

任建业, 雷 超. 莺歌海—琼东南盆地构造-地层格架及南海动力变形分区. 地球物理学报, 2011, **54**(12): 3303~3314, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.028

Ren J Y, Lei C. Tectonic stratigraphic framework of Yinggehai—Qiongdongnan Basins and its implication for tectonic province division in South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(12): 3303~3314, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.028

莺歌海—琼东南盆地构造-地层格架 及南海动力变形分区

任建业^{1,2}, 雷 超³

1 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074

2 教育部含油气盆地构造研究中心, 武汉 430074

3 中国地质大学资源学院, 武汉 430074

摘 要 通过对盆地地震剖面构造-地层的详细解释,在莺歌海盆地和琼东南盆地(简称莺-琼盆地)古近纪同裂陷充填序列中识别出一条区域性的构造变革界面——T70,该界面在地震剖面上表现为显著的下削上超的地震反射结构特征,发育的时代为 32~30 Ma,与南海海底扩张起始和红河断裂带左旋走滑的时间一致;T70 界面将莺-琼盆地的同裂陷期地层分隔为断陷层和断坳层(琼东南盆地)或坳陷层(莺歌海盆地)两个构造-地层单元,这些构造地层单元和构造变革界面是南海及其周缘区域板块构造重组事件在莺-琼盆地的响应. 论文结合前人成果,论述了以红河—越东—Lupar 线断层为界,可以将南海及其周缘地区划分为结构构造、演化特征和动力学背景有显著区别的两个构造变形区:挤出-逃逸构造区和古南海俯冲拖曳构造区. 以此构造变形分区为基础,确定了莺-琼盆地的动力学机制,建立了其构造演化模式. 本研究有助于从整体上理解南海周缘盆地的发育演化过程及主要控制机制,并对大陆边缘动力学研究和陆缘盆地区的油气勘探有重要意义.

关键词 莺歌海盆地, 琼东南盆地, 挤出-逃逸构造区, 古南海俯冲拖曳构造区, 南海

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.028

中图分类号 P541

收稿日期 2011-08-02, 2011-11-25 收修定稿

Tectonic stratigraphic framework of Yinggehai-Qiongdongnan Basins and its implication for tectonic province division in South China Sea

REN Jian-Ye^{1,2}, LEI Chao³

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

2 Structural Research Center of Oil & Gas Bearing Basin, Ministry of Education, Wuhan 430074, China

3 Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract The Yinggehai and Qiongdongnan basins together form one of the largest Cenozoic sedimentary basins in SE Asia. Here we present a prominent regional tectonic revolution boundary T70 in the Paleogene filling sequence based on structure-stratigraphic analysis of regional seismic profiles in the basins. The T70 boundary, characterized by distinct truncation and onlap seismic reflections, were dated at 32~30 Ma consistent with the onset and spreading of

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2007CB41170502)和国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目(91028009)资助.

作者简介 任建业,男,1963 年生,教授,博士生导师,主要从事海洋地质和沉积盆地动力学分析方面的教学和科研工作.

E-mail:jyren@cug.edu.cn

South China Sea oceanic ridge. This boundary separated two tectonic-stratigraphic units in the Paleogene sediments, i. e., the lower faulting-controlled subsidence layer in Yinggehai and Qiongdongnan basins, and the upper faulting-sag layer in Qiongdongnan basin and the sag layer in Yinggehai basin. The tectonic-stratigraphic units and tectonic revolution boundaries in Yinggehai and Qiongdongnan basins were originally responses to reorganization of plates in SE Asia. This study in Yinggehai and Qiongdongnan basins confirmed that South China Sea and its adjacent areas can be divided into collision-extrusion tectonic province and proto-SCS slab pull tectonic province, which was mostly suggested by works on southern South China Sea. In this paper we clarify distinct structure features, different evolution history and dynamic settings of the two tectonic provinces. They are bounded by a transform boundary of Red River fault extended south along the Vietnamese margin and joined with the trench along the Lupar Line. Considering the dynamic deformational division in this paper, the dynamic mechanisms and their evolution models for Yinggehai and Qiongdongnan basins have been clearly determined. Our research will improve our understanding on the development and evolution of South China Sea and its peripheral area, and has a great significance for geodynamics of the continental margins and petroleum exploration in the South China Sea.

Keywords Yinggehai Basin, Qiongdongnan Basin, Collision-extrusion area, Proto-South China Sea slab pull, South China Sea

1 引言

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、转换型三大主要的大陆边缘类型,在中、新生代又经历了从主动大陆边缘到被动大陆边缘性质的转换和晚新生代从扩张到俯冲过程的转换,保留了大量的与周缘板块构造运动学重组事件和岩石圈深部活动有关的动力学信息,是研究大陆边缘类型、演化模式和动力学机制的理想场所。莺-琼盆地位于南海北部被动大陆边缘西北侧(图1),是长期以来国内外学者关注的研究地域^[1~16]。

基于欧亚、印-澳和太平洋三大板块相互作用的总体背景,人们对包括莺-琼盆地在内的整个南海的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^[1, 5, 7, 8, 10, 17~22],主要包括将盆地的发育与印度—欧亚大陆的碰撞相联系^[20];或者是与碰撞引起的挤出相关的走滑作用相联系^[1, 4, 7, 22, 23];或者是南海南部先存的古南海向婆罗洲地块下俯冲使华南大陆边缘岩石圈拉伸减薄相联系^[2, 18, 19, 24]。但是对于南海北部边缘盆地,如琼东南断陷盆地和莺歌海走滑伸展盆地,以上模式都未能做出综合而合理的解释。

同时,对莺-琼盆地研究表明,新生代充填序列中发育了多个不整合面,共可识别出9个盆地内部主要界面^[10, 24, 25],前人对其中的T100、T60和T30等界面都进行过详细的标定和分析,作为盆地内部的重要的界面,学术界和产业部门对这些界面的基本地震反射结构和钻井、岩芯、古生物等地球物理特征和地质特征的认识基本一致,对于这些界面的性质的认识也基本没有异议,即T100为盆地的基底初始破裂面,代表新生代盆地开始发育^[10, 24, 25];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期演化阶段^[10];T30为盆地裂后期演化中加速沉降开始的一个界面^[26~28],但是对莺-琼盆地里T70界面的特征和属性长期没有定论。本研究中除对盆地内的重要界面进行解释和闭合之外,重点对T70界面进行了重新标定,总结了其识别标志,分析确定了该界面地质属性并在详细的地震剖面构造-地层解释和分析的基础上,研究南海北部莺-琼盆地结构构造特征、形成演化过程,结合前人关于周缘板块(地块)相互作用的研究成果,阐明南海及周缘动力变形分区,确定莺-琼盆地的成盆动力学机制和构造演化模式。本研究有助于从整体上理解南海周缘盆地的发育演化过程及主要控制机制,并对解决大陆边缘演化动力过程等科学问题具有重要的意义。

2 区域地质概况

莺歌海盆地位于我国海南省与越南之间的莺歌海海域(图 1),盆地形态呈 NNW 走向的长条形,由东南部的莺歌海坳陷和西北部的河内坳陷组成,两坳陷间为临高凸起所分隔.海域面积超过 $11 \times 10^4 \text{ km}^2$,是南海北部大陆架西区发育的新生代走滑伸展型含油气盆地,新生代最大沉积厚度超过 17km.琼东南盆地位于海南岛以南、西沙群岛以北的海域中(图 1),其西以 1 号断层与莺歌海盆地分界,东以神狐隆起与珠三凹陷相接,北临海南岛,南界永乐隆起.海域面积约 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$,盆地面积约 $4.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,是一个发育在前新生代基底上的新生代陆缘拉张型含油气盆地.

