 Ma) 可能是南沙海域区域应力场由伸展向挤压转换的界面; 上新世—第四纪 (5.3~0 Ma) 是南沙海域的快速构造沉降期, 可能与 SE 端的挤压强度减弱有关.

关键词: 构造; 沉降; 新生代; 南沙; 海洋地质.

中图分类号: P736.1

文章编号: 1000-2383(2011)05-0815-08

收稿日期: 2011-05-02

Cenozoic Structural Characteristics and Subsidence Evolution in Nansha

ZHAO Zhong-xian^{1,2}, SUN Zhen¹, CHEN Guang-hao¹, ZHANG Yun-fan¹

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

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: Tectonic evolution in Nansha is analyzed by depicting the faults and calculating the tectonic subsidence along 5 profiles across Nansha. The study shows the following results: 1. T_{60} (23.8 Ma) is an important tectonic transformation boundary (except for the region around Youngshu basin) because most normal faults have been activated until sequence boundary T_{40} (16 Ma) or T_{60} (23.8 Ma) and subsidence curves across the region are characterized by syn-rift basin before T_{60} (23.8 Ma) and post-rift basin after that. 2. The Southeast of Nansha is the outstanding topography with a combination of a NE-SW belt of high subsidence along Nansha trough and its NE elongating zone with a NE-SW belt of thrust to the Southeast indicating there is a stress reverse in T_{40} boundary. 3. There is high subsidence period since 5.3 Ma which may relate to the weakness of compression to the SE of Nansha.

Key words: tectonics; subsidence; Cenozoic; Nansha; marine geology.

南沙海域处于特提斯和太平洋构造域的交汇处, 受控于印度板块与欧亚板块的碰撞和太平洋板块向欧亚板块的俯冲, 古地理位置上处于古南海的北部和现在南海的南部. 随着古南海向加里曼丹的俯冲和现在南海的打开, 南沙海域在新生代产生了一系列的伸展和挤压构造, 形成了一系列的沉积盆地 (Morley, 2002); 油气资源非常丰富, 具有第 2 个

“波斯湾”之称 (据国土资源部、国家发改委和财政部联合编写的“新一轮全国油气资源评价”, 2005). 20 世纪 80 年代以来, 中国科学院南海海洋研究所、中国国土资源部广州海洋地质局以及德国联邦地质调查局等单位在南沙海区进行了多年的地球物理调查和研究, 获得了数万千米的地球物理剖面资料, 对南沙的构造格架提出了许多看法. 但由于缺乏钻井等

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 计划”项目 (No. 2007CB41170405); 国家科技重大专项 (No. 2008ZX05025-005).

作者简介: 赵中贤 (1985—), 男, 博士研究生, 从事大陆边缘研究和盆地分析. E-mail: zzxzhao@scsio.ac.cn

资料的控制,整个南沙海域的地层划分对比一直存在较大分歧.另外目前对南沙海域沉积沉降的分析主要集中在单个盆地(邱燕和吴进民,1995;刘振湖和郭丽华,2003),缺乏整体的对比和认识.因此本文在“十一五科技重大专项”对南沙海域不同盆地中、新生代地层对比划分的基础上,对中科院南海海洋研究在 20 世纪 80、90 年代采集的覆盖南沙海域的 5 条多道地震剖面进行了断层、构造样式和沉降史分析,确定了南沙海域大的构造、沉积转换面,从整体上认识了南沙海域新生代盆地的构造演化特征.

1 研究区位置及构造背景

南沙海域一般指北纬 4°~12°和东经 109°~119°之间的海域,地貌复杂,水深在 50~3 000 m 之间(图 1).大地构造上处于欧亚板块东南边缘,欧亚、印度洋—澳大利亚和西太平洋(含菲律宾海)三大板块结合处.南沙海区受三大板块沿特提斯构造域和滨太平洋构造域的相互作用,发生拉薄、裂解、

滑移、旋转、会聚和碰撞等组合过程,发育了一系列新生代沉积盆地,如礼乐盆地、南薇西盆地、北康盆地、曾母盆地和南沙海槽盆地等,具有丰富的油气资源(金庆焕和李唐根,2000).南沙海域断裂发育,以 NE 和 NW 向的断裂为主,按力学性质可分为伸展断裂、逆冲断裂和走滑断裂(金庆焕和李唐根,2000).图 1 中的巴拉巴克断裂、廷贾断裂为走滑断裂,卢帕尔断裂为逆冲断裂(谢文彦等,2007).

南沙海域在晚渐新世之前曾是华南地块的一部分,古近纪属裂陷地层,可与华南对比,偏海相(Holloway, 1982);晚渐新世—早中新世,在南海扩张(Taylor and Hayes, 1980, 1983; Briais *et al.*, 1993)和古南海向加里曼丹的俯冲作用下(Hall *et al.*, 2008; Hutchison, 1996),南沙地块裂离华南,漂移到现今的位置,并发育大片浅海碳酸盐台地,与华南地块明显不同(Holloway, 1982);早中新世末,澳大利亚陆块与巽他弧沟系碰撞,使加里曼丹地块东部发生了大规模北西向逆冲,古近系沉积岩向北推覆到南沙地块的碳酸盐平台之上,区域应力场由张性变为压

