

doi:10.3799/dqkx.2011.016

琼东南盆地深水区构造格局和幕式演化过程

雷超^{1,2}, 任建业^{1,2}, 裴健翔³, 林海涛¹, 尹新义¹, 佟殿君¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中海石油有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

摘要: 基于大量琼东南盆地深水区高精度的地质—地球物理和钻井资料解释, 确立了该盆地“南北分带, 东西分块”的基本构造格局; 通过构造—地层、沉降史和沉降中心厘定等方面的综合研究, 在琼东南深水盆地中深入描述和分析了 T70 重要的构造变革界面特征, 该界面之下发育了一系列分散的、NE 向展布的小型断陷盆地群, 该界面之上一直到 T60 界面发育时期, 盆地的沉降中心逐渐迁移到位于琼东南盆地中央坳陷区的、呈 NE-WE-NWW 弧形展布的大型断坳式盆地内, 该断坳盆地与下伏小型断陷盆地群构成显著的叠加关系; 以控盆边界断层的性质和几何学分布, 确定下伏的 NE 向展布的小型断陷盆地群受控于 NW-SE 向拉伸应力场, 而上覆的断坳盆地由近 SN 向拉伸应力作用所形成; 区域对比表明该界面广泛分布于南海北部大陆边缘盆地中, 具有区域性分布的特征; 生物地层和区域对比表明该界面年龄为 32 Ma, 与南海初始扩张的年龄一致。因此, 该界面是一个发育于南海北部的、代表了南海扩张开始的一个区域性构造变革界面, 该界面的发育导致了琼东南盆地深水区盆地结构和构造演化的复杂性, 以该界面为基础, 结合盆地充填序列中的其他重要界面和盆地的沉降史分析, 将盆地的构造演化划分为断陷、断坳、裂后热沉降和加速沉降 4 个构造演化幕, 从而确定了该盆地具有典型的幕式演化特征; 详细讨论了盆地周缘板块运动学重组事件和岩石圈深部活动对琼东南盆地幕式发育过程的控制机制。

关键词: 南海; 琼东南盆地; 构造格局; 幕式演化; 动力学机制; 沉积学。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2011)01-0151-12

收稿日期: 2010-05-31

Tectonic Framework and Multiple Episode Tectonic Evolution in Deepwater Area of Qiongdongnan Basin, Northern Continental Margin of South China Sea

LEI Chao^{1,2}, REN Jian-ye^{1,2}, PEI Jian-xiang³, LIN Hai-tao¹, YIN Xin-yi¹, TONG Dian-jun¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. China National Offshore Oil Corporation Limited, Zhanjiang 524057, China

Abstract: Based on geological structural interpretation of a number of available high-resolution geological-geophysical and drilling data etc., a tectonic framework with zonal array in N-S direction and block division in W-E direction was established in deepwater area of Qiongdongnan basin (QDNB). A key tectonic revolutionary boundary, T70, was identified in QDNB by integrated analysis of tectono-stratigraphy, subsidence history and subsided depocentre migration. A series of small distributed NE-trending faulted basins developed widely below this boundary, while basin depocentre of QDNB above T70 boundary is located in center depression area trending NE-WE-NWW, forming a great fault-sag type basin, which is superimposed clearly over underlying faulted basin group above. Analyses of genetic type and geometry of basin-boundary fault indicate that NW-SE extensional tectonic stress field strongly controlled development of small distributed NE-trending faulted basin group underlying T70 boundary, and nearly SN extensional tectonic stress field resulted in formation of fault-sag basin over this boundary. The T70 boundary can be found and traced in northern continental margin basins of South China Sea. The evidence of regional and biostratigraphical correlation shows that the age of this boundary is 32 Ma, which is consistent with the time of initial spreading

基金项目: 国家重点基础研究发展规划“973”项目(No. 2007CB41170502); 国家自然科学基金(No. 40672089); 博士点基金(No. 20070491004); 2009 年美国石油地质学家学会研究生科研基金(AAPG-In-Grant)。

作者简介: 雷超(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事沉积盆地动力学及其能源效应研究。E-mail: chaolei@hotmail.com

of South China Sea. Thus T70 boundary is a regional tectonic revolutionary boundary. The development of this boundary leads to complexity of tectonic framework and structure evolution. According to the T70 boundary, combining with other important boundaries identified in previous literatures in the basin filling sequence and subsidence analysis, four tectonic evolution episodes of QDNB, which are syn-rifted episode, fault-sag episode, post-rifted thermal subsidence episode and post-rifted accelerating subsiding episode, are proposed in this paper. Finally, Cenozoic lithospheric dynamic, kinematical reorganization of plates circum-South China Sea controlling on these tectonic episodes are discussed in depth.

Key words: South China Sea; Qiongdongnan basin; tectonic framework; episodic evolution; dynamic mechanics; sedimentology.

近年来,世界范围内的深水地区油气勘探和实践不断取得重大突破,除了墨西哥湾、巴西坎波斯湾盆地和西非等 3 大深水油气勘探的热点地区外,在俄罗斯、挪威和东南亚的深水地区也不断发现大型油气田.我国南海北部深水区与国外获得巨大成功的深水油气勘探区较为类似,其勘探潜力广阔.2006 年 6 月我国在南海珠江口盆地白云凹陷水深 1 480 m 处实施的 LW3-1-1 深水探井,获得了南海北部深水区天然气勘探的重大突破,显示了南海北部大陆边缘良好的油气勘探前景.

琼东南盆地深水区位于南海北部,与珠江口盆地处于同一区域构造带,过去由于勘探程度低,地震测线和勘探钻井缺少,限制了对该盆地深水区准确、全面的认识,制约着盆地深水区油气勘探以及对整个南海演化史的深刻理解.有关对盆地油气成藏动力学的研究,如盆地埋藏史、生烃动力学、储盖条件和成藏组合等,认为盆地深水区具有成为大、中型气田的条件(Huang *et al.*, 2003; 王振峰等, 2003; 陶维祥等, 2006; 何家雄等, 2008; 朱伟林, 2009).

本文基于研究区高精度的地质—地球物理和钻井新资料,对南海北部琼东南盆地深水区进行盆地结构、构造和演化方面的详细解释和分析,确定深水区盆地的结构型式和充填序列样式,建立盆地构造格局;在此基础上,通过关键构造变革界面的识别和分析、盆地沉降史回剥和盆地沉降中心厘定,确定盆地新生代演化过程;最后,讨论了盆地形成与演化的动力学背景.

1 基本地质概况

南海是西太平洋一个独特的边缘海,夹持在印澳、欧亚和太平洋板块的交汇之处,其四周的大陆边缘包含了被动型、主动型和转换型 3 大主要的大陆边缘的类型(Xia *et al.*, 1995; 龚再升等, 1997, 2004).而琼东南盆地深水区位于南海北部大陆边缘,是新生代形成的断陷盆地,盆地的北部为我国海

南岛,东部为珠江口盆地,而西部与莺歌海盆地以一号断层为界,盆地的南部为西沙群岛(图 1a).

琼东南盆地的基底由前新生代的火成岩、变质岩及沉积岩组成.盆地的充填序列则主要由新生代和第四系地层组成,从下往上依次为始新统,渐新世的崖城组和陵水组,中新世的三亚组、梅山组和黄流组,上新世的莺歌海组以及第四系地层.盆地深水区以“下断上拗”的典型的被动大陆边缘构造—层序样式为特征(Taylor and Hayes, 1983).在地震剖面上, T60 为断拗转换期形成的裂后不整合(breakup unconformity boundary),该界面将盆地充填和演化序列划分为裂陷阶段和裂后阶段(龚再升等, 1997),而且始新统、崖城组和陵水组地层是主要的烃源岩发育层位(Zhong *et al.*, 2004).