莺-琼盆地的基底由前新生代的火成岩、变质岩及沉积岩组成.盆地新生代地层序列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纪地层.其中始新统属于非海相沉积,为断陷早期的产物.早渐新世崖城组(T80—T70)沉积的早期仍有海

陆过渡环境存在,中、晚期已完全变为海相环境,为滨浅海相沉积.晚渐新世陵水组(T70—T60)属于断陷晚期的产物,该组下部为海陆过渡相沉积,中上部以海相沉积为主(局部出现了半深海相).早中新世三亚组(T60—T50)属于盆地裂后初期沉积产物,浅海-深海沉积体系.中中新世梅山组(T50—T40)为浅海-半深海沉积体系,中中新世黄流组(T40—T30)主要为滨-浅海沉积体系,上新世莺歌海组(T30—T20)由大套浅灰色、深灰色厚层块状泥岩组成,夹薄层浅灰色粉砂岩、泥质砂岩,中部夹厚层块状细砂岩,为浅海-半深海沉积体系.第四纪更新世-全新世乐东组(T20—海底)主要由浅灰色、绿灰色粘土岩为主,夹薄层粉砂、细砂,富含生物碎屑.

3 盆地构造变革界面特征和构造-地层格架

3.1 新生界主要构造变革界面

图 2、3 是分别过琼东南盆地和莺歌海盆地的两条区域性大剖面.从图 2 中可见,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

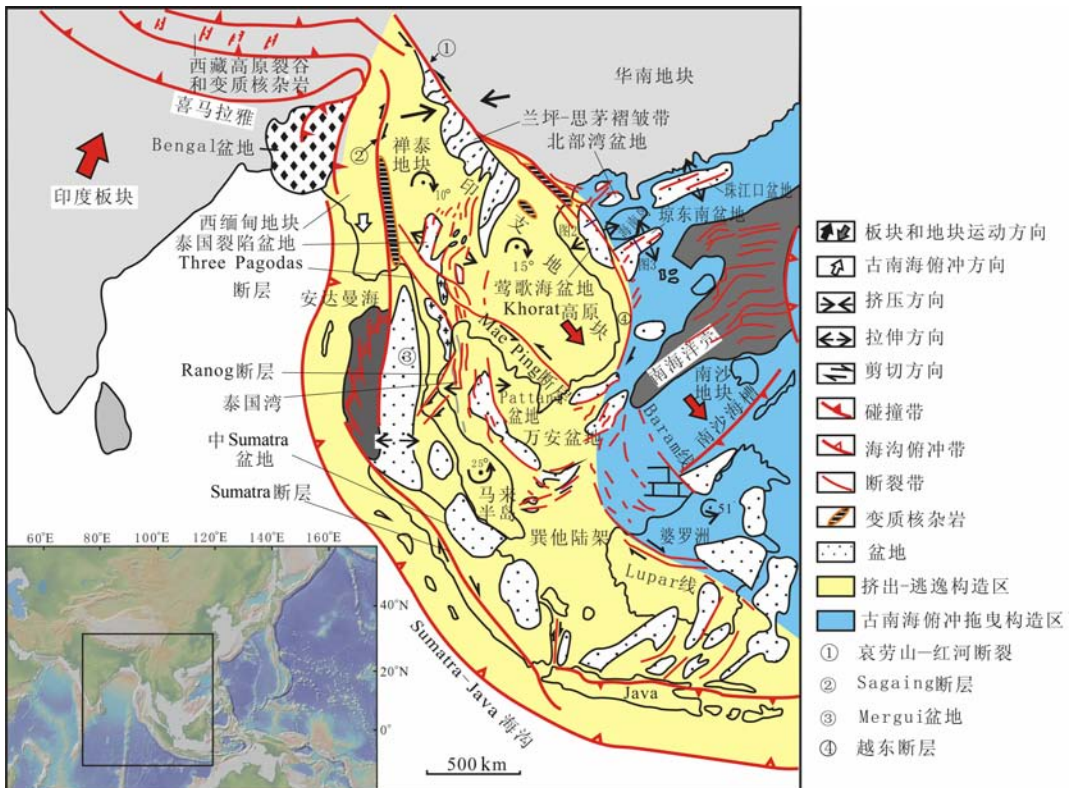


图 1 莺-琼盆地区域构造位置和南海动力变形分区

Fig. 1 Regional tectonic setting of Yinggehai and Qiongdongnan basins and dynamic deformation divisions in South China Sea

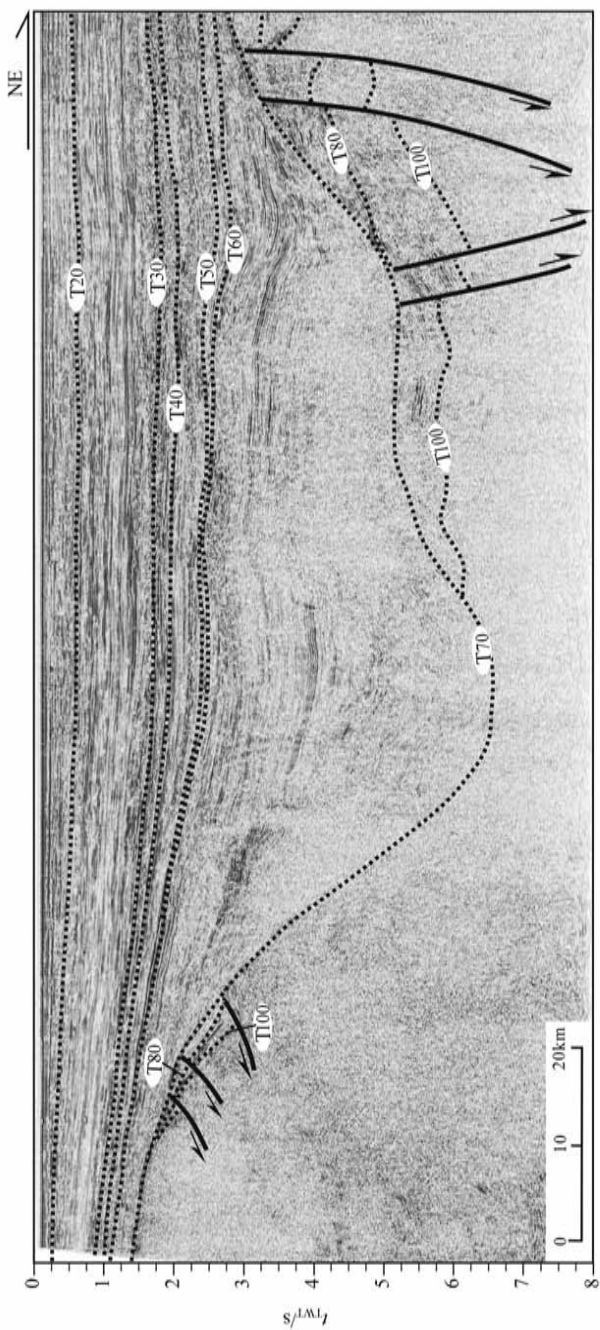


图2 莺歌海盆地区域地震剖面构造地层解释图 (剖面位置见图1)

Fig.2 Structural and stratigraphic interpretation of a regional seismic profile in Yinggehai basin (seismic profile position sees as Fig.1)