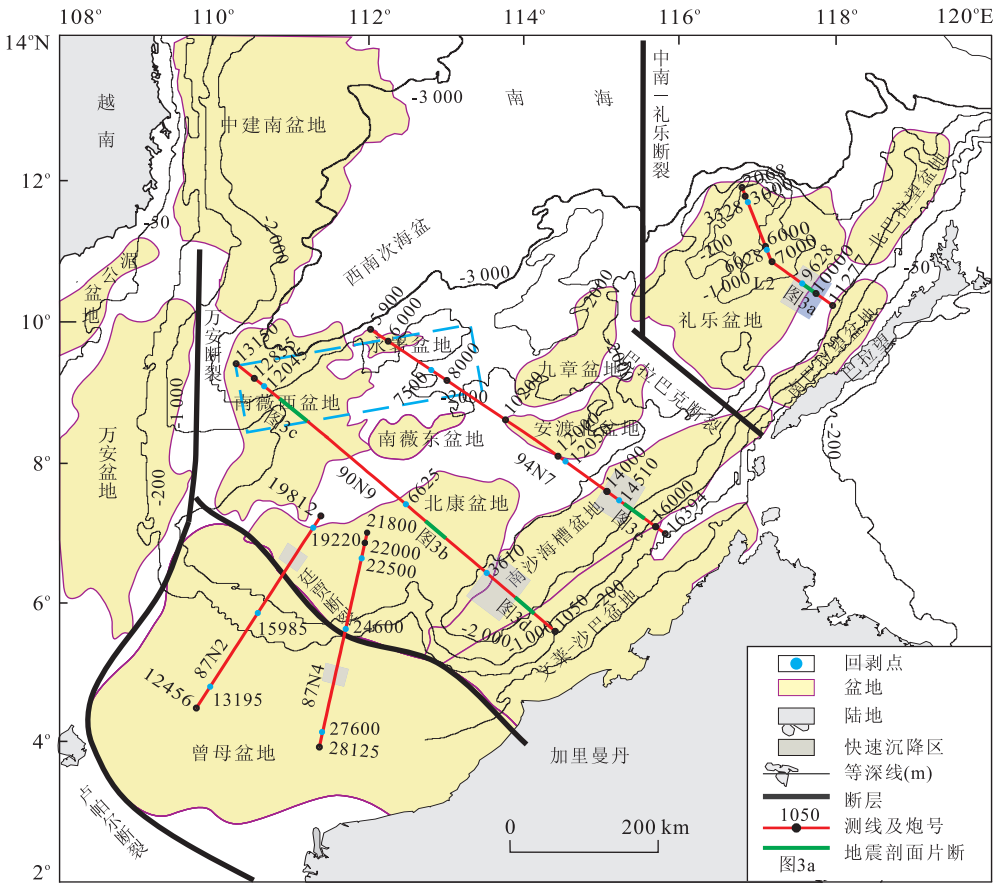


图 1 研究区主要盆地和地震测线位置

Fig. 1 Location of major basins and seismic profiles

性,并持续至今(Hinz *et al.* , 1989).

2 南沙海域地层、沉降特征

南沙海域新生代沉积盆地发育,且地层划分不一. 本文在“十一五科技重大专项”南沙海域不同盆地中、新生代地层划分对比、建立统一的地层划分标准基础上(孙珍等,2011),对 5 条覆盖南沙海域的多道地震剖面进行了断层、构造样式和沉降史分析. 其中 3 条为 NW-SE 向,L2 测线过礼乐盆地,94N7 测线过永暑盆地、安渡北盆地和南沙海槽盆地,90N9 过南薇西盆地、北康盆地和南沙海槽盆地;2 条为 NE-SW 向,经过北康盆地和曾母盆地. 主要盆地的地层划分如图 2.

2.1 南沙海域地层界面及构造样式

在 L2 测线的 SE 端,在地震剖面上识别出了 T_{20} 、 T_{30} 、 T_{32} 、 T_{40} 、 T_{60} 、 T_{70} 和 T_g 几个主要的地震反射界面. 剖面上正断层发育,主要构造样式为半地堑(图 3a),断层大都活动到 T_{60} (23.8 Ma). 图 3b 为穿过北康盆地的 90N9 地震剖面片断,解释出的地震

反射层有 T_{10} 、 T_{20} 、 T_{30} 、 T_{32} 、 T_{40} 、 T_{60} 、 T_{70} 、 T_{80} 和 T_g ,正断层发育,主要构造样式为半地堑,断层主要活动到 T_{40} (16 Ma),部分活动到 T_{60} (23.8 Ma). 图 3c 是 90N9 测线 NW 端的南薇西盆的地震剖面片断,主要地震反射界面有 T_{10} 、 T_{20} 、 T_{30} 、 T_{32} 、 T_{40} 、 T_{60} 、 T_{70} 、 T_{80} 和 T_g ,断层密集发育,正断,大都活动至 T_{40} (16 Ma)和 T_{60} (23.8 Ma) 2 个界面,主要构造样式为半地堑. 南沙海槽盆地位于研究区的东南边缘,从地震剖面图 3d 和图 3e 上可以看出,南沙海槽地层水平,断层不发育,但其东南方向形成明显的逆冲推覆构造,逆冲推覆褶皱的发育时间在 T_{40} (16 Ma) 后,且两翼地层厚度相当,图 3d 的逆冲推覆构造的褶皱幅度要比图 3e 大,并向 SE 方向延伸较远.

