

doi:10.3799/dqkx.2011.101

南沙西南海域新生代构造活动特征与盆地演化

孙金龙, 张云帆, 徐辉龙, 曹敬贺

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

摘要: 南沙海域处于已俯冲消亡的古南海和海底扩张形成的新南海洋盆之间, 其研究对于了解中生代末期以来南海北部陆缘张裂、新南海海底扩张和古南海向南俯冲消亡等构造过程具有重要意义. 通过利用平衡剖面反演对该区新生代以来的构造活动和盆地演化进行研究. 结果发现, 该区新生代以来的构造活动具有显著的分区性特征, 表现为以区内深大断裂为界, 所分隔的3个块体其构造活动的主导因素和活动阶段性存在差异. 南沙块体构造活动的主导因素为NW向应力, 构造活动以中一晚中新世为界前张后压, 具有明显的阶段性; 万安盆地构造活动受万安断裂控制, 构造活动阶段性不明显; 曾母块体构造活动特征与南沙块体类似, 具有明显的阶段性, 但具体表现不同. 在此基础上, 将该区主要盆地的演化划分为4个阶段, 即裂陷阶段、同沉积阶段、挤压阶段和区域沉降阶段. 其表现又因盆地成因类型而有所不同: 北康盆地裂陷和挤压阶段突出, 沉降阶段缺失; 南薇西盆地裂陷阶段南弱北强; 万安盆地缺少挤压阶段; 曾母盆地则4个阶段均非常明显.

关键词: 构造; 盆地演化; 平衡剖面; 沉积; 海洋地质.

中图分类号: P736.1

文章编号: 1000-2383(2011)05-0956-11

收稿日期: 2011-05-05

Cenozoic Tectonics and Basin Evolution in the Southwestern Nansha Sea Area

SUN Jin-long, ZHANG Yun-fan, XU Hui-long, CAO Jing-he

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

Abstract: Nansha Sea area lies between extinct paleo-South China Sea and newly-formed South China Sea (SCS) and its relevant researches are of great importance for understanding the mechanisms of rifting in northern SCS continental margin, seafloor spreading in the new SCS, and southward subduction of the paleo-SCS. This paper studies the Cenozoic tectonics and basin evolution in the area by utilizing balanced section. It is suggested that the Cenozoic tectonics in this area have evident zonality features demonstrated by different dominating factors and tectonic activity stages in the three blocks separated by major faults. The tectonic activities of Nansha block are dominated by NW-striking stress, and are divided into an extension- and compression stage by Mid-Late Miocene. Wan'an basin is controlled by Wan'an Fault, and shows no significant stage feature. Zengmu block displays overall similar tectonic activity characteristics and some differences from Nansha block. Based on these results, evolution of major basin in this area is divided into four stages: rifting-, syn-sediment-, compressing-, and regional subsidence stage. However, evolution differs in different basins; Beikang basin is prominent in the rifting and compressing stage, and is lack of regional subsidence stage; Nanweixi basin rifts strongly in the north and is relatively weak in the south; Wan'an basin is lack of compressing stage; Zengmu basin shows evident four-stage feature.

Key words: tectonics; basin evolution; balanced section; sedimentation; marine geology.

南海位于太平洋板块、欧亚板块和印度—澳大利亚板块3大板块的交汇处, 是在中生代末期东亚大陆陆缘张裂背景下, 通过海底扩张而形成的新生代边缘海. 南沙海域地处南海南部, 构造上处于已经

俯冲消亡的古南海和通过海底扩张形成的新南海之间, 其演化与古南海和新南海的演变息息相关(吴世敏等, 2004). 古南海的俯冲消亡和新南海的多期次海底扩张与中生代末期以来东亚地区内太平洋板块

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-Q05-04-01); NSFC-广东联合基金重点项目(No. U0933006); “973”子课题(No. 2007CB41170401).

作者简介: 孙金龙(1979—), 男, 博士, 主要从事海洋新构造运动研究. E-mail: sunjl@scsio.ac.cn

俯冲方向改变、印度—澳大利亚板块与欧亚大陆的碰撞以及菲律宾海板块向北漂移—逆时针旋转有关,因此,研究南沙海域新生代构造活动特征对于了解大南海地区新生代以来的构造事件和构造演化有重要参考意义。

在中生代末期—新生代早期陆缘拉张的构造背景下,南沙海域内发育了众多的沉积盆地,如万安、曾母、北康、南薇西和礼乐等大型盆地,有着优越的油气地质条件(朱伟林等,2010)。因此,对该区的研究有着油气资源方面的重要意义。

由于南沙海域特殊的构造位置和资源潜力,国内外许多学者都对该区进行了详细的研究(Hinz and Schlünter, 1985; Hinz *et al.*, 1989; 高红芳, 2002; 徐行等, 2003; 张莉等, 2003a, 2003b; Hutchinson, 2004; 刘振湖, 2005; 姚永坚等, 2005; Franke *et al.*, 2008; 孙龙涛等, 2010), 为该区的深入研究打下了良好的基础。本文在前人工作的基础上,选取了南沙西南海域内的6条地震测线(图1),利用平衡剖面原理进行研究,试图揭示该区新生代构造活动特征和盆地演化过程,以为南海的形成演化研究和南沙海域的油气资源勘探调查提供参考。

1 区域地质概况与研究方法

1.1 区域地质概况

南沙海域位于南海南部,区内的万安断裂、卢帕尔断裂、廷贾断裂、巴拉巴克断裂等深大断裂将该区分割成几个部分(图1),并控制了本区的基本构造格架。该区的主体部分为万安断裂以东、廷贾断裂以北的南沙块体,包括南沙、礼乐—东北巴拉望2个地块(姚伯初和刘振湖,2006);万安断裂西侧的部分为万安盆地,因发育过程受南海西缘断裂影响而被认为是走滑拉分盆地(姚伯初,1997;姚伯初等,2004);廷贾断裂西南侧为曾母块体,其主体部分曾母盆地是南沙地块与加里曼丹地块相撞后,在造山带前缘形成的一个不典型的周缘前陆盆地(金庆焕和李唐根,2000;姚伯初和刘振湖,2006)。

构造演化上,该区中生代末期位于华南陆缘(Taylor and Hayes, 1980)。由于太平洋板块俯冲方向和速度的改变(Northrup *et al.*, 1995),导致东亚陆缘发生应力松弛(金庆焕和李唐根,2000),南海北部陆缘开始伸展扩张,形成一系列NE向的垒堑构造。新生代早期,随着古南海俯冲的拖曳作用,南沙地块沿南海西缘断裂右旋走滑,逐渐裂离华南陆缘