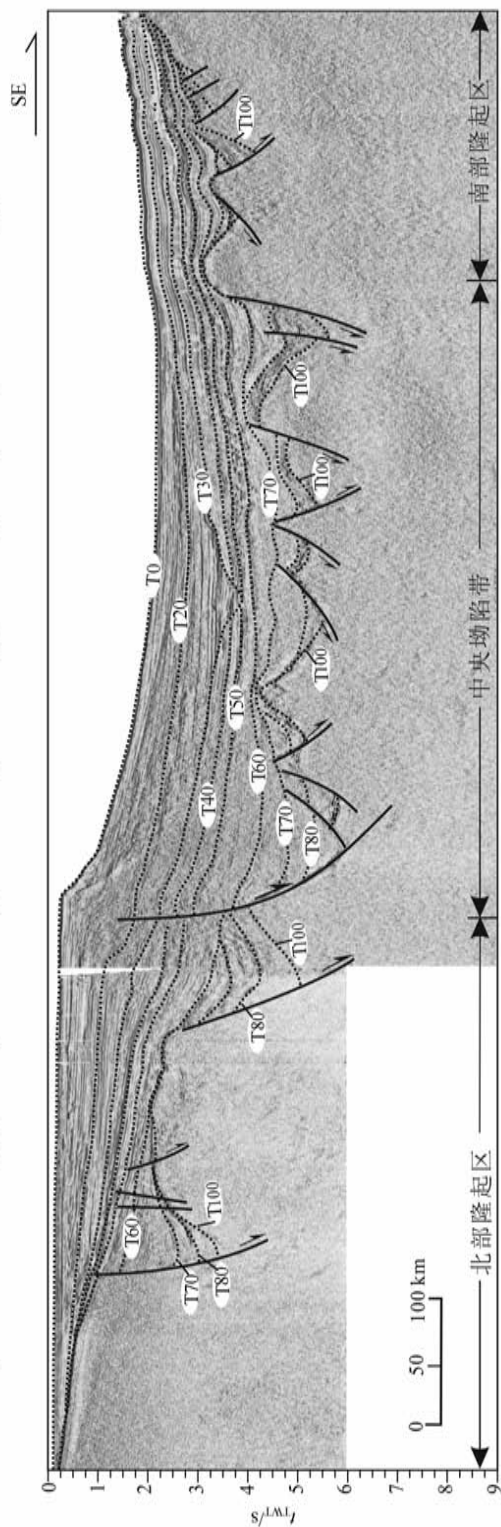


图3 琼东南盆地区域地震测线构造地层解释图 (剖面位置见图1)

Fig.3 Structural and stratigraphic interpretation of a regional seismic profile in Qiongdongnan basin (seismic profile position shown in Fig.1)

地的控盆边界断层均上延到一个统一的界面中止,该界面之下地层的削截反射结构十分清晰,界面之上则表现为显著的逐层上超的反射结构。此外,该界面与 T60 界面之间,也为断陷盆地,但是其发育规模比界面之下断陷盆地大的多,该界面即为本研究重新标定的 T70。

图 3 中,莺歌海盆地后期沉降比较深,深部反射特征不够清晰,尽管如此,仍然可以从剖面的总体反射特征上追踪出一条从盆地的东西两侧向盆地深部下削的一条界面,该界面之下可以隐约追踪出受边界断层控制的半地堑或地堑盆地,要注意的是这些半地堑盆地由于后期大幅度沉降已经改变了原先的位态而发生了旋转。该界面之上总体表现为拗陷型的盆地,该界面同样显示出显著的下削上超的反射结构特征,尽管其后期沉降比较深,但是,其特征与琼东南盆地的 T70 界面一致。

上述两个剖面显示的 T70 界面可以通过一系列从莺歌海盆地到琼东南盆地的区域性大剖面进行追踪和对比,表明 T70 界面的发育规模覆盖莺-琼盆地全区,具有区域性分布的特征。由此,在盆地的古近系充填序列中重新厘定了 T70 界面的特征,确定了其识别标志如下:(1)界面具有显著的下削上超的地层反射结构;(2)限定了早期孤立的、小型残余断陷盆地边界断层的向上延伸;(3)分隔了上下两个不同特征的盆地原型,下部为 NE 向分布的、孤立分割的小型断陷,而上部为近 EW 向分布的规模较大的断拗型(琼东南盆地)盆地“NW 向展布的大型拗陷型盆地(莺歌海盆地)”;(4)规模巨大,具有区域性分布的特征。

区域地层对比、盆地构造事件分析和生物地层研究确定的该界面的年龄为 32 Ma 左右^[24, 29],这个时期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扩张开始,印支地块向东南挤出强化,印尼和澳大利亚之间的汇聚加速也主要发生在这个时期^[24, 26, 29~32]。T70 界面是南海扩张事件在盆地发育中的响应,如上所述,界面上下盆地的原型发生了显著变化,界面曾受到强烈剥蚀。这些特征表明,该界面是一条重要的构造变革界面,该界面发育前后,控制盆地发育的应力体制和盆地的主体构造格局曾发生明显的转变。从 T70 界面开始,莺歌海盆地由早期的伸展断陷转变为深部走滑作用控制下的狭长型的深拗陷,而琼东南盆地应力场由先前断陷幕 NW-SE 向拉伸应力场转变为 SN 向拉伸应力场^[24]。

3.2 盆地构造-地层格架

图 4 为大量地震剖面解释基础上建立的莺-琼盆地构造-地层格架,结合前人重点强调的 T100、T60 和 T30 界面以及本文重新拟定的 T70 界面,可以将盆地新生代地层划分出 4 个不同几何学形态的构造-地层充填实体。

从盆地的基底 T100 到 T70 界面,由始新统-崖城组地层构成,表现为受边界断层控制的小型地堑或半地堑,构成一套楔形或梯形的充填体。在琼东南盆地这套构造-地层实体基本以初始的位态表现出来,但是在后期沉降巨大的莺歌海盆地,这套构造-地层实体则“悬挂”在盆地的斜坡上,且往往随盆地的大幅度沉降而发生旋转,在控盆边界小断层倾向与后期沉降的斜坡坡向相反的地方,半地堑的边界断层旋转变缓,如临高凸起的西部斜坡的情形;倾向相同的地方,则变陡,如莺东斜坡带的情形。

从 T70 到 T60 界面,由陵水组地层构成,这套构造-地层体的几何学形态变化比较大。琼东南盆地内部一般表现为断拗型的地堑或者半地堑,主要集中在发育在中央拗陷带^[24, 33];莺歌海盆地的北部总体表现为中部厚向两侧变薄尖灭的碟形拗陷,在反转构造发育的部位,碟形拗陷的中部发育上凸低幅背斜。到莺歌海盆地中央拗陷中南部,莺东斜坡 1 号断层在这套构造-地层实体发育时期有一定的活动性,但是其整体拗陷的地层格架没有变化。

从 T60 到 T30 界面,由三亚组、梅山组和黄流组地层组成,这套构造地层实体主要表现为拗陷型几何形态。T30 界面之上,为莺歌海组-第四系构成,莺歌海盆地表现为向南厚度加大的碟形拗陷,并穿插有大规模的泥-热流体底辟构造^[34, 35],莺歌海盆地的南部到琼东南盆地则表现为大规模的向海推进的沉积棱柱体。

4 莺-琼盆地形成演化对区域构造事件的响应分析

南海海盆的扩张和闭合是新生代期间东南亚地区的重大构造事件之一,而控制和影响南海扩张和闭合过程的更高级别的区域构造事件是印度—欧亚大陆的碰撞、澳大利亚板块的向北运移、俯冲和弧陆碰撞、太平洋板块俯冲、菲律宾海板块的楔入、俯冲和弧陆碰撞等^[2, 5, 29, 36]。许多学者提出了不同的模式解释南海形成演化的动力学机制,概括起来,影