南沙海域主要沉积盆地的典型剖面分析表明,除南沙海域的东南边缘外,盆地以伸展性质为主,正

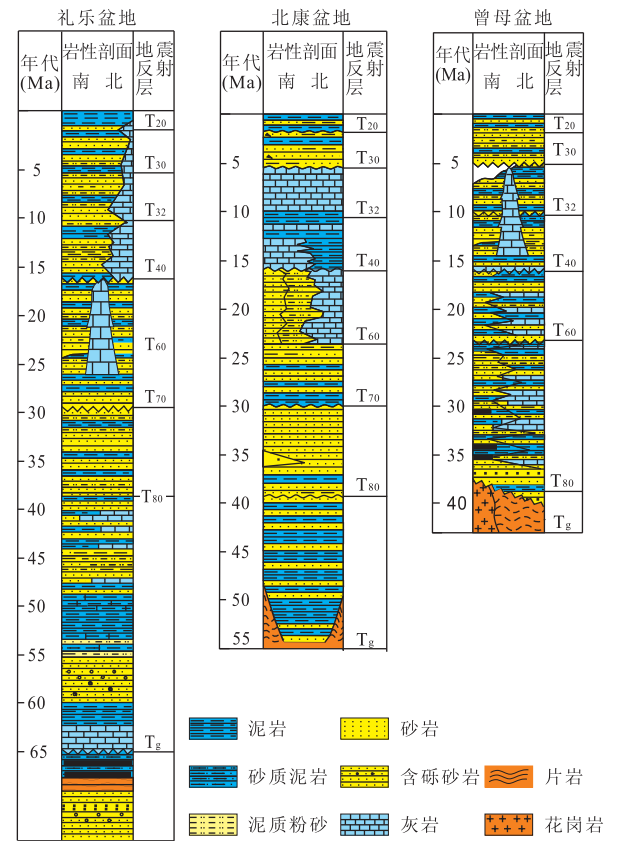


图 2 南沙海域主要盆地地层柱状图
Fig. 2 Strata histogram of major basins

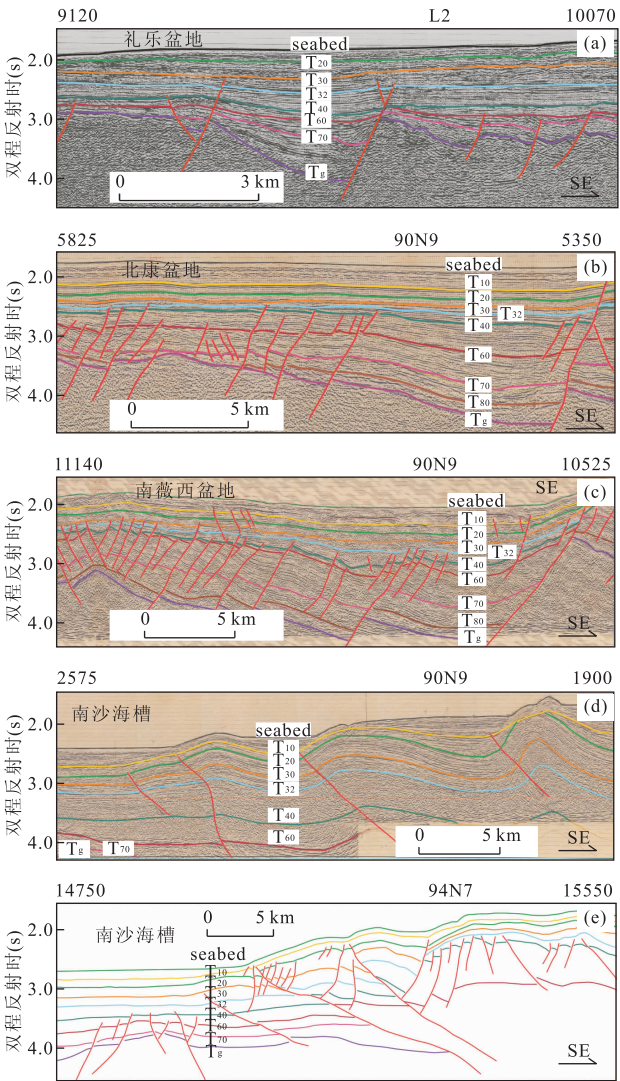


图 3 典型地震剖面
Fig. 3 Typical seismic profile

断层发育,主要形成半地堑等构造样式,主要断层活动终止于 T_{40} (16 Ma)和 T_{60} (23.8 Ma)2 个界面.

2.2 南沙海域构造沉降

本文所选的 5 条测线很好地覆盖了整个南沙海区,对其构造沉降的计算可用来分析南沙海域在空间和时间上的构造演化特征.文中构造沉降均指无负载影响的空盆沉降,它是在载水盆地构造沉降的基础上,除去水负载的影响,是反映盆地基底沉降或隆升的独立参数(赵中贤等,未发表).本文正是利用

空盆沉降速率(EBSR)沿测线以及随时间的变化来反演南沙海域的构造过程.计算结果如图 4.回剥中的古水深是由现今水深和基底古水深(假设为 0)通过线性插值得到的.本文不考虑海平面的影响.