2 深水盆地构造格局特征

如图 1b 所示,琼东南盆地内主要发育了北东、北西和东西向 3 组断裂,其中发育于琼东南盆地中部的 2 号断层是该盆地中规模最大、也是最重要的一条断裂带,该断裂带构成了北部陆架浅水区和南部陆坡深水区的分界线,在南部陆坡深水区内还发育 11 号、13 号断层等规模比较大的断裂.以上述这些断裂为界可以将琼东南盆地从北到南划分出北部隆起区、中央拗陷区和南部隆起区 3 个一级构造单元(图 1b);其中,北部隆起区发育 NE 向断层控制的一系列小型地堑和半地堑,包括崖北凹陷、崖南凹陷、松东凹陷和松西凹陷;中央拗陷区规模巨大,可进一步划分为北部拗陷带、中央低凸起和南部拗陷带 3 个二级构造单元(图 1c),包含乐东凹陷、陵水凹陷、松南凹陷、宝岛凹陷、长昌凹陷和北礁凹陷等凹陷.在中央拗陷区西部乐东、陵水、松南凹陷的控盆断层为 NE 向,而宝岛、长昌凹陷则近 EW 向和 NW 向断层控制了凹陷的发育;南部隆起区主要发育一系列 NE 向展布的小型半地堑盆地;总体上,整个琼东南盆地表现为一个大型的、不对称的、以中央

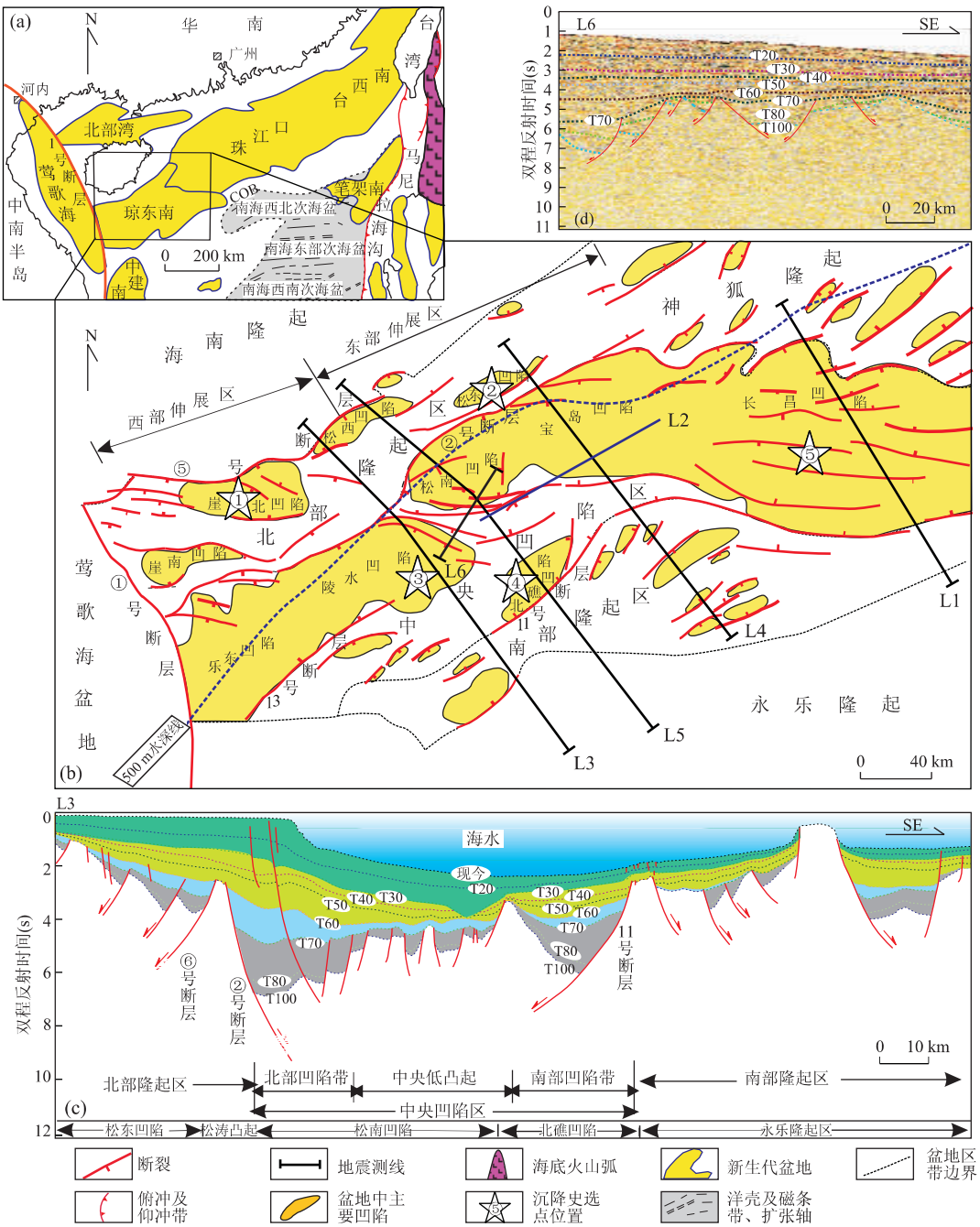


图 1 琼东南盆地地质背景及其构造单元划分

Fig. 1 Regional geological setting and its tectonic unit division of QDNB

图 1a 为琼东南盆地所处区域背景;图 1b 为琼东南盆地构造格局图;图 1c 为图 1b 中 L3 地震解释剖面;图 1d 为盆地“东西分块”构造转换带“堑垒”构造样式特征;图中 L1、L2…L6 为图 1 和图 3 地震剖面平面位置

坳陷区为中心的复式地堑盆地系。

另外,地震资料揭示,在盆地的东部和西部存在一条 NW 向构造带,该构造带位于陵水凹陷和松南凹陷之间,在平面上为系列近 NWW 向断裂带组成(图 1b),在地震剖面上为显著的“堑垒”结构(图 1d),该构造带将盆地划分为东部伸展区和西部伸展区,而且其两侧盆地性质发生变化,如在北部隆起

区,以该构造带为界在西部伸展区,控凹断层倾向为 SE 方向,而在东部伸展区为 NW,即北部隆起区盆地的极性由西向东发生改变,由西部的南倾转变为中东部的北倾,所以该“堑垒带”具有构造转换带的性质特征。从上所述,琼东南盆地总体构造格局表现为“南北分带,东西分块”的基本特征。

3 深水盆地幕式演化过程分析

3.1 T70 盆地构造层序界面特征

前人研究曾识别出一些盆地内重要的构造界面,如图 2 所示,T100 为盆地的基底初始破裂面,代表新生代盆地开始发育(Ru and Pigott, 1986;龚再升等,1997,2004);T60 为盆地的裂后不整合界面,分隔了盆地的同裂陷阶段和裂后阶段演化(龚再升等,1997);T30 为盆地裂后期演化中加速沉降开始的一个界面(佟殿君等,2009). 本次研究中,进一步描述和深入分析了在同裂陷阶段充填序列中 T70 为重要的构造界面,该界面具有重要的构造变革意义.

图 3 是过琼东南盆地区域性大剖面,从图 3-L1 剖面可见,剖面中部的深层发育一系列小型的半地

堑或地堑式断陷盆地,这些盆地的控盆边界断层可以在剖面上可靠地标定,其共同的特征是这些边界断层均上延到一个统一的界面中止,该界面对其以下地层的削截结构十分清晰,界面以上则表现为显著的逐层上超的反射结构(如图 3-L1 的局部放大图);此外,该界面以上是一个发育规模比界面之下盆地大的多的不对称地堑式盆地,该界面即为本次研究重新标定的 T70.