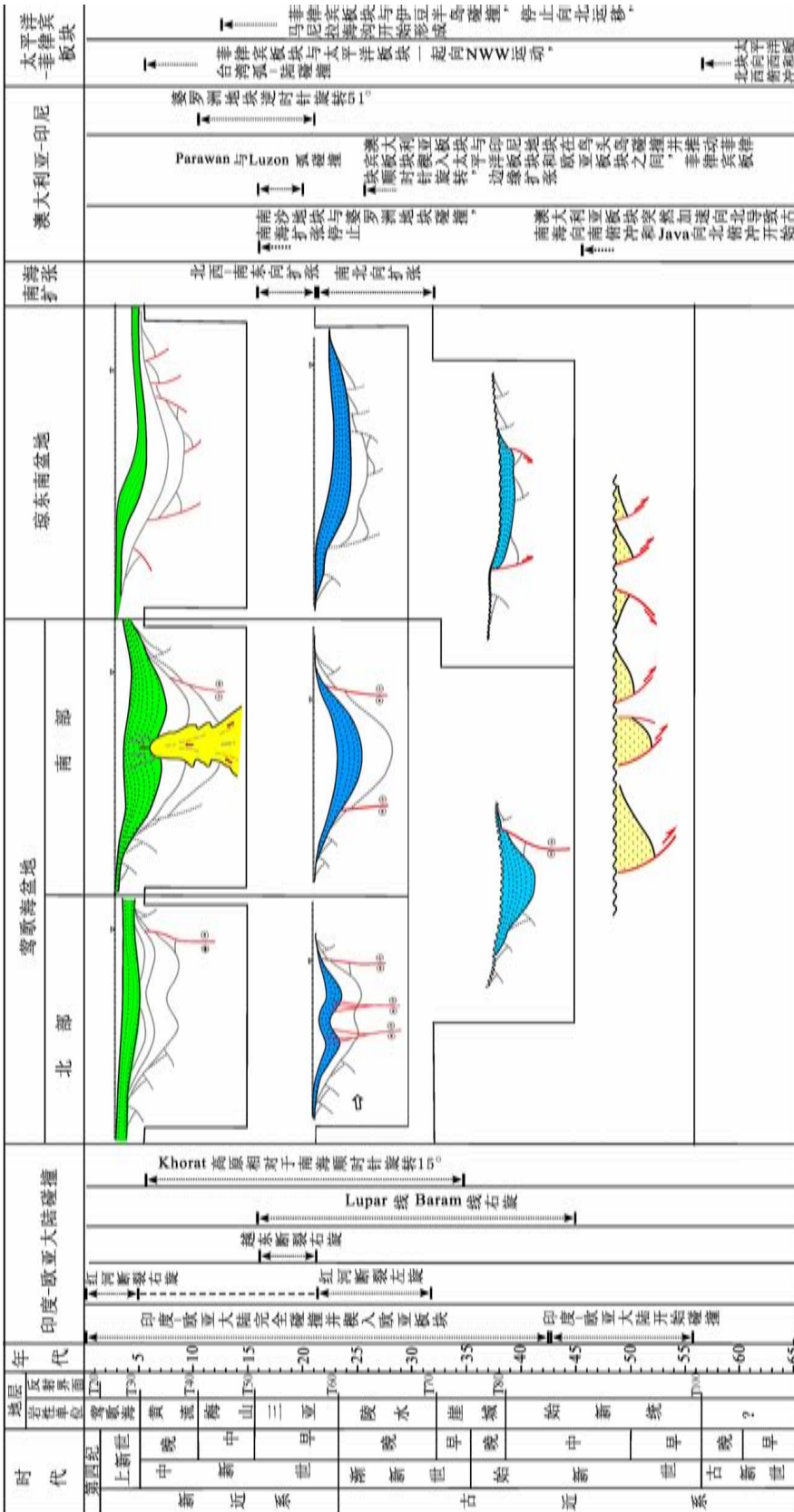


图 4 莺歌海盆地充填序列、构造演化和动力学背景图
Fig. 4 Filling sequences, tectonic evolution and dynamic setting of Yinggehai and Qiongdonggan basins

响比较大的模式主要有挤出逃逸模式^[1, 2, 4, 18~20, 37]和古南海俯冲拖曳模式^[17~19, 32, 38, 39],前者强调南海的张开是印度—亚洲碰撞之后,印支地块沿 Mae Ping 和红河断裂向 SE 大规模挤出逃逸过程中驱动的;而后者则认为南海的张开为古南海洋壳俯冲过程中板块拖曳作用所致.近年来,随着人们对越东断裂^[40]、Lupar 线^[17, 18]和西 Baram 线^[17]构造特征、位移距离和运动方向的研究和确定,特别是对于波罗洲 Rajiang 群沉积所代表的始新世增生杂岩性质的确认^[19, 38],开始对南海的成因越来越多地倾向于古南海俯冲拖曳导致南海扩张的机制模式.结合现有文献资料的调研^[2~4, 7, 8, 17~21, 24, 29, 31, 37, 40~44]和对莺-琼盆地构造特征和演化的综合研究,认为红河—越东—Lupar 线断裂是东南亚地区的一个重要的构造界线,该界线划分出两个具有显著不同构造特征,经历了不同演化过程的区域构造变形区(图 1).在该界线的西侧为经典的印度—欧亚大陆碰撞所产生的“挤出-逃逸构造区”,而在该界线的东侧岩石圈地壳的构造演化也受到总体板块挤压汇聚的控制,但是具体到这个区域内部,其新生代的演化历史主要是古南海俯冲及其所引起的区域构造变形场的变化,因此,本文命名为“古南海俯冲拖曳构造区”.

4.1 挤出-逃逸构造区

分布区域受限于 Sumatra-Java 俯冲带和上述红河—越东—Lupar 线断裂带之间(图 1),为一个 NNW 向分布的、向北部收敛的“纺锤型”区域,印支地块和 Sundaland 构成了该区域的主体.南部和西南部的边界是印度—澳大利亚巨型俯冲带的一部分,以正向俯冲(南部)和斜向俯冲(西南部)为特征.构造区内部为作为逃逸地块边界的大型走滑断裂系统,从西到东其延伸方向由南北向转变为 NW 向,其中规模较大的有 Sangain 断层,该断层构成了西缅甸地块的东部边界,向南延伸进入安达曼海,成为安达曼海左旋拉分盆地的东部边界断层.在 Andaman 海扩张之前,该区从晚渐新世到晚中新世,遭受近 E-W 向伸展形成由北向南逐渐尖灭的 Mergui 盆地.

Three Pangodas 断裂呈 NW 向延伸,向南东进入泰国湾盆地.在许多挤出-逃逸构造模式中,泰国湾盆地被认为是沿走滑断裂(Three Pagodas 断层向海的延伸区段)发育的拉分盆地.最新的研究表明,泰国湾盆地的地震剖面解释揭示出一系列的 NNW 向或近 SN 向正断层,这些正断层控制的断陷盆地可以断断续续一直追踪到陆上,到泰国的中

北部,裂陷作用的活动时间从泰国湾海上到陆上逐渐变新^[3].钻孔地层解释泰国湾断陷盆地的同裂陷活动时间是晚渐新世(30 Ma)以后一直到中新世(10.5 Ma),之后盆地进入到热沉降阶段.在泰国中部同裂陷活动可以一直持续到上新世,到泰国北部则由于裂陷作用停止时间最晚,则几乎没有热沉降,盆地区仍然处于隆起状态.泰国陆上盆地的反转作用发生过多幕.因此,上述特征显示在 30 Ma 以后,泰国湾地区,沿 Mae Ping 断层和 Three Pagodas 断层的走滑运动已经停止或非常微弱,近 EW 向伸展作用支配了该区的构造变形场.