图 4a₁ 和图 4a₂ 分别为过礼乐盆地测线 L2 的沉降速率和测线上 3 个点的沉降速率步阶图. T_{70} — T_{60} (30~23.8 Ma)盆地整体沉降速率高,并且沉降幅度侧向变化大(5~40 m/Ma),波动频率快,表现为盆地断陷阶段的沉降特征. T_{60} 以后 (23.8~

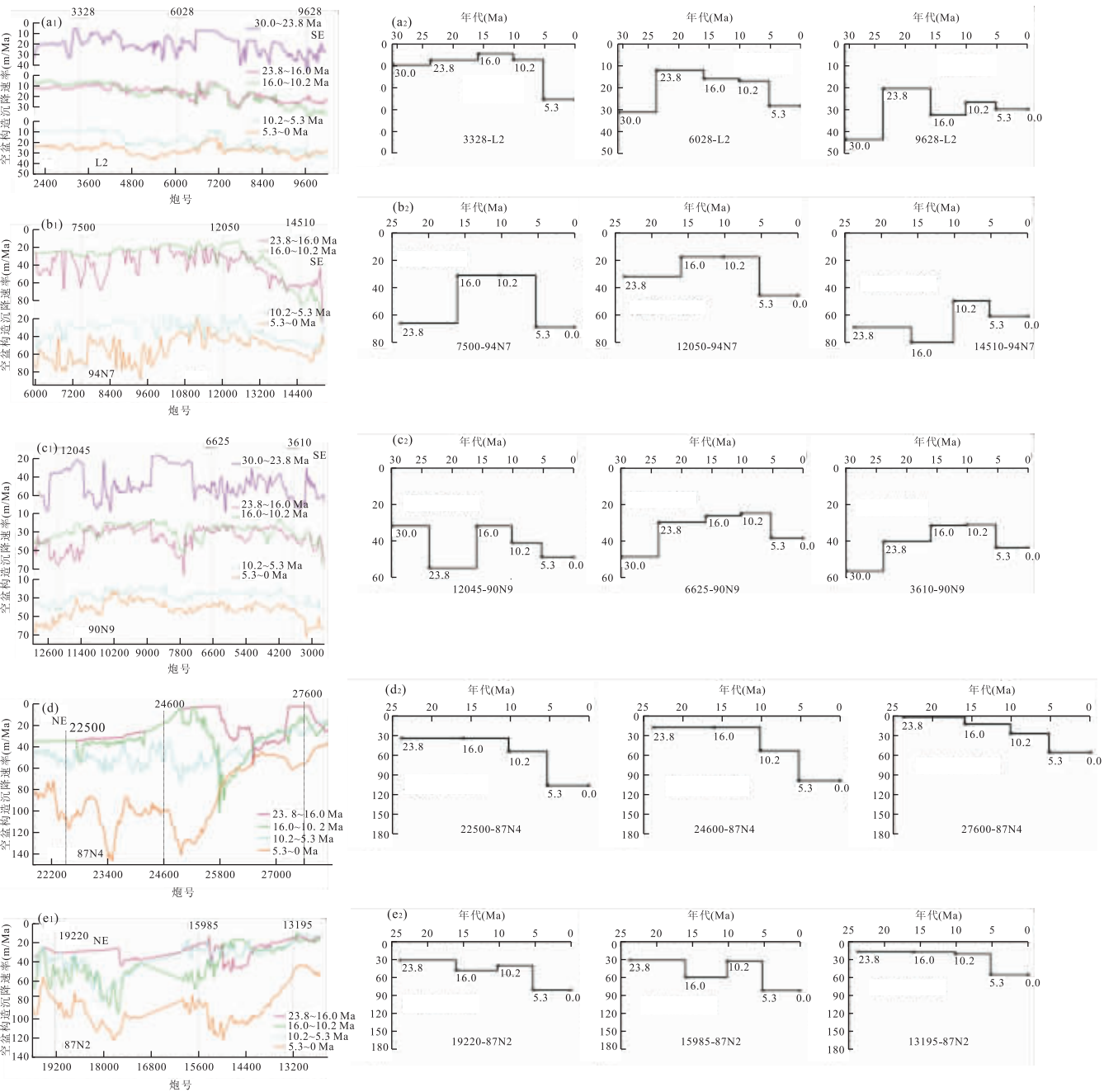


图 4 5 条测线的构造沉降
Fig. 4 Tectonic subsidence curves of 5 lines

0 Ma),盆地整体沉降速率低,沉降幅度变化不大,波动频率不快,表现为盆地拗陷阶段的沉降特征: $T_{60}-T_{30}$ (23.8~5.3 Ma),盆地整体沉降速率低,沉降速率由 NW 向 SE 增加,SE 端有最大构造沉降(35~40 m/Ma);在 $T_{40}-T_{30}$ (16.0~5.3 Ma) 表现最明显; T_{30} (5.3 Ma) 后发生快速构造沉降,沉降速率在 25~35 m/Ma(图 4a₁,4a₂).