在一系列琼东南盆地的区域性大剖面(图 3-L1、L2、L3、L4 和图 1c)上,T70 界面均可以追踪和对比,说明了 T70 界面的发育规模覆盖整个琼东南盆地,具有区域性分布的特征. 平面构造制图表明(图 4),T70 界面上下盆地的断裂规模和分布格局有显著变化,在 T70 界面之下断层发育数量众多,规模小,主要呈 NE 向展布,并控制了小型孤立的断

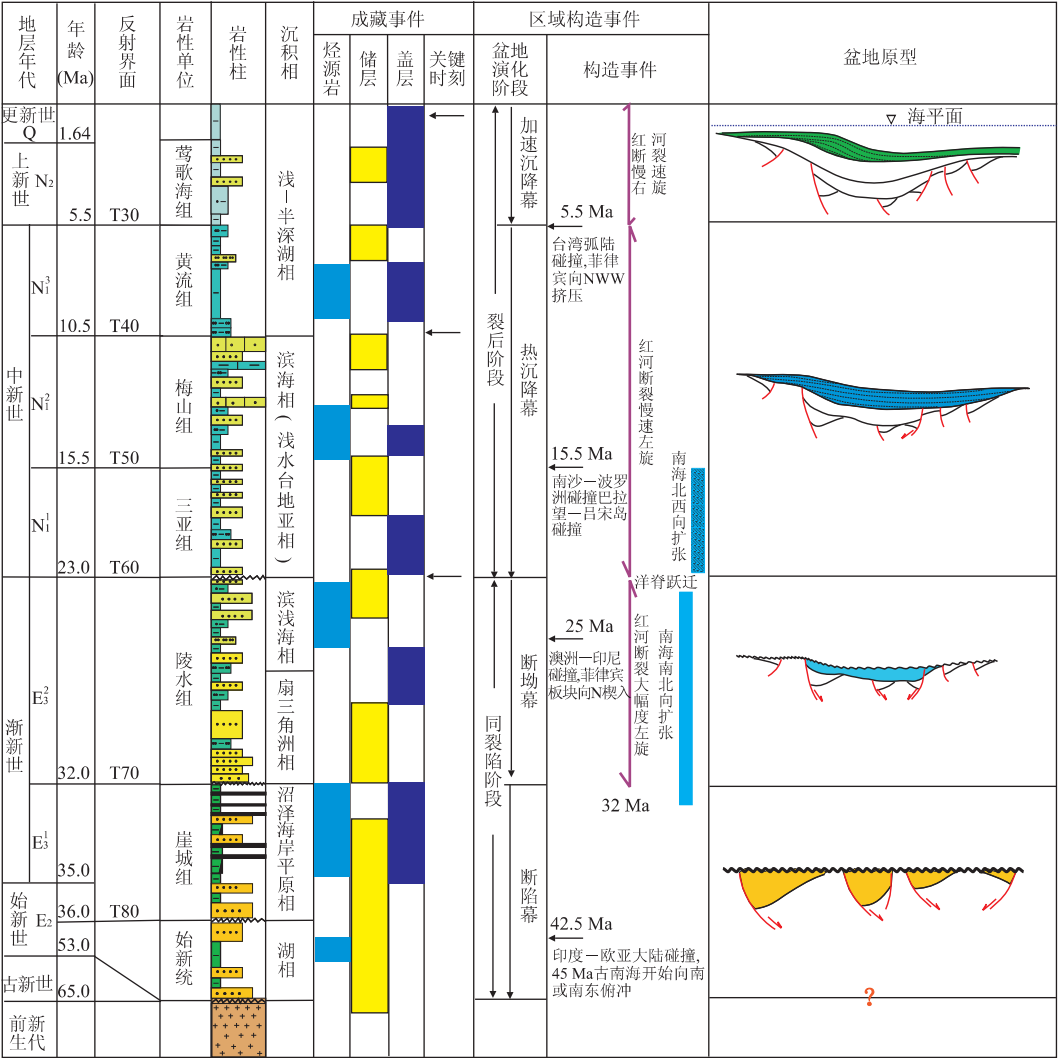


图 2 琼东南盆地地层发育特征及其动力学背景
Fig. 2 Characteristics of strata and their dynamical setting of QDNB

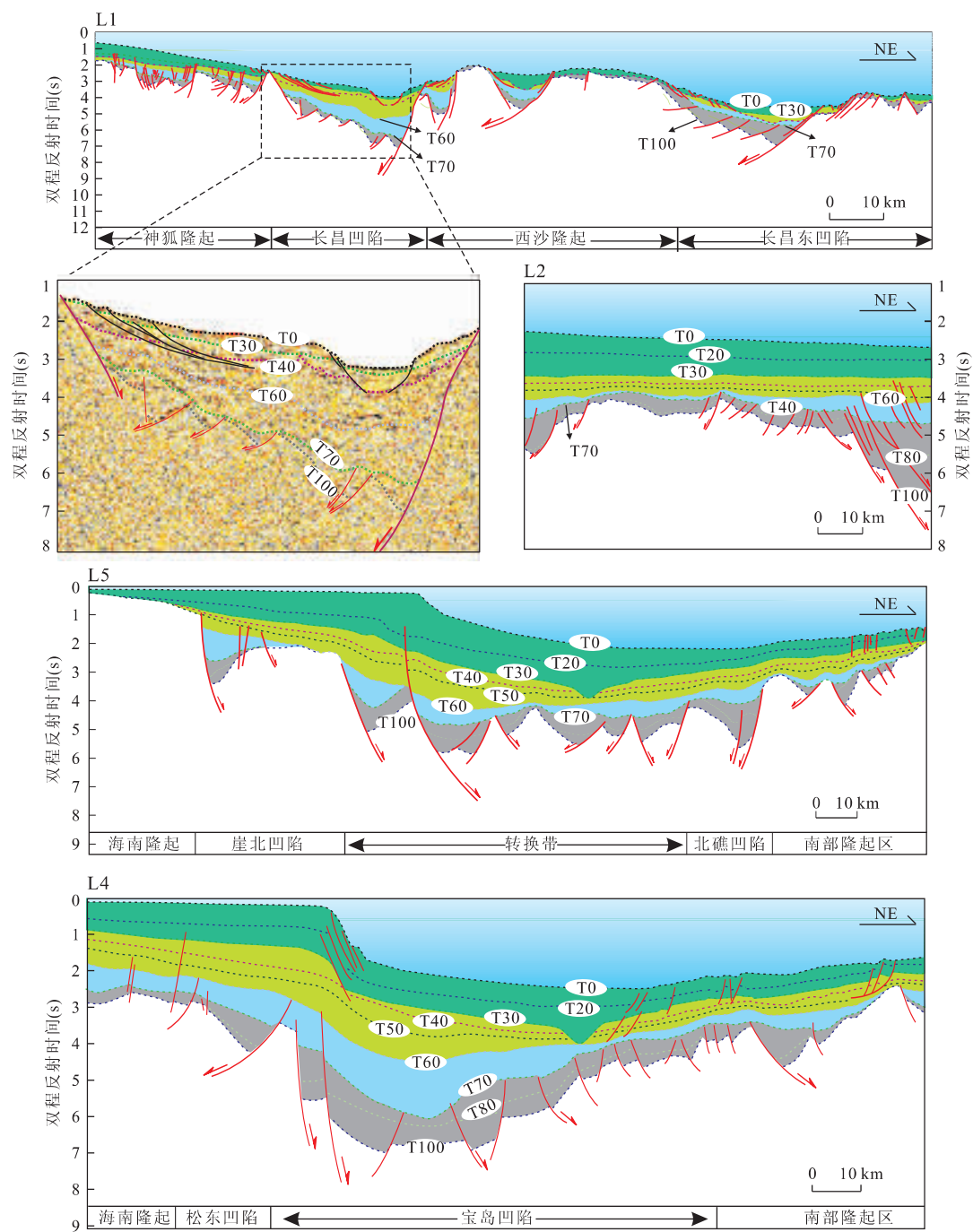


图 3 盆地过主要构造单元地震剖面构造—地层解释

Fig. 3 Seismic reflection profiles across main tectonic units of QDNB and their tectono-stratigraphic interpretation

陷盆地系,而 T70 界面之上,在 T70 界面发育之前形成的大量小型断层停止活动,而形成了规模较大的近东西向分布的断裂带,并控制了中央坳陷区主要凹陷单元的发育,这些凹陷单元的盆地结构样式由早期的小型断陷盆地转变为呈东西向弧形展布的规模较大的断坳盆地.控制这些盆地的一些边界断裂,或者是这些断裂的局部区段具有沿早期的断裂继承性活动的特征,如 2 号断层、6 号断层和 11 号

断层继承性活动,同时在盆地盖层内发育了新生的正断层,如图 1c、图 3 中的盖层断层.