Mae Ping 断层相对于上述两条断层其延伸方向更向西偏,并向南东方向延伸至湄公河三角洲.该断层的东南端为 Cuu Long 盆地,呈 NE 向分布,为 Mae Ping 断层左旋剪切过程中于断层末端发育的拉分盆地.该盆地在晚渐新世期间发生构造反转,遭受了 NW-SE 向的挤压,被认为是由于这个时期 Mae Ping 断层右旋反转所造成的. Fyhn 等^[40]认为,这次反转是由于印度地块带动西缅甸地块一起向北楔入,导致 Mae Ping 断层东北侧地块相对于南西侧地块更快地向南东挤出所致.上述的几条走滑断层,加上红河—越东断裂带总体都向印支地块的 NW 端汇聚收敛在一起.由于作为楔入体的印度大陆北侧喜马拉雅碰撞带内及其相临的西缅甸地块楔入过程中的挤压,处于收敛区的禅泰地块北部表现为强烈的收缩变形,地形上表现为高耸的山脉,构造上为一系列从近 E-W 向到 NW 向的褶皱和逆冲断裂构造,整个岩石圈强烈收缩加厚,在兰坪—思茅褶皱带中的收缩量达到了 50% 以上.

由此可见,在挤出-逃逸构造区内,盆地的类型多样,形态复杂.既有拉伸盆地,也有其他类型的与走滑相关盆地或走滑-伸展的复合型盆地.这些盆地形态以线形、楔形、菱形等为特征,规模都比较小.盆地的形成、演化机制和演化过程都很复杂,每个盆地都有比较大的差异.但是总体来看,走滑作用和走滑断裂为界的地块的顺时针旋转是盆地发育和演化的主要控制因素.这种旋转,并伴有左旋走滑分量,其引起的伸展和裂开首先是从地块的边缘开始的,并逐渐向 NNW 或向 N 扩展,到印支地块北部挤压区转换为挤压.这个区域的主要构造活动始于始新世印度—欧亚大陆的硬碰撞,在 35~16 Ma 期间进入到挤压-逃逸构造活动的兴盛期^[40].挤压-逃逸构造区内盆地的类型多样,走滑作用控制的拉分盆地,地块旋转控制的伸展盆地,或者是走滑作用和地块

旋转共同控制发育的走滑伸展盆地或转换伸展盆地等均有发育. 盆地的演化过程复杂, 特别是反转作用, 一些盆地往往可能经历多次, 不过总的来看, 在挤出-逃逸构造区内, 由西到东, 走滑断裂从左旋转变为右旋的时代依次变新.

4.2 古南海俯冲拖曳构造区

这一构造区位于红河—越东—Lupar 线以东, 马尼拉俯冲带之西, 巴拉望俯冲带之北, 包含了南海深水区及其周缘的广大地区(图 1). 这个区域的盆地主要受拉伸或者挤压作用控制, 形成南海北缘的伸展盆地和南海南缘与俯冲带有关的海沟盆地和前陆盆地. 这个地区并非没有受到印度—亚洲大陆的影响, 只是从上新世开始, 红河断层右旋, 华南大陆向南或东南挤出开始才形成了一些挤出逃逸构造的效应, 这些效应都很小, 分布也很局限, 比较明显的是北部湾盆地东西向断裂在上新世之后的反转.

这个区域的盆地以 NE 向或近东西向分布为主, 南海北部的盆地普遍在中新世即进入裂后期演化阶段, 从陆架-陆坡-洋盆呈规律的分布, 即从陆架的双层结构(断陷-拗陷)到陆坡的三层(断陷-断拗-拗陷)再到洋盆. 南海南部盆地的发育演化比较复杂, 位于西 Baram 右旋走滑断裂(即廷贾断裂)以西的曾母盆地在古新世-中始新世(65.0~37.2 Ma)为裂陷阶段, 晚始新世-早中新世末(37.2~15.5 Ma)为周缘前陆阶段, 早中新世末期南海关闭, 之后中中新世以来(15.5 Ma~现今)进入被动大陆边缘发育阶段; 而位于西 Baram 右旋走滑断裂以东的北康盆地和礼乐盆地等南沙地块上发育的盆地, 一直断陷到早中新世末期才随南海洋盆的关闭而进入裂后期的演化, 中中新世-现今(15.5 Ma~现今)为周缘前陆盆地阶段, 现今的巴拉望海沟可以看作是前陆盆地的前渊, 向北接近洋陆转换带的陆缘位置可以看作是前陆盆地的前隆构造单元. 相对于挤出-逃逸构造区的盆地而言, 古南海俯冲拖曳构造区内盆地类型多样, 规模比较大, 最大规模的盆地即南海洋盆. 该构造区域的沉积盆地和洋盆发育的动力因素主要为古南海俯冲对俯冲板块所施加的拖曳作用, 海南岛地幔柱对盆地的发育和南海的扩张可能也起到了一定作用^[41].

除了上述两个动力变形分区之外, 在南海的东部应该还有一个动力变形区, 该区的主要动力因素是太平洋板块的俯冲和菲律宾海板块在中始新世开始的由南向北的运移、顺时针旋转、并楔入到太平洋板块和欧亚板块之间, 晚中新世开始, 太平洋—菲律

宾海板块向西俯冲, 上新世开始, 马尼拉海沟俯冲和台湾的弧陆碰撞. 这些动力事件对南海东部的盆地发育具有显著影响, 因此, 称之为“菲律宾海板块楔入、俯冲和弧陆碰撞区”, 该动力变形分区不属于本文研究的重点, 在此不再赘述.

4.3 莺-琼盆地区域构造动力学响应界面和演化模式分析

南海西北部莺-琼盆地分布区正处于上述两大动力变形区, 即挤出-逃逸构造区和古南海俯冲拖曳构造区的结合部, 显然, 盆地新生代多幕演化过程与印支地块挤出-逃逸和古南海俯冲-拖曳作用区两大区域动力系统相互作用有密切的关系.

盆地发育起始年龄的确定是解决盆地成因的重要问题之一, 但也是盆地动力学分析中最棘手的问题之一. 因为盆地充填的最老的部分是陆相沉积, 缺乏化石, 难以精确定年. 而且, 很多情况下由于盆地深, 老地层样品采集困难, 常常只有地震剖面的观测资料. 许多地质学家认为在印度—欧亚大陆碰撞之前发生过一期白垩纪晚期-古新世的裂陷作用^[10, 24, 25, 45], 该认识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, 并将其与中国东南大陆边缘发育的安第斯型俯冲带或者是古南海的俯冲相联系, 认为这些盆地可以延伸到南海北部大陆边缘. 下面关于盆地发育机制分析中盆地起始发育时间将暂时采用大多数学者以及油田产业部门认同的晚白垩世晚期.