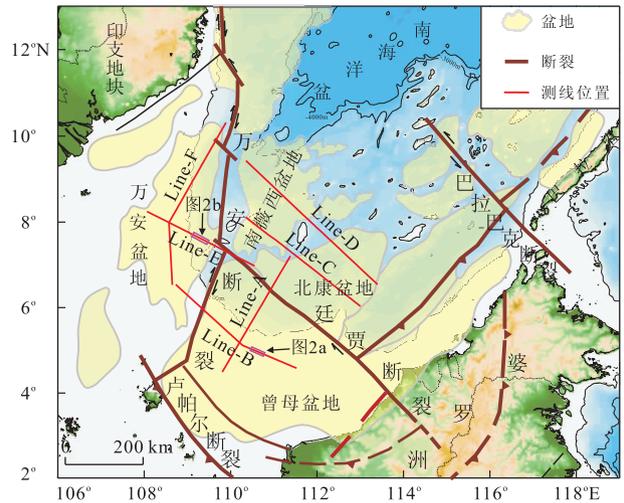


图1 研究区大地构造位置与本文测线分布

Fig. 1 Geological settings of research area and distribution of the profiles studied in this paper

(姚伯初, 1996; 周蒂等, 2005)。中始新世,随着印藏碰撞的发生,以及太平洋板块俯冲方向由NNW转为NWW,古南海加速向南俯冲(吴世敏等,2004),引发西卫运动,使得该区进一步被拉伸(万玲等,2003;姚伯初和刘振湖,2006)。渐新世开始,新南海海洋盆张开,推动该区继续向南俯冲,而印藏碰撞导致印支地块挤出,南海西缘断裂转为左旋走滑剪切。同时,南沙块体南部开始与加里曼丹碰撞,形成碰撞褶皱带(万玲等,2004),但在块体内部,仍然以拉张为主(姚永坚等,2005)。早中新世,澳大利亚陆块北缘与巽他弧沟系碰撞(Hall *et al.*, 1995);20 Ma左右,菲律宾海板块也到达南海东部(Rangin *et al.*, 1990)。二者共同作用,导致新南海盆扩张,并在中中新世逐渐停止。此时,菲律宾海板块上的吕宋岛与苏禄海盆内的卡加延脊及北巴拉望碰撞(约15 Ma)、东南苏拉威西地块与西苏拉威西碰撞(13 Ma),以及礼乐—东北巴拉望地块与加里曼丹—苏禄地块的碰撞(11 Ma),这些碰撞引起南沙运动(姚伯初和刘振湖,2006),并使该区构造应力场由拉张转为挤压,区内的NW向大断裂转为右旋剪切,先期的断裂也由张性转为压性或压扭(万玲等,2003)。此后该区构造活动相对平静。

整体上,该区应力场在新生代以来经历了“拉张—拉张和走滑—压剪”的演变特征(谢文彦等,2007)。在这一构造背景下,该区不同块体新生代的构造活动特征有明显的差异性,并使得位于这些块体上的沉积盆地其成因类型和演变过程等也各不相同。

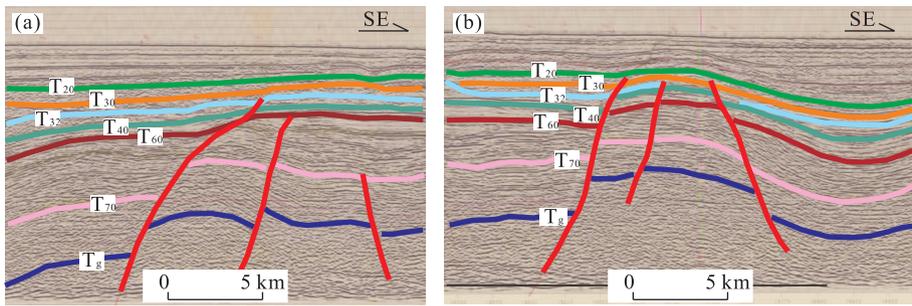


图 2 该区地震剖面截图(位置见图 1)

Fig. 2 Seismic section selected from study area

1.2 研究方法

此前对于该区的研究主要是依据地震资料和钻井数据等资料进行的,平衡剖面方面的研究相对较少.与直接利用地震剖面的解释资料相比,平衡剖面反演技术既可以检测地震剖面解释是否合理(蒋录全和刘光炎,1995),又可以为沿测线的构造变形进行定量分析(梁慧社等,2002),从而为盆地模拟和油藏模拟等研究提供理论和技术支持(张功成等,1996).

依据研究区 6 条地震剖面,对识别出的 T_g 、 T_{70} 、 T_{60} 、 T_{40} 、 T_{32} 、 T_{30} 和 T_{20} 共 7 个区域反射界面(图 2)进行层序划分,参照中海石油公司提供的时间-速度曲线(公式 1)对剖面进行时深转换,通过选取地震剖面上的较大断裂,使用 FlexDecomp 程序进行二维平衡剖面的回剥反演,得到了这些剖面在各个时期的构造演化图(图 3~8).

$$Y = -5.1578X^3 + 133.48X^2 + 712.06X - 2.4356, \quad (1)$$

上式, X 代表时间,单位为 s; Y 代表深度,单位为 m. 根据这些结果,对各剖面所反映的新生代以来的构造活动特征进行研究,分析区内主要沉积盆地的构造演化过程.

2 平衡剖面反演结果

2.1 Line-A 测线

Line-A 测线 NE 向切过曾母盆地西北部和北康盆地西部(图 1). 由于测线所经区域是由华南陆缘裂离而来(徐行等,2003; 张莉等,2003a; 姚永坚等,2005),因此晚白垩世—早始新世的拉张在基底形成了一系列垒堑构造(图 3f). 然而,由于该测线走向 NE,所以剖面上所显示的拉张并不明显. 晚始新世—晚渐新世沿该测线开始沉积,此后发生整体

沉积—沉降,断层持续活动至上新世(图 3e~3c). 此时,大部分断裂停止活动. 自第四纪以来,剖面上出现显著的沉降差异(图 3b),在 NE 侧(北康盆地内)发生大幅沉降,形成了一个较大的沉降中心(图 3a).

2.2 Line-B 测线

Line-B 测线为 NW 走向,与 Line-A 近乎垂直,主体部分穿过曾母盆地西北部,向 NW 延伸至万安盆地内(图 1). 与 Line-A 对比,该剖面(图 4)清晰地展现了 NW 向拉张所造成的影响,表现为 2 个特点:(1)早期拉张强烈,同沉积过程显著,断块活动活跃. 早期的张裂在基底上留下一系列 NE 向的地堑、半地堑构造,并开始接受沉积(图 4f). 随着拉张的持续,部分区域开始出现断块翘倾,并伴随着沉积的进行而形成同沉积构造(图 4e~4d);(2) T_{30} 界面以下地层发生强烈弯曲褶皱(图 4c~4b),而 T_{30} 界面以上的地层则相对平缓(图 4a). 这表明中—晚中新世该区经历了强烈的 NW 向挤压. 挤压活动一直持续到更新世,之后该区开始区域沉降(图 4a). 此外,大部分断裂也活动至更新世,表明之后该区构造活动相对稳定.