由此可见,根据控盆边界断层的走向和断层主要为正断层性质的特征,可以判断出 T70 界面发育前后,控制盆地的区域构造应力场发生过显著的由 NW-SE 向拉伸到近 SN 向拉伸的变化(图 4),因此, T70 界面具有构造变革的意义.根据该界面控制的盆地原型结构的变化,以该界面为界,将琼东南盆地

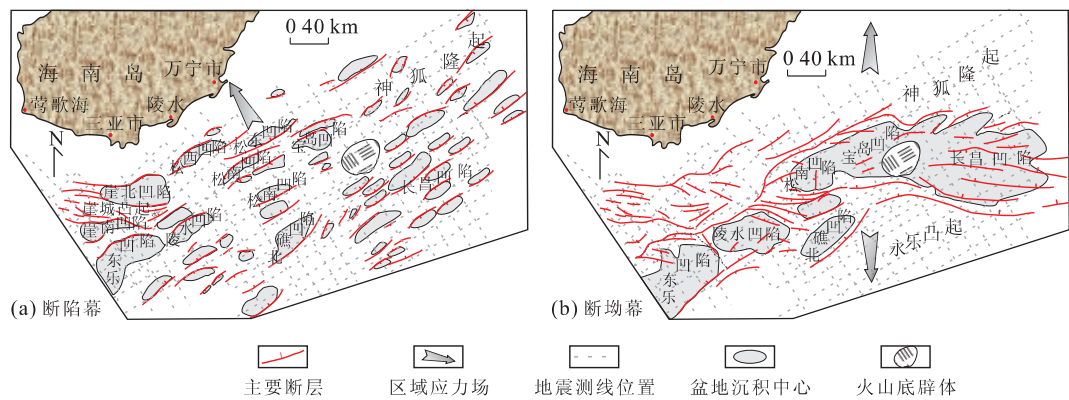


图 4 琼东南盆地不同时期断层发育特征及其控制凹陷简化

Fig. 4 Simplified maps of distribution of faults and associated depressions in different episode in QDNB

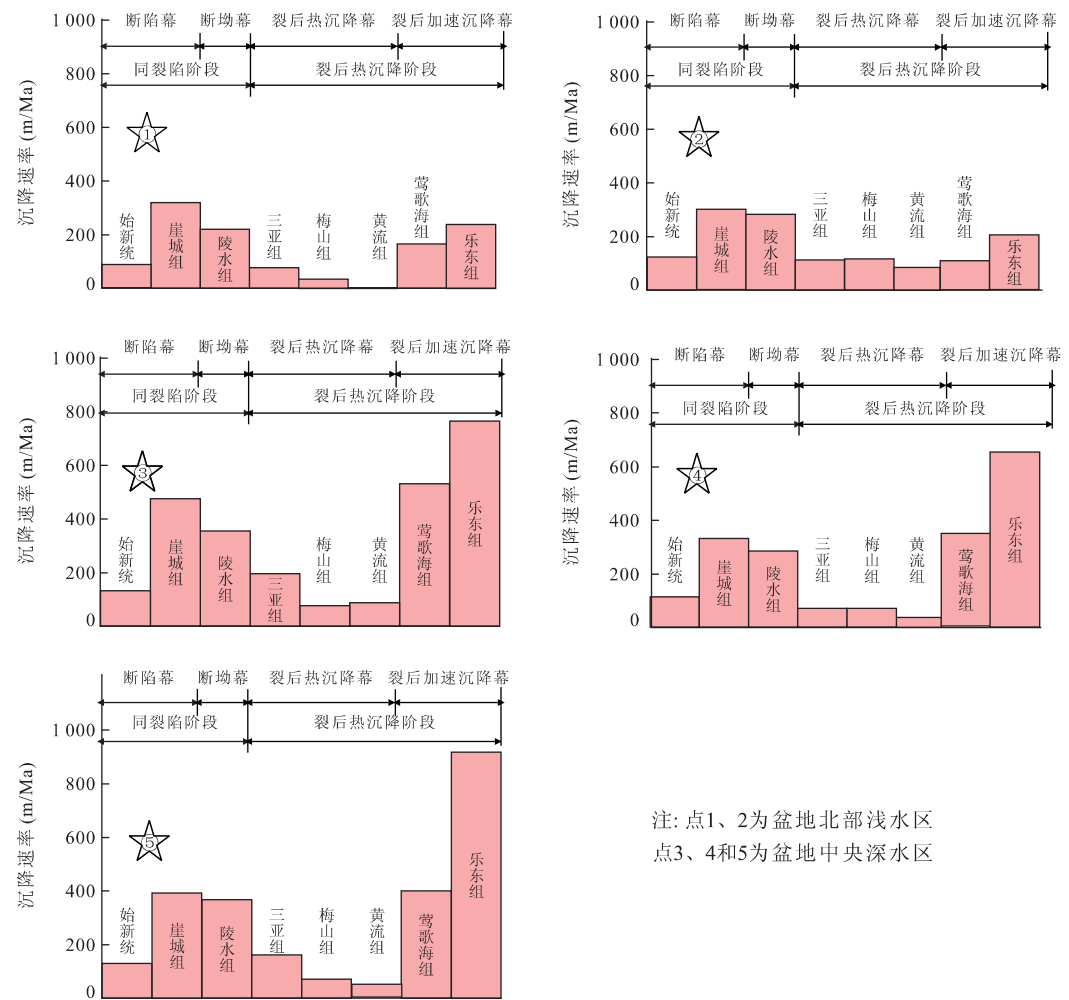


图 5 琼东南盆地主要凹陷总沉降特征

Fig. 5 Subsidence characteristics of main depression in QDNB

的同裂陷阶段进一步划分为早期的断陷幕和晚期的断拗幕两个次一级的构造演化阶段. 因此, 盆地新生代演化在划分为同裂陷阶段和裂后阶段的基础上, 可以进一步划分为断陷幕、断拗幕、裂后热沉降幕和

裂后加速沉降幕 4 个期次(图 2).