图 4 是莺-琼盆地沉积充填、构造演化和动力学背景图. 从图中可以看到, 莺-琼盆地几个大的构造变革界面均与周缘板块构造的主要运动学重组事件相一致. T100 界面是盆地发育起始形成的破裂不整合界面, 代表了盆地基底长期隆升剥蚀到新生代岩石圈开始破裂接受沉积的一个界面. 一般认为印度—欧亚大陆开始碰撞于 56 Ma, 到 43.5 Ma 二者全面碰撞, 印度洋的扩张被锁定, 由此引起印度洋和南太平洋重大的板块运动重组事件; 在印度洋的西部受南部新的扩张脊的驱动, 印度持续向北运动, 并被碰撞带大陆的底冲作用和内部的变形所调节; 在中部, 45 Ma 时期, 澳大利亚板块突然加速向北漂移导致古南海的俯冲带开始形成; 而在东部, 43.5 Ma 之前, 由于菲律宾板块与太平洋板块为同一的板块, 并向 NNW 方向运移, 之后, 开始向 NWW 方向运移, 导致大型的转换断层发育成俯冲带, 将西菲律宾海板块与东太平洋板块分隔开来. 这次板块构造运动重组奠定了整个南海新生代期间盆地发育的板块

构造基本格局. 上述 T100 界面实际上就是上述板块运动事件在莺-琼盆地中的综合响应.

T60 界面是莺-琼盆地充填序列中的第二个重要的构造变革界面, 尽管在莺-琼盆地的不同构造部位该界面的表现特征有一定的差异, 但是总体上是一个盆地由同裂陷阶段向裂后阶段转变的控制型界面-裂后不整合界面. 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. 这个时期, 周缘的板块构造重大事件是东部澳大利亚板块与印尼的鸟头岛在 25 Ma 左右碰撞, 之后并推动菲律宾海板块楔入到太平洋板块和亚洲板块之间; 中部南海的扩张在经历了早期西北次海盆的南北向扩张之后, 21 Ma 时期, 发生洋脊跃迁, 扩张中心迁移到西南次海盆, 呈 NW-SE 向扩张. 西部, 印度板块连接西缅甸地块, 扩大了楔入体, 增强了对印支地块北部的挤压, 印支地块内部的走滑断层由左旋变为右旋, 盆地反转开始. 红河断层活动主要集中在陆上区段, 左旋活动被禅泰地块内部的挤压和地块旋转吸收, 而红河断裂带的海域区段左旋作用显著减弱或停止, 其南段甚至转为右旋. 上述区域构造事件总体上抑制了本区的裂陷作用, T60 界面就是这些事件在莺-琼盆地中的响应界面.

T70 界面是莺-琼盆地同裂陷阶段充填序列中的一个重要的构造变革界面, 区域地层对比和生物地层研究确定的该界面的年龄为 32 Ma 左右. 这个过渡时期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扩张洋壳发育, 印支地块向南东挤出强化, 印尼和澳大利亚之间的板块汇聚加速也主要发生在这个时期. T70 界面是这些事件, 主要是南海扩张事件在莺-琼盆地发育中的响应. 区域上, 这个界面不仅在莺-琼盆地发育, 在南海周边的许多盆地中均可见类似界面发育.

莺-琼盆地裂后期演化阶段有 T50、T40、T30 等多个显著的不整合界面的发育. T50 界面形成于早中新世末期, 15.5 Ma 左右, 是南沙地块与 Borneo 地块和菲律宾岛弧碰撞^[2, 38], 南海扩张停止事件的响应. 这个时期, 越东断层的左旋已经非常小以至停止, 印支地块北部的挤压作用逐渐增强, 因此, 在莺歌海盆地, 该界面的发育也可能与这些事件有密切的关系. T40 界面发育于 10.5 Ma 左右, 红河断裂处于左旋到右旋的过渡时期, 在 Haq 曲线上, 这也是一个全球性海平面下降时期, 界面上发育了大量下切谷, 规模也比较大. 印度—澳大利亚板块持续向

北挤压, 菲律宾海板块由于伊豆半岛的阻碍不再向北运移, 这些运动学事件导致包括莺-琼盆地在内的东南亚盆地的挤压抬升, 形成 T40 界面.

T30 界面的发育时期为中新世末期和上新世初期, 5.5 Ma 左右. 这个时期全球气候变化频繁^[46], 以及印度板块的持续楔入导致青藏高原隆升, 使该地区物理和化学风化作用加强, 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 NW 俯冲, 台湾岛弧-陆碰撞. 该界面在莺歌海盆地北部和河内坳陷为强烈侵蚀下伏反转构造的一个显著界面. 在莺-琼盆地的其他地区为一个盆地快速沉降开始的界面^[26].

图 5 是基于上述分析概括出的莺-琼盆地构造演化模式, 该模式强调了几点:

(1) 莺歌海盆地和琼东南盆地分属挤出-逃逸构造区和古南海俯冲拖曳构造区, 因此, 尽管这两个盆地演化同时对区域板块构造重组事件响应, 但是响应的方式不同, 表现在盆地的形成演化机制上, 莺歌海盆地显示出受到地块边界的走滑作用和地块旋转作用的显著控制; 而琼东南盆地则相对简单以拉伸作用为主, 尽管不同的时期存在叠加作用.

(2) 莺歌海盆地所处的特殊的构造部位导致了该盆地内部的构造应力场非常复杂, 走滑-挤压-伸展可以共存于一个盆地的同一个发展阶段, 作者曾以一种特殊的构造-枢纽断层来给予解释^[23]. 由此, 可以看到莺歌海盆地并非很多学者所称的左旋拉分盆地, 本质上是一个断块旋转分开所形成的拉伸盆地, 可以称之为“走滑-旋转型”盆地. 这种类型的盆地一般呈楔形, 如泰国湾盆地(图 1). 向枢纽断层的逆冲断层区段变窄尖灭, 向枢纽断层的正断层区段变宽.

(3) 地块长距离滑移过程中的旋转是枢纽断层发育的必要条件. 印支地块的顺时针旋转已经得到古地磁资料的实际证明^[19], 枢纽断层的挤压区段包括红河断裂的陆上部分, 表现为发育水平线理的左旋压扭韧性剪切带^[43], 及海域河内坳陷发育的约 30km 宽的波状褶皱发育区, 并伴生有明显的逆冲断层^[47], 挤压构造反转的强度从 NW 向 SE 方向逐渐减弱, 可波及到莺歌海盆地的临高凸起区. 因此, 临高凸起的构造属性实际为挤压反转褶皱, 过了其南侧枢纽点发育部位, 进入到伸展断陷区, 莺歌海盆地发育巨厚的裂后期充填地层, 并最终引发了强烈的泥-热流体底辟体^[34].