2.3 Line-C 测线与 Line-D 测线

测线 Line-C 与 Line-D 均为 NW 走向,近似平行地切过南薇西和北康两盆地(图 1). 平衡剖面结果显示,两条测线所经区域构造演化特征有着较为明显的差异性(图 5,6). 位于南西侧的 Line-C 剖面上,2 个盆地在 T_{40} 界面以前的构造演化相对稳定,均为拉张基底上整体发生沉降,无明显的沉积—沉降中心(图 5f~5d). 中中新世(T_{40})开始,沿测线在 SE 端发生地层褶皱变形,并逐渐往 NW 方向传播(图 5d~5c). 晚中新世时(T_{32}),南薇西盆地中部发生大幅沉降,形成了一个较大的沉降中心,早期的同沉积断层停止活动;剖面中部和 SE 部地层变形幅度加大,形成多个宽缓

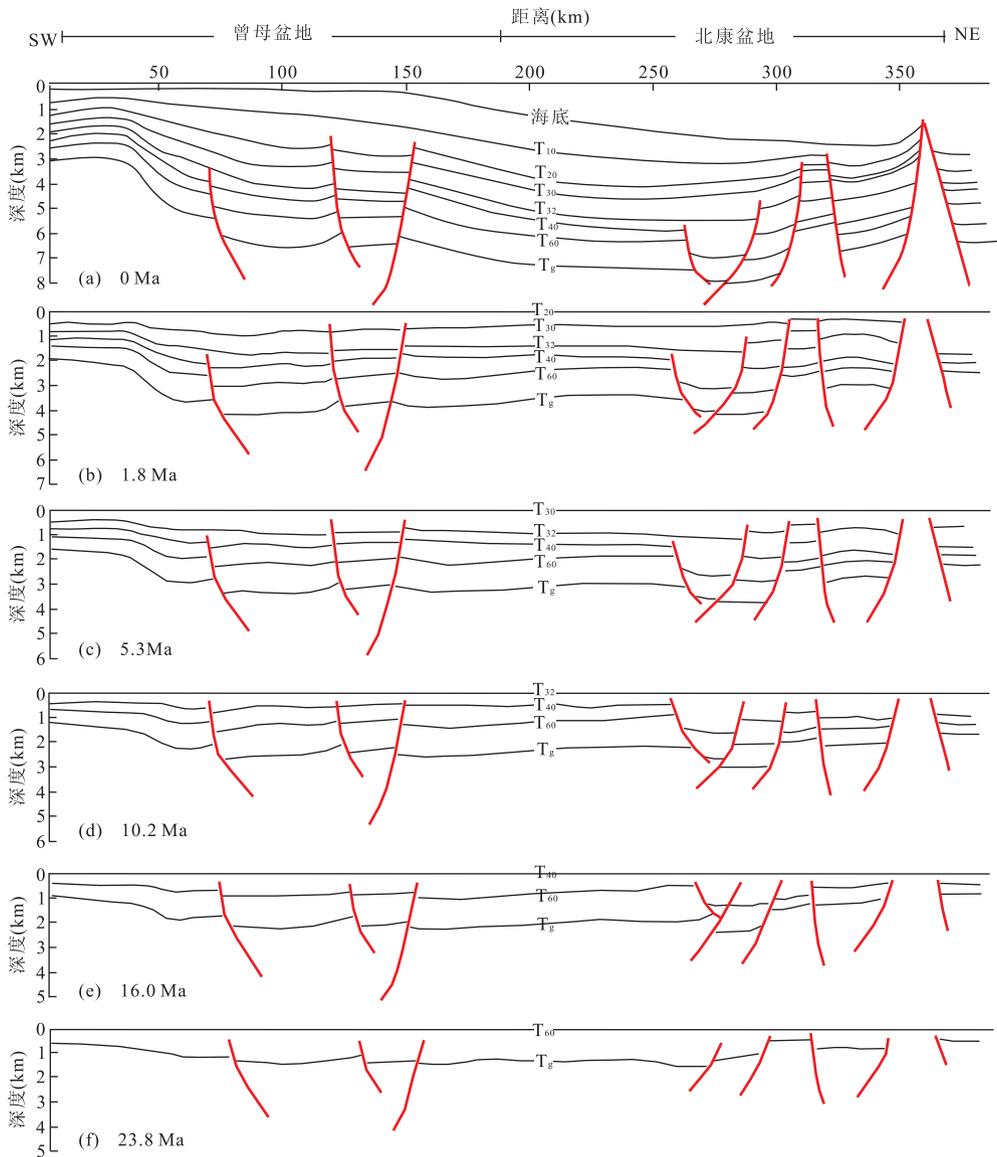


图 3 Line-A 测线平衡剖面结果

Fig. 3 Balanced section along Line-A profile

褶皱;同时大部分同沉积断裂停止活动(图 5b). 上新世以后,剖面中部和 NW 侧发生大范围沉降,形成了平缓的沉积层;但在 SE 侧的北康盆地内,挤压强度虽然有所减弱,但持续的挤压仍然引起地层隆起(图 5a),并且一直持续到第四纪.

相比之下,Line-D 剖面的基底拉张更显得强烈一些,发育了一系列垒堑和半地堑构造(图 6f). 渐新世至早中新世为同沉积阶段,同沉积断层活跃,局部发生块体旋转,并在剖面上形成了多个小规模的沉降中心(图 6e~6d). 中中新世,剖面上自 SE 侧开始发生 NW 向构造挤压,但强度相对于 Line-C 剖面稍弱,仅使得 T₃₂ 界面以下地层发生轻微弯曲(图 6c). 晚中新世,剖面 NW 侧的南薇西盆地也开始出

现强度较弱的挤压,部分同沉积断裂停止活动. 此后,沿该测线进入区域沉降阶段(图 6c~6b). 然而,由于挤压应力场继续存在,导致剖面中部发生隆起,并形成几个较大的沉降中心,以及多个小的沉降中心(图 6a).