图 4b₁ 为 94N7 测线的构造沉降速率曲线,从 NW 向 SE 依次过永暑盆地、安渡北盆地和南沙海槽盆地;图 4b₂ 为 3 个点的构造沉降速率步阶图.以 SP8600 点为界,两侧有不同的沉降表现: NW 方向(图 1 中的虚线框部分), $T_{60}-T_{40}$ (23.8~16 Ma) 的沉降速率幅度侧向上变化大且波动频率快, $T_{40}-T_{30}$ (16~5.3 Ma) 的沉降速率幅度侧向波动不大,而 T_{32} (5.3 Ma) 后沉降曲线侧向上则再次波动(图 4b₁);从 SP8600 向 SE 方向, T_{60} (23.8 Ma) 后沉降幅度侧向变化不大,波动小(图 4b₁),SE 端有一明显的沉降中心(SP14400),沉降速率在 40~80 m/Ma.整条测线在 T_{30} (5.3 Ma) 后发生快速构造沉降,速率在 40~80 m/Ma(图 4b₁,4b₂).

图 4c₁ 为测线 90N9 的构造沉降速率曲线,自 NW 向 SE 方向过南薇西盆地、北康盆地和南沙海槽盆地;图 4c₂ 为测线上 3 个点的沉降速率步阶图,测线 SE 端 SP3610 处有一沉降中心. $T_{70}-T_{60}$ (30.0~23.8 Ma) 的构造沉降速度大,并且沉降幅度侧向上变化大,频率高,为盆地断陷阶段的沉降表现. T_{60} (23.8 Ma) 后整体沉降速率变低,沉降幅度侧向变化不大,频率不高,表现为盆地拗陷阶段的沉降特征,但图 1 中虚线框部分除外,它在 T_{60} (23.8 Ma)~ T_{40} (16 Ma) 之间的沉降幅度变化大,速率也大, T_{30} (5.3 Ma) 后盆地整体发生快速构造沉降(图 4c₁,4c₂).

图 4d₁ 和图 4e₁ 为两条 NE-SW 向测线的沉降速率曲线,自 NE 向 SW 过北康盆地和曾母盆地.测线的沉降速率从曾母向北康增加,最大值出现在测线中间,靠近廷贾断裂的部分.图 4d₂、4e₂ 为沉降速率步阶图.从两条测线的沉降速率曲线(图 4d₁,4e₁) 看, T_{60} (23.8 Ma) 后的构造沉降幅度侧向变化频率小,87N4 测线的构造沉降中心由曾母向北康盆地发生了迁移,87N2 测线的沉降中心变化不大,两测线在 T_{30} (5.3 Ma) 后出现快速构造沉降,最大沉降处的速率在 120~140 m/Ma.

综上所述,南沙海域大部分构造沉降在 T_{60} (23.8 Ma) 出现重大转变(除 94N7 和 90N9 测线的

NW 端外,如图 1 中的虚线框部分所示),由前期沉降幅度、频率侧向变化大的阶段(断陷盆地特征)向后期平稳变化阶段(拗陷盆地特征)转变,因此该界面应是南沙海域大的构造转换面.3 条 NW-SE 向(图 4a₁,4b₁,4c₁) 测线新近纪以后,在 SE 端有一构造沉降中心(图 1),2 条 NE-SW 向(图 4d₁,4e₁) 测线的最大构造沉降出现在中部靠近廷贾断裂的位置(图 1),87N4 测线随时间发生由 SW 向 NE 的迁移,87N2 测线的沉降中心变化不大.南沙海域在 T_{30} (5.3 Ma) 后发生快速构造沉降,沉降速率由礼乐盆地(40 m/Ma) 向曾母盆地增加(120 m/Ma) (图 4d₂,4e₂).

3 讨论

(1) 通过典型的地震剖面 and 沉降史分析,认为 T_{60} (23.8 Ma) 应为南沙海域新生代大的构造转换面,这与南海的张开时间(30 Ma) (Taylor and Hayes, 1983; Briaes *et al.*, 1993) 和对应的南海北部陆缘珠江口盆地的裂后不整合时间(30 Ma) (李平鲁,1993) 不一致.考虑到研究区位于古南海和新南海之间,古南海向南俯冲发生在中始新世(45 Ma),并在早中新世结束(16 Ma) (Hutchison, 1996; Hall *et al.*, 2008).虽然南海在 30 Ma 打开,在北部陆缘形成相应的破裂不整合,但南沙海域仍受到古南海俯冲产生的张力影响(Morley, 2002) 而不断南漂,且西南次海盆在早中新世(23.8 Ma) 才打开(Briaes *et al.*, 1993),所以南沙海域的破裂不整合时间很可能比 30 Ma 晚,这也是典型剖面上有断层活动到 T_{60} (23.8 Ma) 和 T_{40} (16 Ma) 的原因.由于区域构造沉降曲线反映 23.8 Ma 前的沉降幅度、频率侧向变化大,23.8 Ma 后变化小,因此将 23.8 Ma 作为本区大的构造转换面比较合适.90N9 和 94N7 测线 NW 端的南薇西盆地和永暑盆地(图 1 中的虚线框部分)在 T_{60} (23.8 Ma) 和 T_{40} (16 Ma) 之间的快速沉降和幅度波动大这一特点(图 4b₂,4c₁),应是受到西南次海盆在 $T_{60}-T_{40}$ 的打开和扩张的影响.因此,南薇西和永暑盆地处于断拗的演化阶段.