(4) 详细的野外露头研究表明, 红河断裂以左旋走滑为特征, 地震机制解、数值模拟和地貌分析显示

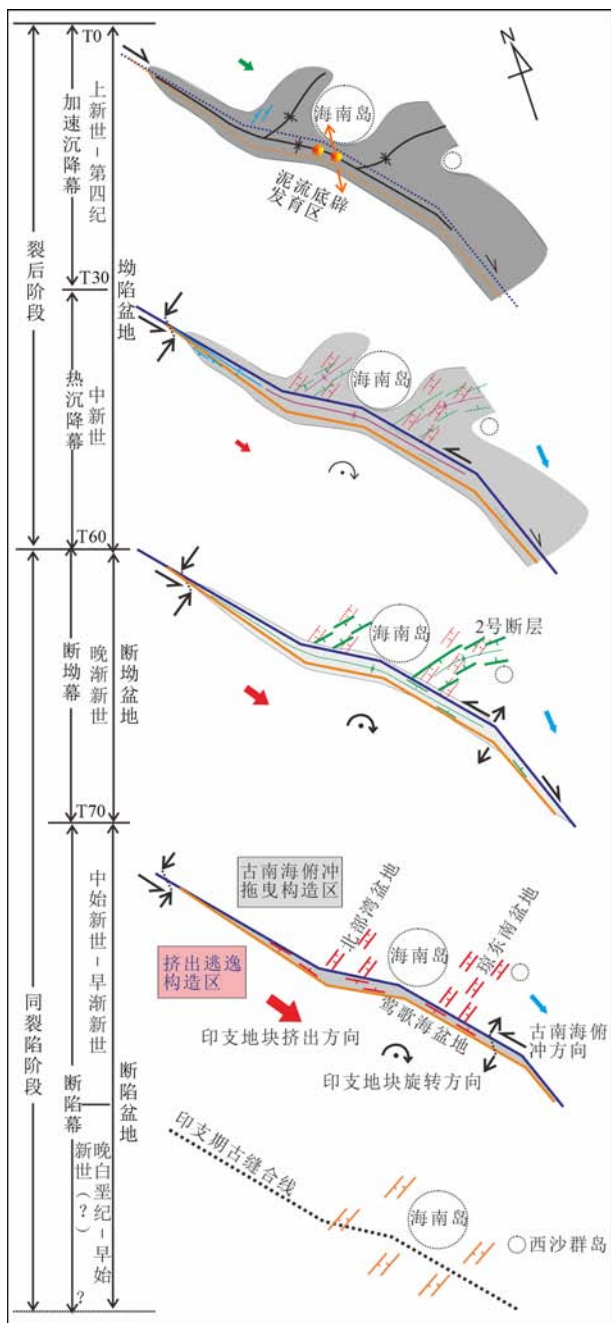


图5 莺-琼盆地的构造演化模式图

Fig. 5 Tectonic evolution sketches for Yinggehai and Qiongdongnan basins

在中新世末期(5.5 Ma)才由左旋转为右旋走滑^[47]. 海域越东断裂活动受到了南海扩张的影响和一定程度的控制,比较早的时期(晚渐新世)就开始右旋.

(5)裂后阶段是莺-琼盆地的重要演化阶段,该阶段总的动力学背景是,区域性走滑断裂的位移距离明显减小,但是,盆地的沉降速率仍然很高,盆地北部总沉降速率达到 400 m/Ma,构造沉降速率达到 200 m/Ma,盆地南部的沉降速率更高,总沉降速率

达到 1000 m/Ma 左右,构造沉降速率达到 600 m/Ma 左右,表明沉降中心向南迁移.但是盆地的断裂活动不明显.显然盆地裂后期的沉降并非一般伸展盆地中主要受控于热冷却机制,除了岩石圈热动力作用之外,盆地在这个阶段的沉降同时受到了中下地壳岩石圈的韧性伸展作用的控制,主要表现在红河断裂西侧和泰国北部大量的晚渐新世-早中新世变质核杂岩构造的发育^[19]、根据回剥技术估算的平均拉伸率为 2.3~3.5^[25, 28]和盆地内发育许多反映下伏断层隐伏式活动的挠曲构造等方面.

5 结论

(1)通过地震剖面解释和构造-地层分析,描述和确定了莺-琼盆地 T70 界面的基本特征和构造变革属性,从而将莺-琼盆地同裂陷阶段演化过程进一步划分为断陷幕和断坳幕(琼东南盆地)或坳陷幕(莺歌海盆地).盆地断陷幕为分散的 NE 向展布的孤立断陷湖盆群,琼东南盆地的断坳幕沉降主要集中在盆地的中央坳陷区,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.莺歌海盆地的坳陷幕沉降形成了由北向南加深的狭窄向斜带. T70 界面发育的时代为 32~30 Ma,与南海海底扩张起始和红河断裂带左旋走滑的时间基本一致,因此该界面的发育是南海扩张事件在莺-琼盆地的响应.

(2)提出红河-越东-Lupar 线断裂是南海及其周缘地区的一个重要的区域构造变形分区的界线,以该界线为界可以划分出两个具有显著不同构造特征,经历了不同演化过程的动力变形区,即西侧的印度-欧亚大陆碰撞所产生的挤出-逃逸构造区,东侧的古南海俯冲拖曳构造区.

(3)莺歌海盆地位于挤出-逃逸构造区东北侧边界上,其发育机制为印支地块沿红河断裂带大规模挤出,并小幅度顺时针旋转作用控制下发育的一种特殊的、规模最大的走滑-旋转型盆地.琼东南盆地和南海位于古南海俯冲拖曳构造区,它们的发育和演化受到古南海俯冲所引起的区域拉伸作用的控制,以形成 EW 向或 NE 向伸展型盆地(包括洋盆)为主要特征.

参考文献(References)

- [1] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. 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.*, 1993, **98**(B4): 6299~6328
- [2] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, **20**(4): 353~431
- [3] Morley C K. Combined escape tectonics and subduction rollback-back arc extension: a model for the evolution of Tertiary rift basins in Thailand, Malaysia and Laos. *Journal of the Geological Society*, 2001, **158**(3): 461~474
- [4] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea basin. In: Hayes D E, ed. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands*. Washington: Geophysical Monograph, 1983. 23~56
- [5] 任建业, 李思田. 西太平洋边缘海盆地的扩张过程和动力学背景. *地学前缘*, 2000, **7**(3): 203~213
- Ren J Y, Li S T. Spreading and dynamic setting of marginal basins of the western pacific. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2000, **7**(3): 203~213
- [6] 刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理特征. 北京: 科学出版社, 1992
- Liu G D. *Geologic-Geophysic Features of China Seas and Adjacent Regions* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1992
- [7] 孙 珍, 钟志洪, 周 蒂等. 南海的发育机制研究: 相似模拟证据. *中国科学 (D 辑): 地球科学*, 2006, **36**(9): 797~810
- Sun Z, Zhong Z H, Zhou D, et al. Research on the dynamics of the South China Sea opening: Evidence from analogue modeling. *Science in China (Series D): Earth Sciences* (in Chinese), 2006, **36**(9): 797~810
- [8] 李家彪. 中国边缘海形成演化与资源效应. 北京: 海洋出版社, 2008
- Li J B. *Evolution of China's Marginal Seas and Its Effect of Natural Resources* (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2008
- [9] 李思田, 林畅松, 张启明等. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂隙的动力过程及 10Ma 以来的构造事件. *科学通报*, 1998, **43**(8): 797~810
- Li S T, Lin C S, Zhang Q M, et al. Dynamics of Period-rifting on the Northern continental margin of South China Sea and tectonic event since 10 Ma. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1998, **43**(8): 797~810
- [10] 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. 北京: 科学出版社, 1997
- Gong Z S, Li S T, Xie T J, et al. *Continental Margin Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Northern South China Sea* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1997
- [11] 江为为, 宋海斌, 郝天珧. 南海北部陆架西区盆地地质、地球物理场特征及其深部结构. *地球物理学进展*, 2001, **16**(3): 1~11
- Jiang W W, Song H B, Hao T Y. The characters of geology and geophysical fields and deep structure of Northwestern of South China Sea. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2001, **16**(3): 1~11
- [12] 赵明辉, 丘学林, 叶春明等. 南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析. *地球物理学报*, 2011, **47**(5): 845~852
- Zhao M H, Qiu X L, Ye C M, et al. Analysis on deep crustal structure along the onshore-offshore seismic profile across the Binhai (littoral) fault zone in northeastern South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **47**(5): 845~852
- [13] 郝天珧, 黄 松, 徐 亚等. 南海东北部及邻区深部结构的综合地球物理研究. *地球物理学报*, 2008, **51**(6): 1785~1796
- Hao T Y, Huang S, Xu Y, et al. Comprehensive geophysical research on the deepstructure of northeastern South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(6): 1785~1796
- [14] 陈 洁, 钟广见, 温 宁. 南海扩张的地震反射标志——南海东北部多道地震剖面结果. *地球物理学报*, 2009, **52**(11): 2788~2797
- Chen J, Zhong G J, Wen N. Seismic signs of the South China Sea spreading——a case study of the seismic reflection profile in the northeastern South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(11): 2788~2797
- [15] 王振峰, 何家雄. 琼东南盆地中新统油气运聚成藏条件及成藏组合分析. *天然气地球科学*, 2003, **14**(2): 107~115
- Wang Z F, He J X. Miocene hydrocarbon's transferring and collecting condition and reservoir combination analysis in Qiongdongnan basin. *Natural Gas Geoscience* (in Chinese), 2003, **14**(2): 107~115
- [16] 姚伯初, 万 玲, 吴能友. 南海新生代构造演化及岩石圈三维结构特征. *地质通报*, 2005, **24**(1): 1~8
- Yao B C, Wan L, Wu N Y. Cenozoic tectonic evolution and the 3D structure of the lithosphere of the South China Sea. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2005, **24**(1): 1~8
- [17] Clift P, Lee G H, Duc N A, et al. Seismic reflection evidence for a Dangerous Grounds miniplate: No extrusion origin for the South China Sea. *Tectonics*, 2008, **27**(3), doi:10.1029/2007TC002216
- [18] Cullen A, Reemst P, Henstra G, et al. Rifting of the South China Sea: new perspectives. *Petroleum Geoscience*, 2010, **16**(3): 273~282
- [19] Morley C K. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia. *Tectonophysics*, 2002, **347**(4): 189~215
- [20] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, 1990, **343**(6257): 431~437
- [21] 周 蒂, 王万银, 庞 雄等. 地球物理资料所揭示的南海东北部中生代俯冲增生带. *中国科学 (D 辑): 地球科学*, 2006, **36**(3): 209~218
- Zhou D, Wang W Y, Pang X, et al. Mesozoic subduction-accretion zone in northeastern South China Sea inferred from geophysical interpretations. *Science in China (Series D): Earth Science* (in Chinese), 2006, **49**(5): 471~482
- [22] 谢玉洪. 构造活动型盆地层序地层分析及天然气成藏模式——以莺歌海盆地为例. 北京: 地质出版社, 2009
- Xie Y H. *Sequence Stratigraphic Analysis and Hydrocarbon*