2.4 Line-E 测线与 Line-F 测线

Line-E 与 Line-F 测线分别从 NW 向和 N-NNE 向近似垂直地切过万安盆地(图 1). 其中 Line-E 测线构造演化的主要特点是显著的地层翘倾和同沉积断裂的长期活跃(图 7). 该盆地以始新世末-渐新世初,形成的一系列 NE 向地堑、半地堑为雏形(姚伯初, 1997;图 7f, 8e),随后沿 Line-E 测线整体上发生沉降,各部位沉降速度大致相同,无明显的沉积-沉降中

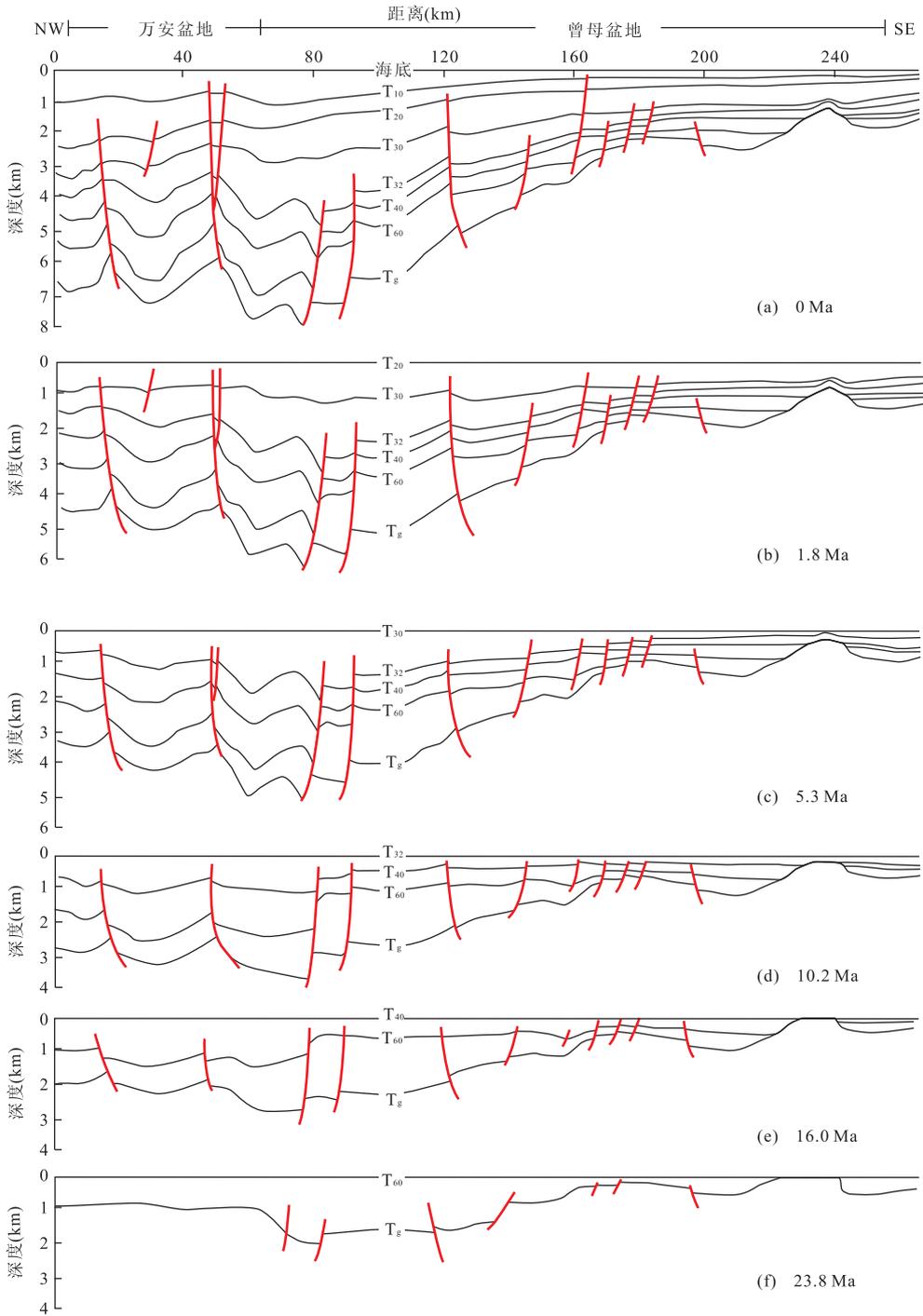


图 4 Line-B 测线平衡剖面结果
 Fig. 4 Balanced section along Line-B profile

心. 持续的拉张在该剖面上形成了特征鲜明的同沉积构造, 表现为: 在剖面两端, 断层两侧地层厚度不一致, 在剖面中部则地层大角度倾斜且沿倾斜方向厚度变大(图 7e~7c). 剖面上大部分断裂呈近似直立, 表明 NW 向拉张作用并不强烈, 断裂更多的是以走滑剪切的形式活动, 以至于上新世以前沉积的地层无明显的变形特征(图 7c~7b). 上新世开始, 剖面 NW 侧的

断裂停止活动, 并发生大幅沉降, 形成了一个较大的沉降中心; 剖面 SE 侧的断裂持续活动至第四纪, 并表现出正断特征(图 7b~7a). 由于沉降和断裂的持续活动, 使剖面上该断裂左侧的早期地层大幅向下弯曲(图 7a). 值得注意的是, 该测线内的大部分同沉积断层都断穿 T₂₀ 界面.