3.2 盆地沉降中心迁移

有关研究区沉降特征前人已从单井角度进行了研究(袁玉松等, 2008; 佟殿君等, 2009), 本次研究采

用沉降史回剥分析(Sclater and Christie, 1980)进行研究,其中盆地主要凹陷沉降速率如图 5,采样点 1 和 2 分别位于北部隆起浅水区崖北和松东凹陷,点 3、4 和 5 分别位于中央凹陷深水区陵水、崖北和长昌凹陷(图 1b)。通过研究揭示盆地沉降具有以下特征,盆地断陷期沉降速率较大,如陵水凹陷崖城组沉降速率为 400 m/Ma;断坳期盆地沉降速率较崖城组沉积时期减小,最大值都小于 400 m/Ma;裂后热沉降幕盆地的沉降速率都较低,基本都小于 200 m/Ma,为缓慢沉降的过程;莺歌海组和乐东组为盆地裂后加速沉降幕时期,盆地沉降速率比热沉降幕大很多,并且深水区的比北部陆架区要大,最大值为 920 m/Ma。其次,本次研究共采集全盆 711 个不同盆地构造单元采样点,对其采用了如图 5 所示类同的计算方法进行研究,厘定了盆地不同时期的沉降中心,揭示了盆地沉降演化特征。

如图 6a 所示为同裂陷阶段盆地沉降中心分布,早期的断陷幕包括始新统和崖城组,其中始新世盆地的沉降中心主要位于崖北、松西、松东、乐东、陵水、北礁、松南、宝岛、长昌和北礁等凹陷,沉降中心为多中心、NE 向展布特征,盆地沉降中心受断裂活动影响较大;崖城组时期,盆地沉降中心集中在陵水东部,北礁凹陷、宝岛东部和长昌凹陷,沉降中心也呈 NE 延伸展布特征(图 6a)。所以,裂陷幕时期盆地沉降中心为分散的 NE 向展布的弥散孤立分布特征,盆地总体构造格局“群山环湖,群湖抱山”古地貌特征。

断坳幕主要为陵水组(图 6a),陵水组时期沉降中心主要位于乐东、陵水、松南—宝岛—长昌,沉降中心展布方向变化显著,沉降中心集中于中央坳陷区,并呈 NE-WE-NWW 弧形展布,与断陷幕盆地沉降中心构成显著的叠加关系,并且盆地的沉降中心范围也由之前的小中心变成现在的大中心。裂后热沉降幕主要包括三亚组、梅山组和黄流组(图 6b),三亚组沉降中心主要集中分布在中央坳陷区长昌凹陷;梅山组沉积时期,沉降中心逐渐向宝岛—松南凹陷迁移;黄流组沉积时期,沉降中心迁移到乐东—陵水地区。所以,裂后热沉降幕时期,盆地沉降中心自 NE 向 SW 迁移。裂后加速沉降幕主要包括莺歌海组和乐东组(图 6b),该时期琼东南深水盆地被揭示为加速沉降莺歌海—乐东组时期,沉降中心位于乐东—陵水凹陷,与黄流组时期沉降中心相比,沉降中心继续往盆地南部迁移。

通过以上分析,断陷幕盆地沉降中心为多中心、NE 向展布特征,凹陷长轴展布方向为 NE 向,盆地

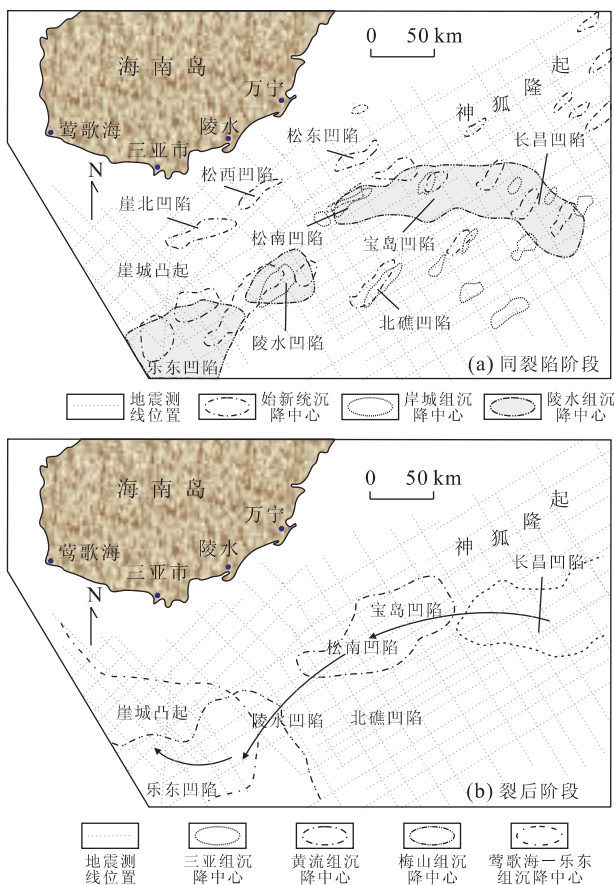


图 6 不同时期琼东南盆地沉降中心

Fig. 6 Subsidence centers of different episode in QDNB

沉降中心受断裂活动影响较大,断坳幕沉降中心逐渐集中在中央坳陷区,并呈 NE-WE-NWW 弧形展布,与断陷幕的盆地沉降中心构成显著的叠加关系。盆地裂后阶段可以划分为裂后热沉降幕和裂后加速沉降幕,从老到新,沉降中心呈现由 NE 向 SW 迁移的规律。

4 讨论

如前所述,基于欧亚、印澳和太平洋三大板块相互作用的总体背景下,人们对包括琼东南盆地的整个南海北部大陆边缘盆地形成和演化机制做了大量深入、系统的研究,提出了很多的解释模式来分析盆地的形成和演化过程(Ru and Pigott, 1986; Zhou *et al.*, 1995; 任建业和李思田, 2000; 龚再升等, 2004; 庞雄和陈大民, 2007; 孙珍等, 2009)。如,将盆地的发育与印度—欧亚大陆的碰撞相联系(Tapponnier *et al.*, 1982, 1986; Leloup *et al.*, 2001);或者是与碰撞引起的挤出相关的走滑作用相联系(Huchon *et al.*, 1994;

longley, 1997); Morley(2002)提出俯冲后退作用来解释包括琼东南盆地在内的东南亚盆地的发育; Hall(2002)和 Hall *et al.* (2008)认为俯冲驱动的收缩作用引起了南海及东南亚地区的伸展; 还有一些学者, 如 Clift and Sun(2006)和 Clift *et al.* (2008)强调了先存构造和岩石圈的结构在盆地发育过程中的重要性。目前所提出的各个盆地发育模式各有侧重, 均在一定程度上对当时研究中发现的盆地某些方面的特征给予了符合当时认识水平的合理解释, 但是对于南海北部边缘盆地, 如琼东南盆地断陷期 NE 向展布特征, T70 界面前后应力场的变革导致盆地沉积沉降中心叠置以及裂后加速沉降机制等方面, 以上模式都未能合理解释。对比琼东南盆地形成演化过程中, 周边发生的板块构造事件及其与盆地区构造变形格局的配置关系, 分析盆地的沉降与岩石圈深部作用的关系, 本文认为古南海的俯冲、南海洋脊的扩张、洋脊跃迁以及盆地岩石圈的塑性流动对新生代南海北部盆地的形成起了关键作用。

如前所述, 新生代琼东南盆地的演化可以划分为裂陷幕、断拗幕、裂后热沉降幕和裂后加速沉降幕。在裂陷幕时期, 南沙地块和婆罗洲之间发育古南海, Clift *et al.* (2008)估算其宽度在 1 400 km 以上, 古南海向东南方向俯冲, 越东断层作为古南海向东南俯冲过程中转换型的大陆边缘, 且以右旋走滑作用为主(Fyhn *et al.*, 2009)(图 7), 位移幅度不超过 300 km(Clift *et al.*, 2008), 直至早中新世末期古南海伴随着南沙地块和婆罗洲地块的碰撞而俯冲消亡。在古南海洋壳向南俯冲拖拽过程中, 导致了华南陆源的伸展以及南海的扩张(Holloway, 1982; Taylor and Hayes, 1983)。以上认识中中国东南大陆边缘发育与古南海的俯冲相联系主要来自于广泛发育于中国东南大陆的红盆沉积和南海北部地质资料的定性分析, 认为在印度—欧亚大陆碰撞之南海北部地区发生过一期白垩纪晚期—古新世的 NW-SE 向裂陷作用(Ru and Pigott, 1986; Zhou *et al.*, 1995; 龚再升等, 1997, 2004), 形成了 NE 向小型半地堑或地堑群。