- Accumulation Models in Tectonically Active Basins—Case Study on the Yinggehai Basin (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2009
- [23] 孙向阳, 任建业. 莺歌海盆地形成与演化的动力学机制. 海洋地质与第四纪地质, 2003, **23**(4): 45~50
Sun X Y, Ren J Y. Dynamical mechanism for generation and evolution of Yinggehai basin, the South China Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology* (in Chinese), 2003, **23**(4): 45~50
- [24] 雷超, 任建业, 裴建翔等. 琼东南盆地深水区构造格局和幕式演化过程. 地球科学-中国地质大学学报, 2011, **36**(1): 151~162
Lei C, Ren J Y, Pei J X, et al. Tectonic framework and multiple episode tectonic evolution in deepwater area of Qiongdongnan basin, northern continental margin of South China Sea. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 2011, **36**(1): 151~162
- [25] 龚再升, 李思田, 汪集旻等. 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, 2004
Gong Z S, Li S T, Wang J Y. Active Heat fuild, Oil & Gas Pool-Forming Dynamics in Northern Marginal Basins of South China Sea (in Chinese with English Abstract). Beijing: Science Press, 2004. 9~25
- [26] 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. 地球科学(中国地质大学学报), 2009, **34**(6): 963~974
Tong D J, Ren J Y, Lei C, 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. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 2009, **34**(6): 963~974
- [27] 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. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, **23**(7): 745~765
- [28] Lin C S, Zhang Y M, Li S T, et al. Quantitative modelling of multiphase lithospheric stretching and deep thermal history of some Tertiary rift basins in eastern China. *Acta Geologica Sinica English Edition*, 2002, **76**(3): 324~330
- [29] Wang P, Li Q. The South China Sea-Paleoceanography and Sedimentology. <http://www.springer.com/earth+sciences+and+geography/geology/book/978-1-4020-9744-7>
- [30] Ren J Y, Tamaki K, Li S T, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 2002, **344**(3-4): 175~205
- [31] Hutchison C S. Marginal basin evolution: the southern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, **21**(9): 1129~1148
- [32] Hall R. Hydrocarbon basins in SE Asia: understanding why they are there. *Petroleum Geoscience*, 2009, **15**(2): 131~146
- [33] 雷超, 任建业, 李绪深等. 琼东南盆地深水区结构构造特征与油气勘探潜力. 石油勘探与开发, 2011, **38**(5): 11~12
Lei C, Ren J Y, Li X S, et al. Structural characteristics and petroleum exploration potential in the deep-water area of the Qiongdongnan basin, South China Sea. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 2011, **38**(5): 11~12
- [34] Lei C, Ren J Y, Clift P D, et al. The structure and formation of diapirs in the Yinggehai-Song Hong basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, **28**(5): 980~991
- [35] 郝芳, 李思田, 龚再升等. 莺歌海盆地底辟发育机理与流体幕式充注. 中国科学(D辑), 2001, **31**(6): 471~476
Hao F, Li S T, Gong Z S, et al. Mechanism of diapirism and episodic fluid injections in the Yinggehai Basin. *Science in China (Series D): Earth Sciences* (in Chinese), 2002, **45**(2): 151~159
- [36] Honza E, Fujioka K. Formation of arcs and backarc basins inferred from the tectonic evolution of Southeast Asia since the Late Cretaceous. *Tectonophysics*, 2004, **384**(1-4): 23~53
- [37] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia. *Geological Society London Special Publications*, 1986, **19**(1): 113~157
- [38] Hutchison C S. The 'Rajang accretionary prism' and 'Lupar Line' problem of Borneo. *Geological Society, London, Special Publications*, 1996, **106**(1): 247~261
- [39] Hall R, van Hattum M W A, Spakman W. Impact of India-Asia collision on SE Asia: the record in Borneo. *Tectonophysics*, 2008, **451**(1-4): 366~389
- [40] Fyhn M B W, Nielsen L H, Boldreel L O, et al. Geological evolution, regional perspectives and hydrocarbon potential of the northwest Phu Khanh Basin, offshore Central Vietnam. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, **26**(1): 1~24
- [41] Xia B, Zhang Y, Cui X J, et al. Understanding of the geological and geodynamic controls on the formation of the South China Sea: A numerical modelling approach. *Journal of Geodynamics*, 2006, **42**(1-3): 63~84
- [42] Longley I M. The tectonostratigraphic evolution of SE Asia. *Geological Society, London, Special Publications*, 1997, **126**(1): 311~339
- [43] England P, Molnar P. Right-lateral shear and rotation as the explanation for strike-slip faulting in eastern Tibet. *Nature*, 1990, **344**(6262): 140~142
- [44] Allen C R, Gillespie A R, Yuan H, et al. Red River and associated faults, Yunnan Province, China: Quaternary geology, slip rates, and seismic hazard. *Geological Society of America Bulletin*, 1984, **95**(6): 686~700
- [45] Ru K, Pigott J D. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea. *AAPG Bulletin*, 1986, **70**(9): 1136~1155
- [46] Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 2001, **292**(5517): 686~693
- [47] Rangin C, Klein M, Roques D, et al. The Red River fault system in the Tonkin Gulf, Vietnam. *Tectonophysics*, 1995, **243**(3-4): 209~222