(2) 从北向南 3 条 NW-NE 向测线的 SE 端均有一明显的构造沉降中心,90N9 和 94N7 测线的沉降中心均落在 2 000 m 水深的南沙海槽内,礼乐盆地的沉降中心处的水深也最大(图 1).图 1 中,地震剖面片断图 3d 和图 3e 的位置均与最大沉降点的位

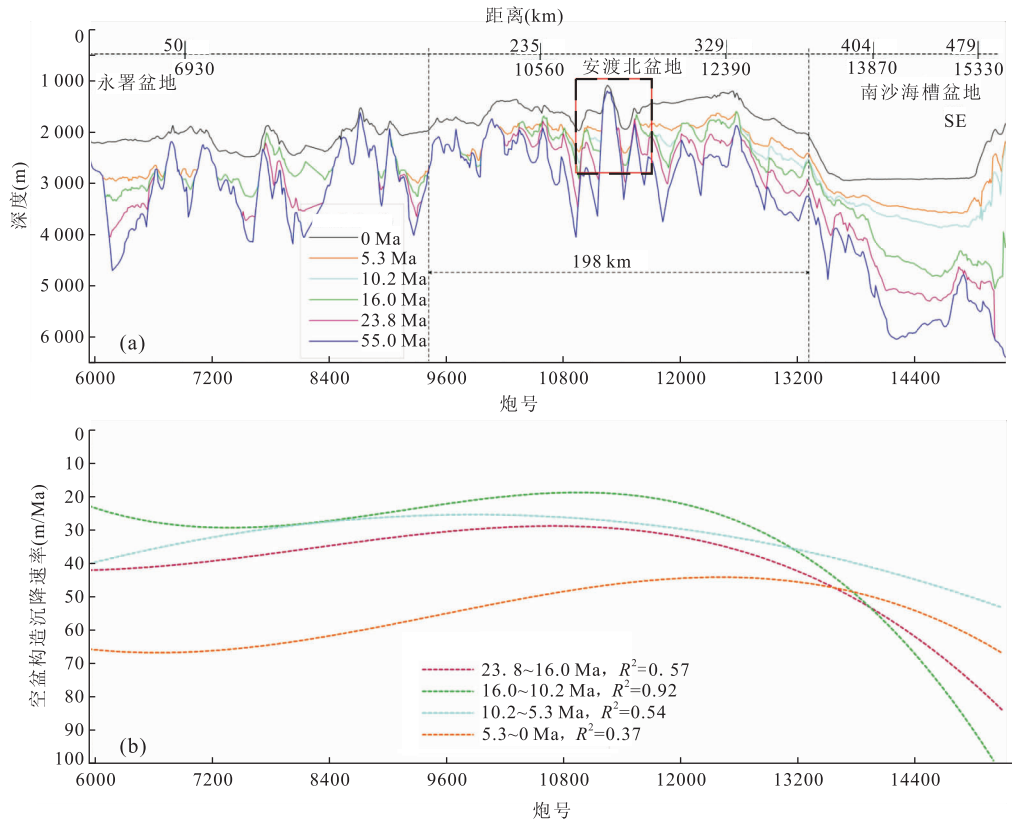


图 5 94N7 测线深度剖面(a)及构造沉降速率拟合曲线(b)(R^2 为相关系数,下同)
Fig. 5 Depth profile (a) and fitted subsidence rate curve (b) of line 94N7

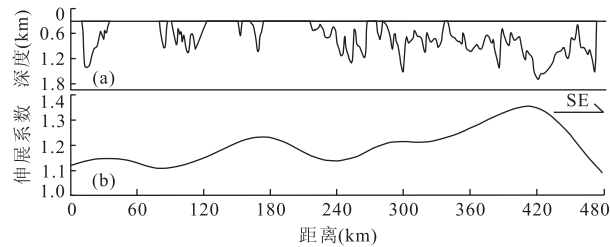


图 6 由盆地正反演拟合的岩石圈伸展系数
Fig. 6 Lithospheric stretching factor modeled by basin forward and reverse method
沿 94N7 测线岩石圈裂隙结束时(23.8 Ma)基底深度(a)及岩石圈伸展系数(b)

置部分重叠,同时从图 3d 和图 3e 上可以看出,最大沉降点的前缘即为逆冲推覆褶皱体,而逆冲推覆体由西南向东北方向强度变弱,这种 NE 向南沙海槽的构造沉降中心带和其前缘的逆冲推覆构造与 Hutchison(2004)所展示的结果相同。南沙海槽 SE 向的逆冲推覆体发生在 T_{40} (16 Ma) 后,可能与加里曼丹在 25~10 Ma 的逆时针旋转 (Fuller *et al.*, 1999) 形成的压应力有关。目前对南沙海槽的形成有 2 种认识:一种认为南沙海槽为一条古南海的俯冲

带 (Ben-Avraham and Uyeda, 1973; 姚伯初, 1996; 吴世敏等, 2004); 另一种认为南沙海槽是由于厚的外来楔形体的均衡压力使地壳向下弹性弯曲形成的 (Hinz *et al.*, 1989)。