断拗幕开始界面 T70 界面是琼东南盆地同裂陷阶段充填序列中的一个重要的构造变革界面, 前文已较详细讨论了该界面地质属性。关于 T70 界面形成时间, 由于油气勘探开发和探讨南海地区形成演化的需要, 油田产业部门和学术界在南海周边地区开展了大量生物地层、沉积地球化学、磁性地层学以及区域对比等工作。如蒋仲雄等(1994)较为系统

地研究了南海北部边缘主要盆地富含海相微体古生物化石的沉积地层, 发现在渐新世 30 Ma 左右这些盆地有一个显著的地层抬升剥蚀结束期, 应该代表了 T70 界面的上限年龄; 庞雄和陈大民(2007)以及邵磊等(2009)通过对南海北部 ODP1148 以及南海北部盆地不同凹陷钻井岩心以及元素地球化学大量指标进行分析, 均在 32 Ma 出现不整合和成分上的急剧突变, 而且在南海北部盆地具有很好的横向对比性; 汪品先等(2003)结合 ODP184 航次极高的取芯率的 ODP1148 钻探, 建立了可供近海和陆上对比的生物地层框架, 其中认为 32 Ma 是重要的区域构造事件南海扩张开始期的沉积响应, 沉积物堆积速率降低。由此, 本文在南海北部琼东南盆地同裂陷阶段充填序列中重新厘定的 T70 界面形成时代为 32 Ma, 该界面的发育在南海北部边缘盆地具有广泛性, 可进行区域对比。Briaies *et al.* (1993)通过更加细致的磁条带对比和海底扫描数据的分析, 提出南海的初始扩张年龄是从磁条带 11 开始, 其绝对年龄为 32 Ma(图 7), 因此, 此时最主要的区域板块构造事件是古南海持续的俯冲导致南海南北向扩张、洋壳开始形成(Brias *et al.*, 1993; Hall, 2002; Li *et al.*, 2005), 该时期形成的洋盆称为南海西北次海盆, 其洋脊扩张轴延伸方向正是本次研究区琼东南盆地。而 T70 界面主要是南海扩张事件在盆地发育中的响应, 导致琼东南盆地应力场由先前断陷幕 NW-SE 应力场转变为 NS 应力场。

裂后不整合界面 T60 界面是琼东南盆地充填序列中另一重要的构造变革界面, 是盆地由同裂陷阶段向裂后阶段转变的控制界面。根据前人的资料, 该界面的年龄有 21 Ma 和 23 Ma 等多个年龄参考数据, 但基本集中在 21~23 Ma 时期(龚再升等, 1997, 2004; 庞雄和陈大民, 2007)。如图 7, 这个时期南海西北次海盆洋脊停止扩张, 经历了早期西北次海盆的南北向扩张之后, 发生洋脊跃迁, 并从图 6b 磁条带处继续扩张, 扩张中心迁移到西南次海盆, 呈 NW-SE 向扩张(Briaies *et al.*, 1993), 其相当于 23 Ma。因此, 处于南海西北次海盆洋脊延伸方向的琼东南盆地 T60 界面的形成与在 23 Ma 左右南海洋脊从西北次海盆向西南次海盆跃迁扩张动力学背景具有密切关系。

裂后加速沉降开始 T30 界面的发育时期为中新世末期和上新世初期, 为 5.5 Ma 左右。该时期断层活动性差, 断层不发育, 盆地沉降表现为与 Mckenzie(1978)提出的盆地岩石圈拉伸、减薄、盆地沉

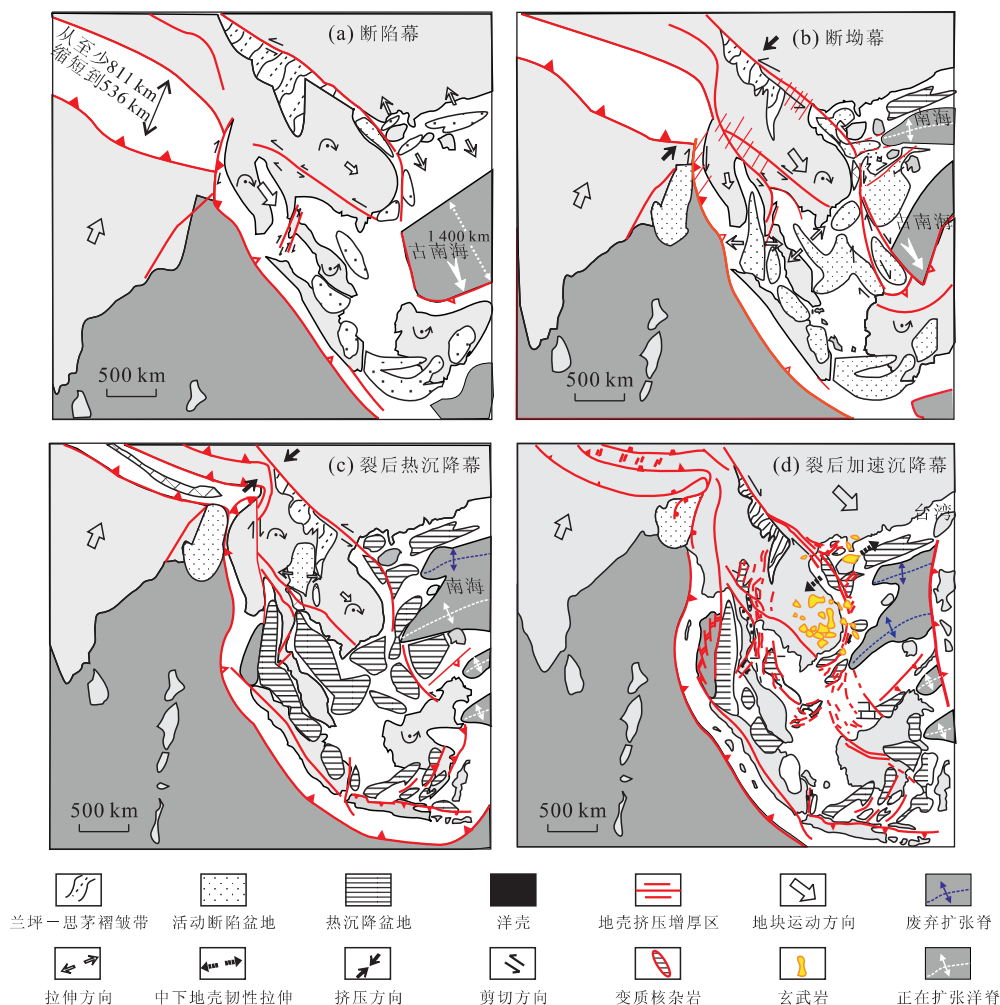


图 7 东南亚盆地形成演化模式(据 Tapponnier *et al.* (1982)、Lee and Lawver(1995)、Morley(2002)、Clift *et al.* (2008)、Hall(2002)、Hall *et al.* (2008)和 Fyhn *et al.* (2009)资料编绘)

Fig. 7 Schematic figures showing evolution of sedimentary basins in Southeast Asia

降和软流圈热隆升定量模式预测的裂后期盆地热沉降特征具有较大差异,表现为加速沉降特征(图 5)。因此,该时期琼东南盆地沉降并不仅仅是一个简单的热沉降过程,而是与盆地所处的构造背景具有密切的关系。这个时期印度的持续楔入导致青藏高原进入新一轮的快速抬升阶段向盆地提供了大量的物源;东部菲律宾海板块与太平洋板块一起向 NWW 俯冲,台湾岛弧陆碰撞。而且,该时期岩石圈变形也非常活跃,通过野外露头观察以及钻井岩心揭示,在印支地块及其周缘地区发现大量该时期形成的玄武岩(Rangin *et al.*, 1995; Lee *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2001; Lebedev and Nolet, 2003; Hall and Morley, 2004);对南海边缘盆地的动力学定量研究表明深部地幔对流导致了该地区岩石圈强烈减薄(Wheeler and White, 2002; Xie *et al.*, 2006; 崔涛等, 2008; 佟殿君等, 2009);其次, Replumaz *et al.*