Line-F 测线尽管呈 N-NNE 走向, 但剖面上的

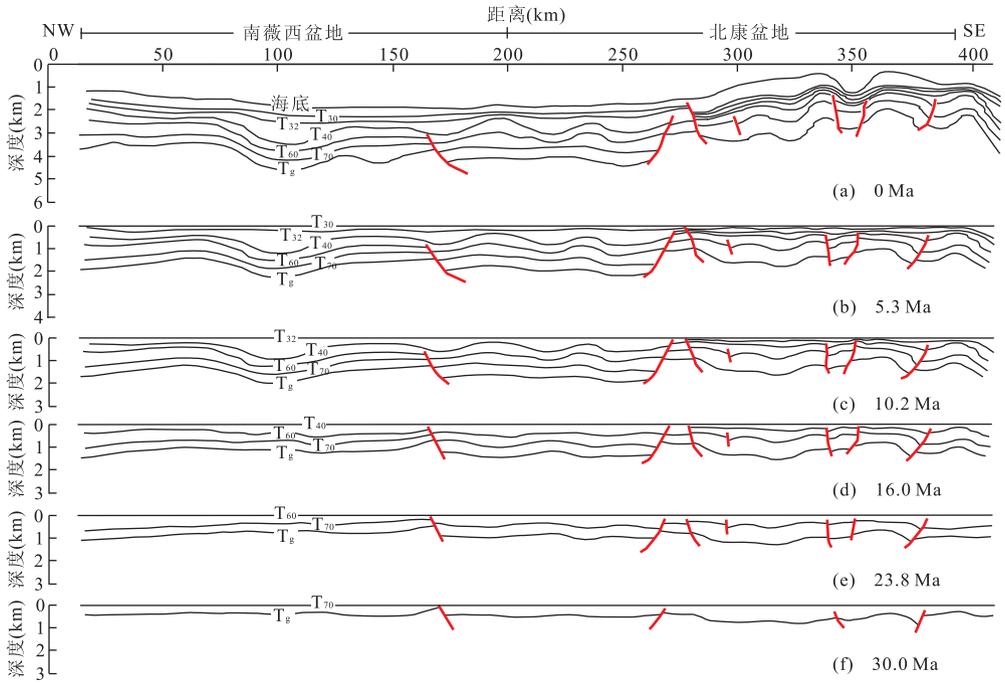


图 5 Line-C 测线平衡剖面结果

Fig. 5 Balanced section along Line-C profile

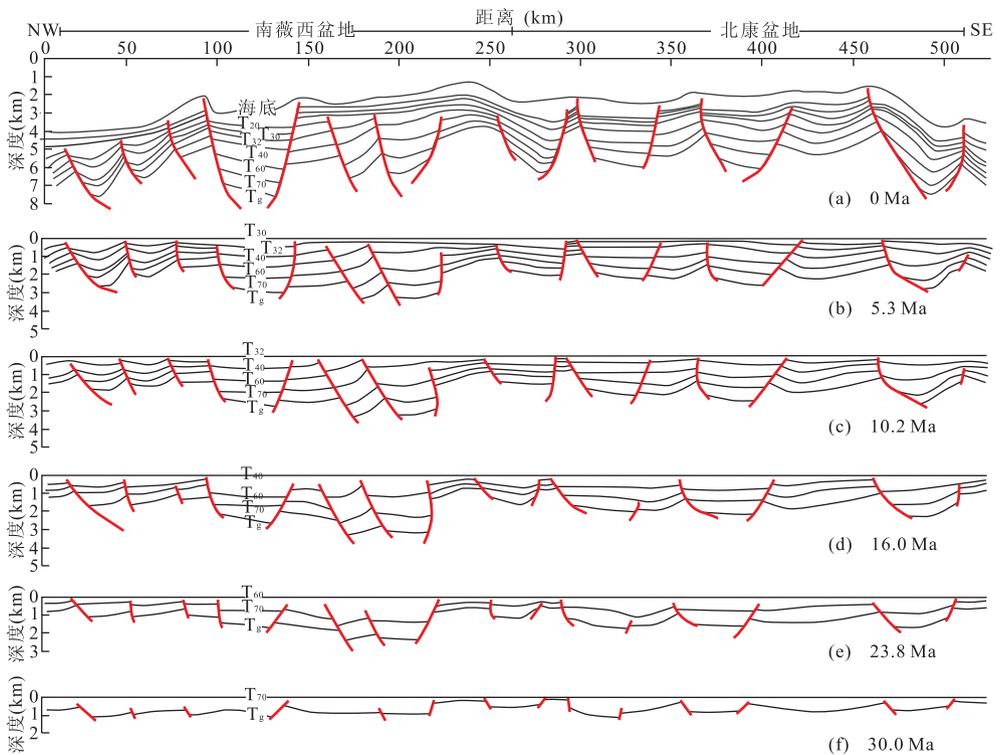


图 6 Line-D 测线平衡剖面结果

Fig. 6 Balanced section along Line-D profile

垒堑构造和同沉积特征比 Line-E 剖面显著(图 8), 显示该区基底在渐新世以前受到沿测线方向的拉张分量较为强烈. 基底上发育的地堑和半地堑构成了

早期盆地内的 3 个大的沉降中心(图 8e); 随后的沉积伴随着拉张状态的持续, 同沉积构造发育, 局部发生块体翘倾(图 8d~8c). 上新世以后, 剖面上 SW