地震剖面 (图 3d, 3e) 和沉降曲线 (图 4b₁, 4c₁) 都反映出南沙海域地块受到 SE 向的挤压应力而产生一系列逆冲推覆构造并发生快速沉降。为了更直观和细致的认识南沙海域岩石圈在受到挤压和负载时发生挠曲变形的特征, 本文对 94N7 测线的构造沉降速率曲线 (图 4b₁) 进行了拟合 (图 5)。拟合结果表明南沙海域 SE 端的挠曲和前缘隆起已很明显, 但为了突出南沙海域在纯构造和负载作用下的挠曲, 则需要在观测值 (图 4b₁) 的基础上减去理论热沉降的影响, 得到剩余构造沉降。本文用二维正反演盆地裂陷期沉降量的方法 (赵中贤等, 2010), 获得了 94N7 测线的岩石圈伸展系数 (图 6), 并计算了裂后热沉降, 最后在观测值 (图 4b₁) 的基础上减去热沉降, 得到剩余构造沉降速率曲线, 并作拟合处理, 如图 7 所示。

94N7 测线的岩石圈伸展系数自 NW 向 SE 由 1.1 增大到 1.35, 其 SE 端经受了更大程度的拉伸

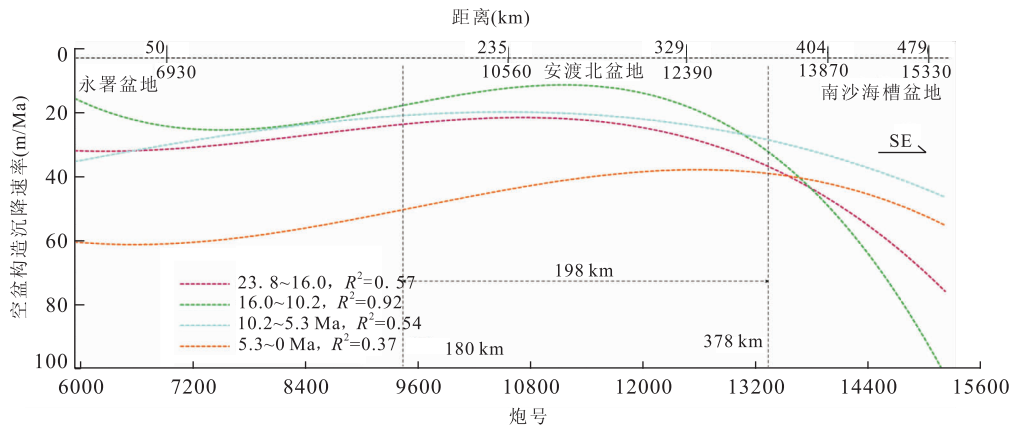


图 7 剩余构造沉降速率及岩石圈挠曲
Fig. 7 Remnant subsidence rate and flexure of lithosphere

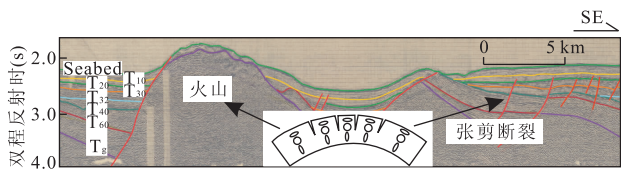


图 8 隆起上的伴生火山和断裂(位置如图 5 中的虚线框所示)
Fig. 8 Volcano and faults on uplift

变形,从剩余构造沉降速率(图 7)上看,南沙海域裂后沉降,比理论值高出 10~50 m/Ma,并且在 SE 端达到最大值. 图 7 中 4 个阶段的剩余沉降速率曲线特征表明, T_{40} (16 Ma)— T_{32} (10. 2 Ma)期间岩石圈受到强烈的挤压和前缘负载的影响,使 SE 端迅速下沉而前隆相对快速抬升,隆起范围宽约 200 km,隆起部位伴生有火山活动和断裂(图 8). 之后挤压强度减弱,岩石圈回弹,前隆降低,盆地沉降速率增加. 所以从逆冲推覆构造的发育、变形和剩余沉降速率曲线看, T_{40} 可能是南沙海域区域应力场由伸展向挤压转换的界面.

(3)南沙海域在上新世—第四纪(5. 3~0 Ma)发生快速构造沉降,可能与 SE 端的挤压强度减弱有关.

4 结论

对典型地震剖面的构造特征和所选 5 条测线的沉降分析表明,南沙海域新生代的构造转换面在 T_{60} (23. 8 Ma),这比公认的南海张开时间(30 Ma)要晚,这是由于南海破裂发生后,南沙海域继续受到古南海向南俯冲产生的拉力作用,以及洋中脊向西南次海盆扩张的影响.

沿 NE 向南沙海槽的沉降中心带和其前缘伴随的逆冲推覆体是南沙海域新生代典型的构造特征. 由逆冲推覆体的构造和地层特征判断它形成于 T_{40} 后,构造沉降速率拟合曲线也表明,南沙海域在 T_{40} (16 Ma)— T_{32} (10. 2 Ma)受 SE 端的挤压和负载最强烈,产生宽约 200 km 的相对隆升,并伴有火山和断裂活动,因此, T_{40} 可能是南沙海域区域应力场由伸展向挤压转换的界面.

南沙海域在上新世—第四纪(5. 3~0 Ma)发生快速构造沉降,可能与 SE 端的挤压强度减弱有关.