(2004)、Zhao *et al.* (2004) 以及 Huang and Zhao (2006)采用层析成像技术研究认为南海周缘板块的俯冲汇聚导致了岩石圈地幔流动。因此,岩石圈深部动力变形和塑性流动在盆地裂后加速沉降幕施加了持续的作用。

通过以上分析,断陷幕时期,古南海的持续向东南方向俯冲导致南海北部形成 NE 向孤立小型半地堑或地堑盆地群;32 Ma,南海西北次海盆洋脊开始 NS 向扩张,洋壳形成,位于西北次海盆洋脊延伸方向的琼东南盆地 T70 构造变革界面形成,盆地开始发育 EW 向或 NWW 向断层,与断陷幕 NE 向断层构成显著的叠置关系,此时盆地处于断坳幕时期;T60 界面是盆地裂后不整合界面,通过区域对比该界面的形成与南海洋脊跃迁时期一致,盆地开始进入裂后热沉降幕;5.5 Ma 以后为裂后加速沉降幕,盆地及其周缘岩石圈深部动力学变形显著,导致盆

地沉降加速. 综上所述, 古南海的俯冲、南海洋盆的扩张、洋脊的跃迁以及岩石圈深部动力条件是琼东南盆地形成演化的关键控制因素.

5 结论

(1) 确定了琼东南盆地基本构造格局. 通过综合分析, 将琼东南盆地裂陷期划分为北部隆起区、中央拗陷区和南部隆起区 3 个一级构造单元, 近一步将中央拗陷区划分为北部拗陷带、中央低凸起和南部拗陷带 3 个二级构造单元. 以陵水凹陷和松南凹陷 NW 向地垒式隆起带为界, 盆地可以划分为西部伸展区和东部伸展区. 整个盆地具有“南北分带, 东西分块”的特征. 精细的地震剖面解释发现, 北部隆起区的凹陷主要表现为小型半地堑的结构样式, 中央拗陷区表现为大型地堑式结构, 南部隆起区为小型半地堑或地堑结构, 盆地整体则表现为复杂的复式地堑构型.

(2) 通过构造—地层分析、沉降史分析和沉降中心厘定等分析, 深入描述和分析了盆地 T70 重要动力学变革界面, 划分了盆地的构造演化阶段. 在以往划分为同裂陷阶段和裂后阶段构造演化的基础上, 将盆地新生代演化划分为裂陷幕、断拗幕、裂后热沉降幕和裂后加速沉降幕 4 个幕次. 盆地断陷幕为分散的 NE 向展布的弥散孤立湖盆断陷群, 断拗幕沉降逐渐集中在中央拗陷区, 并呈 NE-WE-NWW 弧形展布, 与裂陷早期的盆地构成显著的叠加关系, 裂后热沉降幕和加速沉降期幕盆地沉降中心具有从老到新由 NE 向 SW 迁移的规律.

(3) 以盆地的构造几何学分析和运动学演化特征为基础, 结合周缘地区区域性事件的分析, 开展了盆地发育动力学背景的研究, 认为古南海的俯冲、南海洋脊的扩张、跃迁以及岩石圈的减薄韧性流动是控制盆地形成的关键因素.

References

Briaies, A., Patriat, P., Tapponnier, P., 1993. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: implications for the Tertiary Tectonics of Southeast Asia. *J. Geophys. Res.*, 98 (B4): 6299—6328. doi:10. 1029/92JB02280

Clift, P., Lee, G. H., Duc, N. A., et al., 2008. Seismic reflection evidence for a dangerous grounds miniplat: no extrusion origin for the South China Sea. *Tectonics*, 27;

TC3008. doi:10. 1029/2007TC002216

Clift, P. D., Sun, Z., 2006. The sedimentary and tectonic evolution of the Yinggehai-Song Hong basin and the southern Hainan margin, South China Sea: implications for Tibetan uplift and monsoon intensification. *J. Geophys. Res.*, 111: B06405. doi:10. 1029/2005JB004048

Cui, T., Xie, X. N., Ren, J. Y., et al., 2008. Dynamic mechanism of anomalous post-rift subsidence in Yinggehai basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33 (3): 349—356 (in Chinese with English abstract).

Fyhn, M. B. W., Boldree, L. O., Nielse, L. H., 2009. Geological development of the central and south Vietnamese margin: implications for the establishment of the South China Sea, IndoChinese escape tectonics. *Tectonophysics*, 478 (3—4): 184—214. doi:10. 1016/j. tecto. 2009. 08. 002

Gong, Z. S., Li, S. T., Wang, J. Y., 2004. Active heat fuil, oil & gas pool-forming dynamics in northern marginal basins of South China Sea. Science Press, Beijing, 9—25 (in Chinese).

Gong, Z. S., Li, S. T., Xie, T. J., et al., 1997. Basin analysis and oil-gas accumulation on the northern continental margin of South China Sea. Science Press, Beijing, 27—122 (in Chinese).

Hall, R., 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(4): 353—431. doi:10. 1016/S1367—9120(01)00069—4

Hall, R., Morley, C. K., 2004. Sundaland Basins. In: Clift, P., Wang, P., Kuhnt, W., eds., continent-ocean interactions within East Asian marginal seas. Geophysical Monograph (149), AGU, Washington, D. C., 55—85.

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

He, J. X., Liu, H. L., Yao, Y. J., et al., 2008. Petroleum Geology and resource potential of continental marginal basins in northern South China. Petroleum Industry Press, Beijing, 146—169 (in Chinese).

Holloway, N. H., 1982. The stratigraphic and tectonic evolution of reed bank, North Palawan and Mindoro to the Asian mainland and its significance in the evolution of the South China Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 66: 1357—1383.

Huang, B. J., Xiao, X. M., Li, X. X., 2003. Geochemistry and origins of natural gases in the Yinggehai and Qiongdongnan basins, offshore South China Sea. *Organic Geo-*