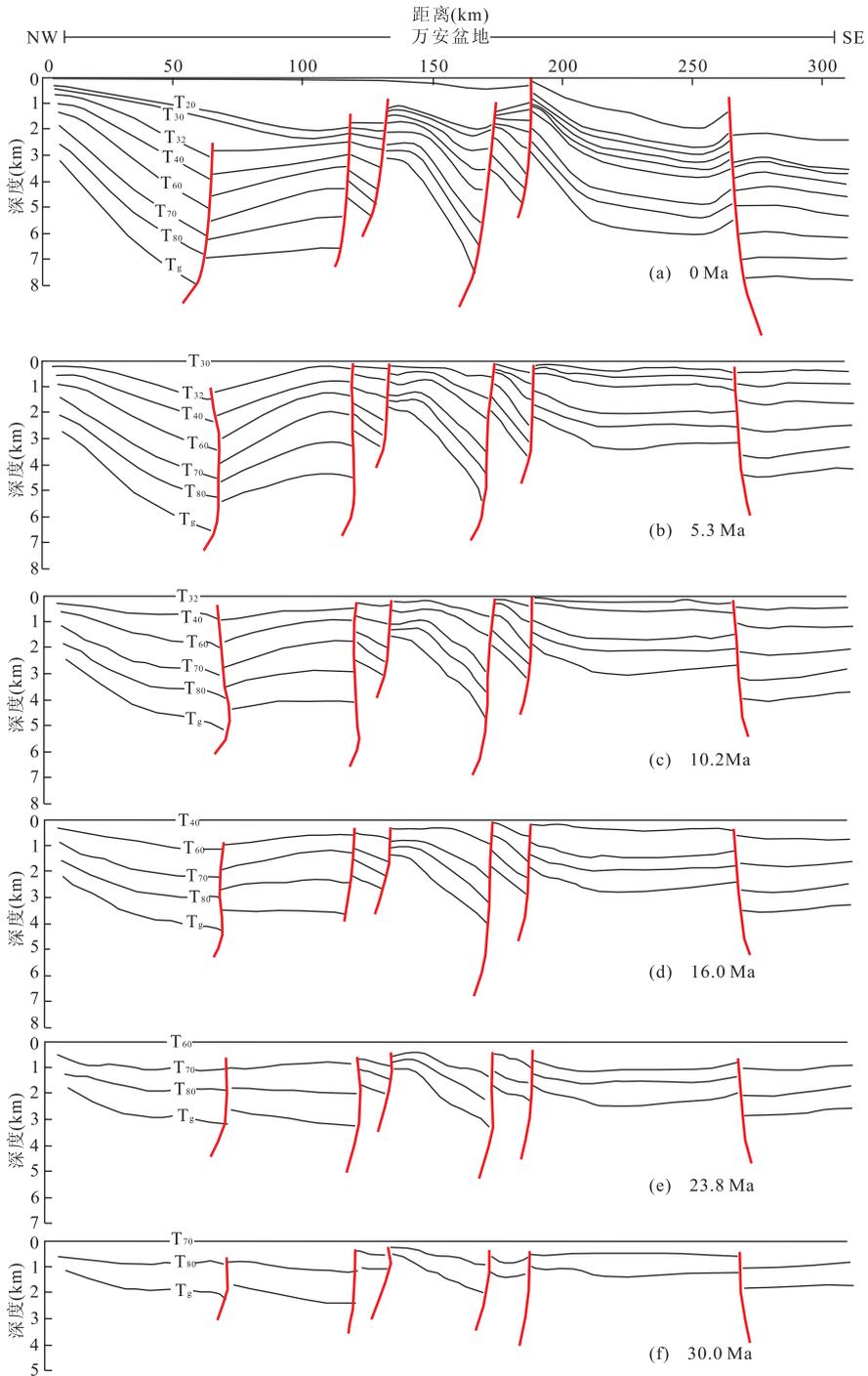


图 7 Line-E 测线平衡剖面结果

Fig. 7 Balanced section along Line-E profile

侧断裂停止活动,并发生大幅度沉降,形成一个大的沉积—沉降中心(图 8b~8a). 剖面中部和 NE 部的断层则一直保持活跃,并且断穿 T₃₀ 界面.

3 新生代构造活动特征

上述各测线平衡剖面结果的分析表明,该区新

生代以来的构造活动具有明显的分区性特征;而不同区域又有时间上的阶段性.

具体来说,分区性就是以万安断裂和廷贾断裂为界,将研究区分割为南沙块体、曾母块体和万安盆地 3 部分. 这 3 个块体的新生代构造活动特征有着显著的差异. 差异性既表现在构造活动的时间上,又表现在主导因素上.

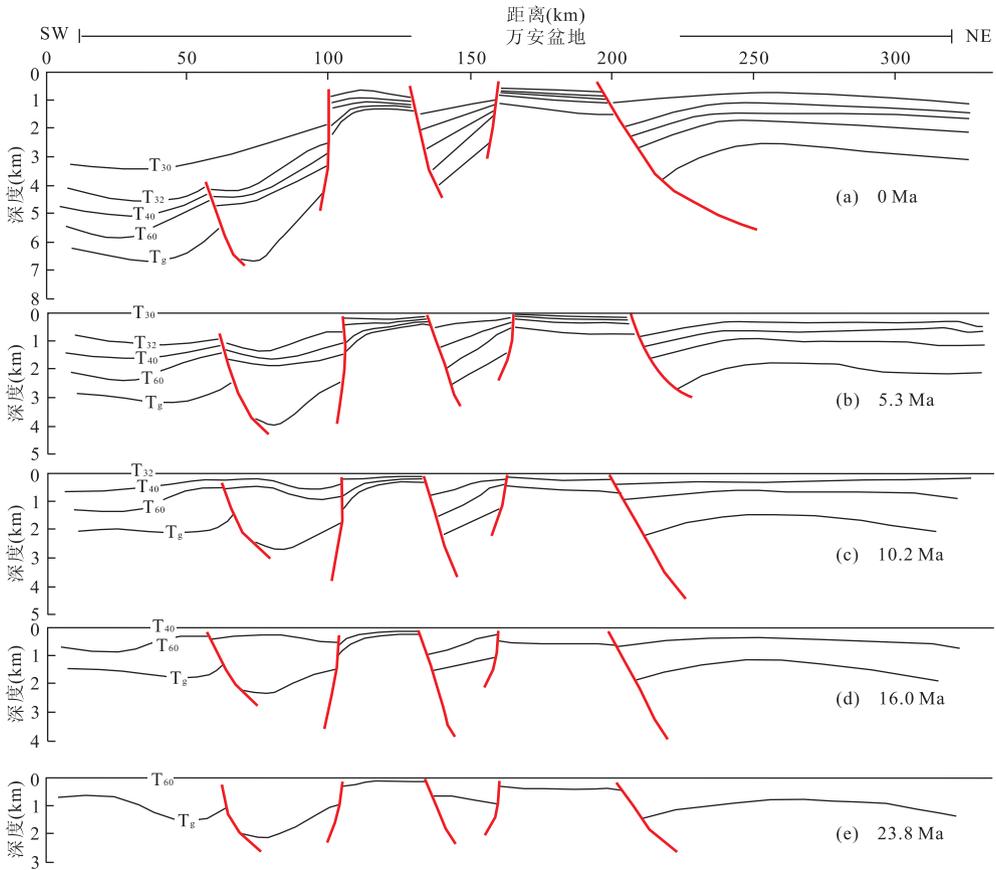


图8 Line-F测线平衡剖面结果

Fig. 8 Balanced section along Line-F profiles

3.1 南沙块体

很显然,南沙块体构造活动主要受NW向构造应力场的影响,并表现出了明显的分段性特征.以中新世的南沙运动为分界点,前期该区以NW向张性构造活动为主导,后期以NW向压性构造活动为主导.前期的张性构造活动(主要表现为断裂活动)继承自中生代末—始新世的陆缘张裂,并通过中晚始新世的西卫运动和早晚渐新世的南海运动得到加强.具体表现为,早期的NW向拉张导致了基底上广泛的NE向张性断裂,形成了一系列的垒堑构造.随着拉张应力场的不断加强,这些张性断裂一直活动到中中新世,造成了较大的水平断距和垂直断距,导致了局部块体的翘倾、旋转(图4,6)以及盆地内较高的沉降量.这些张性断层的活动与盆地内的沉积—沉降同时进行,控制了盆地的发育,并形成了特征鲜明的同沉积构造.

中—晚中新世南沙运动以后,南沙块体的构造应力场由拉张转变为挤压.此时,早期的张性断裂除小部分停止活动外,大部分转为压性或压扭性继续活动.区内 T_{30} (南薇西盆地南部和北康盆地中部,

图5b)或 T_{32} (南薇西盆地北部和北康盆地东北部,图6c)界面以下的地层发生挤压变形,表现为宽缓的褶皱.在挤压强烈的地方,如北康盆地的东北和中北部(图5a,6a),形成挤压隆起.此后,除北康盆地北部继续挤压隆起并影响到第四纪地层(图5a,6a)之外,该区构造活动表现相对平静.