References

Ben-Avraham, Z. , Uyeda, S. , 1973. The evolution of the China basin and the Mesozoic paleogeography of Borneo. *Earth Plant. Sci. Lett.* , 18(2): 365—376. doi:10. 1016/0012—821X(73)90077—0

Brais, A. , Patriat, P. , Tappannier, P. , 1993. Updated interpretation 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.

Fuller, M. , Ali, J. R. , Moss, S. J. , et al. , 1999. Paleomagnetism of Borneo. *Journal of Asian Earth Sciences* , 17(1—2): 3—24. doi:10. 1016/S0743—9547(98)00057—9

Hall, R. , Van Hattum, M. W. A. , Spakman, W. , 2008. Impact of India-Asia collision on SE Asia: the record in Borneo. *Tectonophysics* , 451(1—4): 366—389. doi:10. 1016/j. tecto. 2007. 11. 058

Hinz, K. , Fritsch, J. , Kempter, E. H. K. , et al. , 1989. Thrust tectonics along the northwestern continental margin of Sabah/Borneo. *Geologische Rundschau* , 78(3): 705—730. doi: 10. 1007/BF01829317

- Holloway, N. H. , 1982. North Palawan block, Philippines—its relation to Asian mainland and role in evolution of South China Sea. *AAPG Bulletin*, 66 (9): 1355—1383. doi: 10.1306/03B5A7A5-16D1-11D7-8645000102C1865D
- Hutchison, C. S. , 1996. The ‘Rajang accretionary prism’ and ‘Lupar Line’ problem of Borneo. *Geological Society, London, Special Publications*, 106: 247—261. doi: 10.1144/GSL.SP.1996.106.01.16
- Hutchison, C. S. , 2004. Marginal basin evolution: the southern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 21 (9): 1129—1148. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2004.07.002
- 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).
- Li, P. L. , 1993. Cenozoic tectonic movement in the Pearl River Mouth basin. *China Offshore Oil and Gas (geology)*, 7 (6): 11—17 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. H. , Guo, L. H. , 2003. Subsidence and tectonic evolution of the Beikang basin, the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 23 (2): 51—57 (in Chinese with English abstract).
- Morley, C. K. , 2002. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia. *Tectonophysics*, 347 (4): 189—215. doi: 10.1016/S0040-1951(02)00061-6
- Qiu, Y. , Wu, J. M. , 1995. Sedimentation characteristics and its significance of oil geology. *Marine geology*, 2: 9—21 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, B. , Hayes, D. E. , 1980. The tectonic evolution of the South China Sea basin. In: Hayes, D. E. , ed. , The tectonic and geologic evolution of Southeastern Asia Seas and islands. Geophysical Monograph, AGU, Washington, D. C. , 23: 9—104.
- Taylor, B. , Hayes, D. E. , 1983. Origin and history of the South China Sea basin. In: Hayes, D. E. , ed. , The tectonic and geologic evolution of Southeastern Asia Seas and islands Part 2. Geophysical Monograph, AGU, Washington, D. C. , 27: 23—56.
- Sun, Z. , Zhao, Z. X. , Zhou, D. , et al. , 2011. The Stratigraphy and the sequence architecture of the basins in Nansha region. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36 (5): 798—806 (in Chinese with English Abstract).
- Wu, S. M. , Zhou, D. , Liu, H. L. , 2004. Tectonic framework and evolutionary characteristics of Nansha block South China Sea. *Geotectonica Et Metallogenia*, 28 (1): 23—28 (in Chinese with English abstract).
- Xie, W. Y. , Wang, T. , Zhang, Y. W. , 2007. Structural features and formation mechanism of fault systems in Nansha Sea area. *Journal of Tropical Oceanography*, 26 (6): 26—33 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C. , 1996. Tectonic characteristics and evolution of the Nansha trough. *Geological Research of South China Sea*, (8): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. X. , Zhou, D. , Liao, J. , et al. , 2010. Lithospheric stretching modeling of the continental shelf in the Pearl River Mouth basin and analysis of post-breakup subsidence. *Acta Geologica Sinica*, 84 (8): 1135—1145 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 金庆煊, 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.
- 李平鲁, 1993. 珠江口盆地新生代构造运动. 中国海上油气 (地质), 7 (6): 11—17.
- 刘振湖, 郭丽华, 2003. 北康盆地沉降作用与构造运动. 海洋地质与第四纪地质, 23 (2): 51—57.
- 邱燕, 吴进民, 1995. 南沙曾母盆地沉积特征及其石油地质意义. 海洋地质, 2: 9—21.
- 孙珍, 赵中贤, 周蒂, 等, 2011. 南沙海域盆地的地层系统与沉积结构. 地球科学——中国地质大学学报, 36 (5): 798—806.
- 吴世敏, 周蒂, 刘海龄, 2004. 南沙地块构造格局及其演化特征. 大地构造与成矿学, 28 (1): 23—28.
- 谢文彦, 王涛, 张一伟, 2007. 南沙群岛海域断裂体系构造特征及其形成机制. 热带海洋学报, 26 (6): 26—33.
- 姚伯初, 1996. 南沙海槽的构造特征及其构造演化史. 南海地质研究, (8): 1—13.
- 赵中贤, 周蒂, 廖杰, 等, 2010. 珠江口盆地陆架区岩石圈伸展模拟及裂后沉降分析. 地质学报, 84 (8): 1135—1145.