- chemistry*, 34(7): 1009—1025. doi: 10. 1016/S0146—6380(03)00036—6
- Huang, J. L., Zhao, D. P., 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *J. Geophys. Res.*, 111; B09305. doi: 10. 1029/2005JB004066
- Huchon, P., Le pichon, X., Rangin, C., 1994. IndoChina peninsula and the collision of India and Eurasia. *Geology*, 22: 27—30. doi: 10. 1130/0091—7613(1994)022<0027:IPATCO>2. 3. CO;2
- Jiang, Z. X., Zeng, L., Li, M. X., et al., 1994. Tertiary petroleum provinces in China (Ⅷ): petroleum provinces northern continental shelf. Petroleum Industry Press, Beijing, 90—100 (in Chinese).
- Lebedev, S., Nolet, G., 2003. Upper mantle beneath Southeast Asia from S velocity tomography. *J. Geophys. Res.*, 108(B1), 2048. doi: 10. 1029/2000JB000073
- Lee, T. Y., Lawver, L. A., 1995. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia. *Tectonophysics* 251(1—4): 85—138. doi: 10. 1016/0040—1951(95)00023—2
- Lee, T. Y., Lo, C. H., Chung, S. L., et al., 1998. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating results of Neogene basalts in Vietnam and its tectonic implication. In: Flower, M. F. J., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia*, AGU Geodynamic Series, 27: 317—330.
- Leloup, P. H., Arnaud, N., Lacassin, R., et al., 2001. New constraints on the structure, thermochronology and timing of the Ailaoshan—Red River shear zone, SE Asia. *J. Geophys. Res.*, 106: 6683—6732.
- Li, Q. Y., Jian, Z. M., Su, X., 2005. Late Oligocene rapid transformations in the South China Sea. *Marine Micropaleontology*, 54(1—2): 5—25. doi: 10. 1016/j. marmicro. 2004. 09. 008
- Longley, I. M., 1997. The tectonostratigraphic evolution of SE Asia. In: Fraser, A. J., Matthews, S. J., Murphy, R. W., eds., *Petroleum geology of Southeast Asia*, *Geological Society (Special Publications)*, 126: 311—339. doi: 10. 1144/GSL. SP. 1997. 126. 01. 19
- McKenzie, D., 1978. Some remarks on the development of Sedimentary basins. *Earth Planet Sci. Lett.*, 40(1): 25—32. doi: 10. 1016/0012—821X(78)90071—7
- 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
- Pang, X., Chen, C. M., Peng, D., et al., 2007. The pearl river deep-water fan system & petroleum in South China Sea. Science Press, Beijing, 23—49, 99—140 (in Chinese).
- Rangin, C., Huchon, P., Le Pichon, X., et al., 1995. Cenozoic deformation of Central and South Vietnam. *Tectonophysics*, 251(1—4): 179—196. doi: 10. 1016/0040—1951(95)00006—2
- Ren, J. Y., Li, S. T., 2000. Spreading and dynamic setting of marginal basins of the western Pacific. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 203—213 (in Chinese with English abstract).
- Replumaz, A., Káráson, H., Hilst, R. D., et al., 2004. 4D evolution of SE Asia's mantle from geological reconstructions and seismic tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 221(1—4): 103—115. doi: 10. 1016/S0012—821X(04)00070—6
- Ru, K., Pigott, J. D., 1986. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea. *AAPG Bulletin*, 70(9): 1136—1155.
- Sclater, J. G., Christie, P. A. F., 1980. Continental stretching: an explanation of the post mid-cretaceous subsidence of the Central North Sea basin. *J. Geophys. Res.*, 85(B7): 3711—3739. doi: 10. 1029/JB085iB07p03711
- Shao, L., Pang, X., Zhang, G. C., et al., 2009. Late oligocene tectonic event in the Northern South China Sea and its implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(5): 717—724 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Sun, L. T., Zhou, D., et al., 2009. Discussion on the South China Sea evolution and lithospheric breakup through 3D analogue modeling. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(3): 435—447 (in Chinese with English abstract).
- Tao, W. X., He, S. B., Zhao, Z. G., et al., 2006. Reservoir distribution in deepwater area of the Qiongdongnan basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 28(6): 554—559 (in Chinese with English abstract).
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Armijo, R., 1986 On the mechanics of the collision between India and Asia. *Geological Society (Special Publications)*, 19: 113—157. doi: 10. 1144/GSL. SP. 1986. 019. 01. 07
- 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. doi: 10. 1130/0091—7613(1982)10<611:PETIAN>2. 0. CO;2
- Taylor, B., Hayes, D. E., 1983. Origin and history of the South China Sea basin. In: Hayes, D. E., ed., *Tectonic and geologic evolution of Southeast Asian seas and islands*, Part 2. American Geophysical Union Geophysical Monograph, 27: 23—56.
- Tong, D. J., Ren, J. Y., Lei, C., et al., 2009. Lithosphere stretching model of deep water in Qiongdongnan basin, northern continental margin of South China Sea, and

- controlling of the post-rift subsidence. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(6): 963—974 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. H., Yin, A., Harrison, T. M., et al., 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 188(1—2): 123—133. doi: 10.1016/S0012-821X(01)00315-6
- Wang, P. X., Jian, Z. M., Zhao, Q. H., et al., 2003. Evolution of the South China Sea and monsoon history revealed in deep sea records. *Chinese Sci. Bull.*, 48(23): 2549—2561.
- Wang, Z. F., He, J. X., Pei, Q. B., 2003. The origin and migration-accumulation features of CO₂ in Ying-Qiong basin and the western Pearl River Mouth basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 17(5): 293—297 (in Chinese with English abstract).
- Wheeler, P., White, N., 2002. Measuring dynamic topography: an analysis of Southeast Asia. *Tectonics*, 21(5): 1040—1051. doi: 10.1029/2001TC900023
- Xia, K., Xia, S., Chen, Z., Huang, C., 1995. Geothermal characteristics of the South China Sea. In: Gupta, M. L., Yamano, M., eds., *Terrestrial heat flow and geothermal energy in Asia*. IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi.
- Xie, X., Müller, R. D., Li, S. T., et al., 2006. Origin of anomalous subsidence along the northern South China Sea margin and its relationship to dynamic topography. *Marine and Petroleum Geology*, 23(7): 745—765. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2006.03.004
- Yuan, Y. S., Yang, S. C., Hu, S. B., et al., 2008. Tectonic subsidence of Qiongdongnan basin and its main control factors. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(2): 376—383 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, D. P., Tani, H., Mishra, O. P., 2004. Crustal heterogeneity in the 2000 western Tottori earthquake region: effect of fluids from slab dehydration. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 145(1—4): 161—177. doi: 10.1016/j.pepi.2004.03.009
- Zhong, Z., Wang, L., Li, X., et al., 2004. The Paleogene basin-filling evolution of Qiongdongnan basin and its relation with seafloor spreading of the South China Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 24(1): 29—36.
- Zhou, D., Ru, K., Chen, H. Z., 1995. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region. *Tectonophysics*, 251(1—4): 161—177. doi: 10.1016/0040-1951(95)00018-6
- Zhu, W. L., 2009. Some Key geological issues on oil and gas exploration in the northern deepwater area of the South China Sea. *Acta Geologica Sinica*, 83(8): 1059—1064 (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.
- 龚再升, 李思田, 汪集旻, 等, 2004. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究. 北京: 科学出版社, 9—25.
- 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等, 1997. 南海北部大陆边缘盆地分布与油气聚集. 北京: 科学出版社, 27—122.
- 何家雄, 刘海龄, 姚永坚, 等, 2008. 南海北部大陆边缘盆地油气地质及资源前景. 北京: 石油工业出版社, 146—169.
- 蒋仲雄, 曾麟, 李明兴, 等, 1994. 中国油气区第三系(Ⅷ): 南海北部大陆架油气区分册. 北京: 石油工业出版社, 90—100.
- 庞雄, 陈大民, 2007. 南海珠江深水扇系统及油气. 北京: 科学出版社, 23—49, 99—140.
- 任建业, 李思田, 2000. 西太平洋边缘海盆地的扩张过程和动力学背景. *地学前缘*, 7(3): 203—213.
- 邵磊, 庞雄, 张功成, 等, 2009. 南海北部渐新世末的构造事件. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(5): 717—724.
- 孙珍, 孙龙涛, 周蒂, 等, 2009. 南海岩石圈破裂方式与扩张过程的三维物理模拟. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(3): 435—447.
- 陶维祥, 何仕斌, 赵志刚, 等, 2006. 琼东南盆地深水储层分布规律. *石油实验地质*, 28(6): 554—559.
- 佟殿君, 任建业, 雷超, 等, 2009. 琼东南盆地深水岩圈伸展模式及其对裂后期沉降的控制. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(6): 963—974.
- 汪品先, 翦知湑, 赵泉鸿, 等, 2003. 南海演变与季风历史的深海证据. *科学通报*, 48(1): 2228—2239.
- 王振峰, 何家雄, 裴秋波, 2003. 莺—琼盆地和珠江口盆地西部 CO₂ 成因及运聚分布特征. *中国海上油气(地质)*, 17(5): 293—297.
- 袁玉松, 杨树春, 胡圣标, 等, 2008. 琼东南盆地构造沉降史及其主控因素. *地球物理学报*, 51(2): 376—383.
- 朱伟林, 2009. 南海北部深水油气勘探关键地质问题. *地质学报*, 83(8): 1059—1064.