3.2 万安盆地

虽然早期也与其他块体一样受到NW向拉张作用,在NW向剖面上有张性断裂发育(图7),但其影响并不如NE向剖面上所展示出的垒堑构造明显(图8),表明万安盆地在基底裂陷阶段的主导因素并非NW向的拉张作用,而是盆地东侧万安断裂的走滑剪切(王嘹亮等,1996;姚伯初,1997),以及该断裂的派生断裂(图7).此后的西卫运动、南海运动,以及对研究区有着较大影响的南沙运动,在剖面上并无明显迹象.相反,该盆地直至上新世一直保持较为稳定的整体沉积—沉降.上新世以后,盆地的SE侧发生大幅沉降,NW向剖面上甚至出现正断活动(图7a),显示由于万安断裂的调节作用,南沙运动所产生的NW向挤压未能在该区形成显著影响.因此,新生代以来万安

盆地构造活动的阶段性并不明显。

3.3 曾母块体

与万安盆地相比,曾母盆地在构造活动特征上与其东北侧南沙块体的差异要小得多。曾母盆地早期也经历了拉张作用,西卫运动和南海运动使得拉张加强;南沙运动使得该区由拉张转为挤压,形成大幅褶皱(图 4c~4a),对比南沙块体内发育的宽缓褶皱,这可能表明曾母块体所受挤压程度比南沙块体强烈。挤压活动一直持续到更新世,此后才开始区域沉降。因此,曾母块体新生代以来的构造活动具有与南沙块体类似的阶段性特征。

4 主要盆地的构造演化

对于该区主要盆地的构造演化,不少学者都对其进行了分析(姚永坚等,2005;姚伯初和刘振湖,2006),本文仅就上述新认识对该区主要沉积盆地的构造演化进行简要讨论。总体上,该区主要沉积盆地的构造演化可分为 4 个阶段,即拉张裂陷阶段、同沉积阶段、挤压阶段和区域沉降阶段。但由于盆地成因类型不同,因此 4 个阶段在不同盆地有着不同的表现。

4.1 曾母盆地

该盆地的演化始于晚渐新世以前的基底拉张,后随着古南海俯冲殆尽、南沙地块与加里曼丹岛的碰撞而正式开始发育(姚伯初等,2004;姚伯初和刘振湖,2006)。晚渐新世—中中新世,盆地处于同沉积阶段,沿 NW 方向发育了同沉积构造;晚中新世,南沙运动和廷贾断裂的走滑剪切(姚永坚等,2005)导致 NW 方向上 T_{30} 以下地层挤压变形,形成宽缓褶皱,部分断层停止活动(图 3,4)。更新世以后,盆地开始区域沉降,除少数断裂活动至第四纪外,盆地内构造活动较为平静。

4.2 北康盆地

北康盆地在早期断陷阶段是东北强(Line-D 所经区域,图 6f),往中部渐弱(Line-C 所经区域,图 5f),这一特征在同沉积阶段得到继承,但进入挤压隆升阶段后则表现相反。中部 SE 侧因挤压而大幅隆起(图 5a),东北部则挤压不明显(图 6b~6a)。中部的挤压隆升一直持续到第四纪,使得沉降特征并不明显(图 6a)。东北部则从中—晚中新世(T_{32})以后便开始区域沉降,但控制沉降中心的同沉积断层持续活跃至晚中新世(断穿 T_{30} ,图 5c~5a)。

4.3 南薇西盆地

与北康盆地类似,南薇西盆地的构造演化也具

有明显的南、北差异性。拉张裂陷和同沉积阶段,盆地北部张性断裂发育,形成多个垒堑构造(图 6f),同沉积特征最为明显(图 6e~6d);而南部则张性断裂稀少(图 5f),同沉积阶段不发育。中—晚中新世,进入挤压阶段后,南部 T_{32} 、北部 T_{30} 以下地层变形,形成了宽缓褶皱(图 5c,图 6c~6b);北部同沉积性也减弱。晚中新世以后,盆地进入区域沉降阶段,南、北部剖面均在中部位置大幅沉降,形成了较大的沉积中心。

4.4 万安盆地

万安盆地的演化主要受其东侧的万安断裂控制,因此其发育与万安断裂的构造活动息息相关。始新世末—早渐新世,盆地内发育 NE 的张扭断裂(图 7f);晚渐新世,盆地发育 NW 向垒堑构造(图 8e)。晚渐新世—上新世,盆地处于同沉积阶段(图 7e~7c,8d~8c)。上新世以后,盆地进入区域沉降阶段,受万安断裂由左旋剪切转为右旋剪切影响而发生快速、大幅沉降(图 7b~7a,8b~8a),在中部凹陷和南部凹陷内发育巨厚沉积。

5 结论

利用平衡剖面反演的方法,对该区新生代以来的构造活动特征和盆地演化过程进行研究。结果发现,该区新生代以来的构造活动具有显著的分带性,表现为以区内的深大断裂为界,所分隔的几个块体的构造活动差异显著,即构造活动的时间阶段性不同和主导因素不同。

南沙块体新生代以来的构造活动其主导因素为 NW 向构造应力,构造活动在时间上以中—晚中新世南沙运动为界,前张后压,具有明显的阶段性。万安盆地的构造活动主要受万安断裂控制和调节,且构造活动的阶段性非常不明显;曾母块体的构造活动特征与南沙块体类似,但各阶段具体表现不同。据此将该区主要沉积盆地的演化分为 4 个阶段,即裂陷阶段、同沉积阶段、挤压阶段和区域沉降阶段。4 个阶段又因盆地成因类型不同而有所不同:北康盆地裂陷和挤压阶段突出,沉降阶段缺失;南薇西盆地裂陷阶段南弱北强;万安盆地缺少挤压阶段;曾母盆地则 4 个阶段均非常明显。

References

Franke, D., Barckhausen, U., Heyde, I., et al., 2008. Seismic images of a collision zone offshore NW Sabah/Borneo.

- Marine and Petroleum Geology*, 25(7): 606—624. doi: 10.1016/j. marpetgeo. 2007. 11. 004
- Gao, H. F. , 2002. Comparison study of tectonic evolution between Nanweixi basin and Nanweidong basin, South China Sea. *Geological Research on the South China Sea*, 13: 35—44 (in Chinese with English abstract).
- Hall, R. , Ali, J. R. , Anderson, C. D. , et al. , 1995. Origin and motion history of the Philippine sea plate. *Tectonophysics*, 251(1—4): 229—250. doi: 10.1016/j. marpetgeo. 2007. 11. 004
- Hinz, K. , Fritsh, J. , Kempfer, 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
- Hinz, K. , Schlünter, H. U. , 1985. Geology of the dangerous grounds, South China Sea, and the continental margin off Southwest Palawan; results of SONNE cruises SO-23 and SO-27. *Energy*, 10(3—4): 297—315. doi: 10.1016/0360—5442(85)90048—9
- Hutchinson, 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
- Jiang, L. Q. , Liu, G. Y. , 1995. Review of balanced cross section technique. *South China Oil-Gas Geology*, 1(3): 39—46(in Chinese with English abstract).
- 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).
- Liang, H. S. , Zhang, J. Z. , Xia, Y. P. , 2002. Balance section and application for oil and gas exploration. Earthquake Publishing Company, Beijing, 2—3 (in Chinese).
- Liu, Z. H. , 2005. Distribution of sedimentary basins and petroleum potential in southern South China Sea. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(3): 410—417 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Rangin, G. , Bellon, H. , Benard, F. , et al. , 1990. Neogene arc-continent collision in Sabah, northern Borneo (Malaysia). *Tectonophysics*, 183(1—4): 305—319. doi: 10.1016/0040—1951(90)90423—6
- Sun, L. T. , Sun, Z. , Zhan, W. H. , et al. , 2010. Petroleum potential prediction of the Lile basin in Nansha. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(1): 137—145 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, B. , Hayes, D. E. , 1980. The tectonic evolution of the South China Sea. In: Hayes, D. E. , ed. , The tectonic and geologic evolution of Southeast Asian seas and islands, Part 1. Geophys. Monogr. , AGU, Washington, D. C. , 89—104.
- Wan, L. , Wu, N. Y. , Yao, B. C. , et al. , 2003. Cenozoic tectonic movement and the genetic discussion in Nansha Sea area. *Geological Research of South China Sea*, 15: 8—15 (in Chinese with English abstract).
- Wan, L. , Wu, N. Y. , Zeng, W. J. , et al. , 2004. Crustal structure in Nansha and its adjacent area. *Geological Research of South China Sea*, 16: 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. L. , Wu, J. M. , Zhong, G. J. , 1996. The evolution of paleogeography of Cenozoic in Wan'an basin. *Geological Research on South China Sea*, 8: 48—61 (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).
- Xu, X. , Yao, Y. J. , Wang, L. F. , 2003. Cenozoic sedimentation of Nanweixi basin, the southern South China Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 17(3): 170—175 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C. , 1996. Tectonic evolution of the South China Sea in Cenozoic. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 16(1): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C. , 1997. A rediscussion on the tectonic evolutionary history of the Wan'an basin in Nansha area. *Tropic Oceanology*, 16(3): 15—22 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C. , Liu, Z. H. , 2006. Sedimentary basins and petroleum resources in Nansha offshore area, South China Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 18(3): 150—160 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C. , Wan, L. , Wu, N. Y. , 2004. Cenozoic plate tectonic activities in the Great South China Sea area. *Geology in China*, 31(2): 113—122 (in Chinese with English abstract).
- Yao, Y. J. , Xia, B. , Xu, X. , 2005. Tectonic evolution of the main sedimentary basin in southern area of the South China Sea. *Geological Research of South China Sea*, 17: 1—11 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, G. C., Zhu, D. F., Zhou, Z. B., 1996. Extensional and inversion structural styles of Songliao basin. *Petroleum Exploration and Development*, 23(2): 16–20 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Li, W. C., Zeng, X. H., 2003a. Stratigraphic sequence and hydrocarbon potential in Lile basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 25(5): 469–472.
- Zhang, L., Wang, L. L., Yi, H., 2003b. The formation and evolution of Beikang basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 17(4): 245–248 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., Wu, S. M., Chen, H. Z., 2005. Some remarks on the tectonic evolution of Nansha and its adjacent regions in South China Sea. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(3): 339–345 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. L., Zhang, G. C., Zhong, K., et al., 2010. South China Sea: oil and gas outlook. *Engineering Sciences*, 12(5): 46–50 (in Chinese with English abstract).
- 万玲, 吴能友, 姚伯初, 等, 2003. 南沙海域新生代构造运动特征及成因探讨. *南海地质研究*, 15: 8–15.
- 万玲, 吴能友, 曾维军, 等, 2004. 南沙及其邻近海域地壳结构特征. *南海地质研究*, 16: 1–9.
- 王燎亮, 吴进民, 钟广见, 1996. 南沙海域西南部新生代古地理演化. *南海地质研究*, 8: 48–61.
- 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.
- 徐行, 姚永坚, 王立非, 2003. 南海南部海域南薇西盆地新生代沉积特征. *中国海上油气(地质)*, 17(3): 170–175.
- 姚伯初, 1996. 南海海盆新生代的构造演化史. *海洋地质与第四纪地质*, 16(1): 1–13.
- 姚伯初, 1997. 南沙群岛万安盆地构造演化史再探讨. *热带海洋*, 16(3): 15–22.
- 姚伯初, 刘振湖, 2006. 南沙海域沉积盆地及油气资源分布. *中国海上油气*, 18(3): 150–160.
- 姚伯初, 万玲, 吴能友, 2004. 大南海地区新生代板块构造活动. *中国地质*, 31(2): 113–122.
- 姚永坚, 夏斌, 徐行, 2005. 南海南部海域主要沉积盆地构造演化特征. *南海地质研究*, 17: 1–11.
- 张功成, 朱德丰, 周章保, 1996. 松辽盆地伸展和反转构造样式. *石油勘探与开发*, 23(2): 16–20.
- 张莉, 李文成, 曾祥辉, 2003a. 礼乐盆地地层发育特征及其与油气的关系. *石油实验地质*, 25(5): 469–472, 480.
- 张莉, 王燎亮, 易海, 2003b. 北康盆地的形成与演化. *中国海上油气(地质)*, 17(4): 245–248.
- 周蒂, 吴世敏, 陈汉宗, 2005. 南沙海区及邻区构造演化动力学的若干问题. *大地构造与成矿学*, 29(3): 339–345.
- 朱伟林, 张功成, 钟锴, 等, 2010. 中国南海油气资源前景. *中国工程科学*, 12(5): 46–50.

附中文参考文献

- 高红芳, 2002. 南沙中部海域南薇西盆地、南薇东盆地构造演化差异性分析. *南海地质研究*, 13: 35–44.
- 蒋录全, 刘光炎, 1995. 平衡剖面技术综述. *南方油气地质*, 1(3): 39–46.
- 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.
- 梁慧社, 张建珍, 夏义平, 2002. 平衡剖面及其在油气勘探中的应用. 北京: 地震出版社, 2–3.
- 刘振湖, 2005. 南海南沙海域沉积盆地与油气分布. *大地构造与成矿学*, 29(3): 410–417.
- 孙龙涛, 孙珍, 詹文欢, 等, 2010. 南沙海域礼乐盆地油气资源潜力. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(1): 137–145.