

南海南部深水盆地构造与储层再认识*

吴时国^{1,2}, 鲁向阳¹, 孙中宇¹, 钱星³, 张莉³

1. 中国科学院深海科学与工程研究所 / 地球物理与资源实验室, 海南 三亚 572000
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082
3. 中国地质调查局广州海洋地质调查局 / 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广东 广州 510075

摘要: 基于近年来获得的探测新资料和已发表地球物理大剖面, 重新厘定了南海南部大陆边缘深水油气盆地构造区划与油气系统。考虑南海张裂边缘近端和远端裂陷盆地的构造差异, 我们认为远端陆缘深水盆地大多以 NE-SW 向张裂构造为特征, 据此厘定了 NE 向张裂盆地构造, 包括南安、曾母和礼乐等深水盆地。从油气储层系统来看, 南沙海区存在着特色深水油气系统集成模式, 包括孤立碳酸盐台地、深水陆源碎屑沉积体系及陆架边缘三角洲的油气成藏模式; 位于南海和古南海盆地之间的南沙地块, 在古近纪就进入深水, 远离陆地, 深水陆源碎屑沉积体系相对不发育, 相反, 发育了一套巨厚的碳酸盐层序, 可望形成独具特色的深水油气系统。南沙海区的这类潜在深水油气系统在南海北部未曾遇见, 特别是古近纪陆源碎屑沉积体系和孤立碳酸盐台地油气系统的共生规律, 必将丰富南海深水油气成藏理论, 拓展油气勘探的新领域。

关键词: 南海; 远端裂陷盆地; 构造区划; 油气系统; 储层

中图分类号: P736.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2022) 01-0063-11

Review on the tectonic and reservoir of the deepwater basin in the southern South China Sea margin

WU Shiguo^{1,2}, LU Xiangyang¹, SUN Zhongyu¹, QIAN Xing³, ZHANG Li³

1. Institute of Deep-Sea Science and Engineering / Laboratory of Geophysics and Georesource, China Academy of Science, Sanya 572000, China
2. South Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China
3. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey/Key Laboratory of Seabed Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510075, China

Abstract: Based on newly acquired seismic data and previous published seismic data, we defined tectonic division and petroleum reservoirs of distal rifting basins in the southern South China Sea (SCS). Considering the differences between proximal and distal rifting basins, we propose that distal rifting basins, including Nanan, Zengmu, and Liyue basins, are mainly controlled by a extensional fault system of NE-SW striking. The hydrocarbon system in this region includes an isolated carbonate platform, deep-water turbidity systems, and shelf-margin delta systems. The distal rifting basin locating between the central basin of the South China Sea (SCS) and Paleo-SCS has been far away from continent and in deep-water as early as Eocene, where sediments are composed of a massive set of carbonates accompanying by deep-water terrigenous debris depositions. The hydrocarbon system in the south-

* 收稿日期: 2021-07-05

录用日期: 2021-07-31

网络首发日期: 2021-09-23

基金项目: NSFC-广东联合基金重点项目 (U1701245)

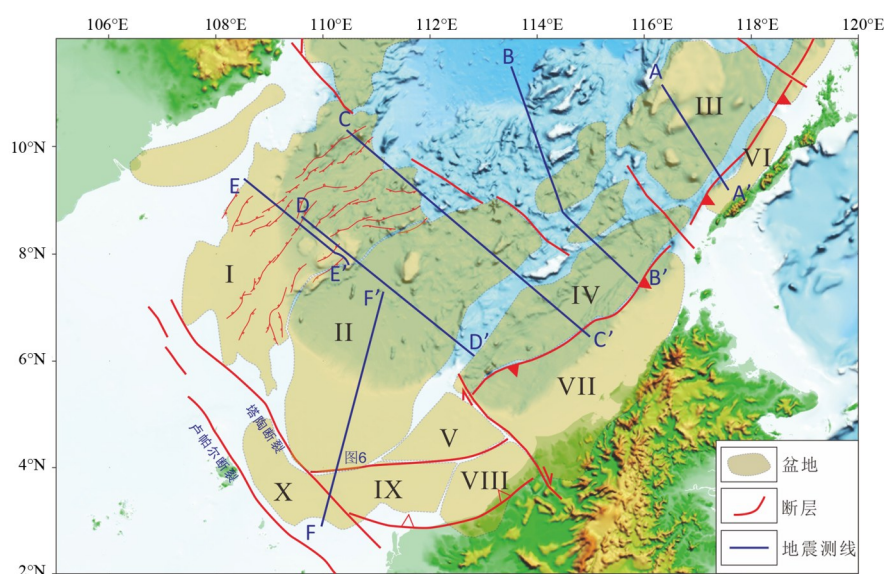
作者简介: 吴时国 (1963年生), 男; 研究方向: 海底构造、深水油气和天然气水合物; E-mail: swu@idsse.ac.cn

ern SCS, especially a combination of shelf-margin delta deposition with the isolated carbonate-platform system, is different from that in the northern SCS. The results enrich petroleum theory and would help to identify new exploration targets.

Key words: South China Sea; distal rifting basin; tectonic division; petroleum system; reservoir

南沙地块是从华南陆缘分离的陆块,是南海共轭大陆边缘的组成部分^[1-4],见图1^[5-7]。南海陆缘自晚白垩纪张裂,形成了宽广的非火山型大陆边缘,宽达1 000 km,这一宽广的被动大陆边缘是研究南海从张裂到海底扩张的典型地区,已成为国际大陆边缘张裂过程的研究热点,是建立和检

验非火山型大陆边缘构造模式的关键场所,引起了国内外科学家的广泛关注^[8-12]。这一重要性,也在大洋科学钻探得到体现,2017年2月开始实施的IODP367/368科学钻探航次,旨在揭示被动陆缘的张裂过程问题^[13]。



I. 南安盆地; II. 曾母盆地; III. 礼乐盆地; IV. 南沙海槽; V. 南康台地(中卢科尼亚台地); VI. 巴拉望盆地; VII. 文莱-沙巴盆地; VIII. 巴林坚; IX. 塔陶垒堑; X. 西南卢科尼亚盆地。

I. Nanan Basin; II. Zengmu Basin; III. Liyue Basin; IV. Nansha Trough; V. Nankang Platform(Central Luconia Platform); VI. Palawan Basin; VII. Brunei-Sabah Basin; VIII. Balingian Basin; IX. Tatao horst-graben; X. Southwest Luconia Basin.

图1 南海南部陆缘深水油气盆地^[5-7]

Fig. 1 Deepwater oil basins on southern margin of the South China Sea^[5-7]

南沙地块的重要特性集中体现在远端裂陷盆地演化和独特的深水油气系统。南沙海区位于南部被动大陆边缘的远端,经历了陆缘裂陷盆地到前陆盆地前缘隆起挤压的构造演化过程。南沙海区在晚渐新世之后,随着远离华南大陆,陆缘硅质碎屑沉积体系相对不发育,相反,发育了大量的孤立碳酸盐台地,这就为形成优质的碳酸盐岩储层提供了基础^[14-15]。因此,近些年对南海深水油气勘探的独特储集系统-大陆边缘生物礁碳酸盐岩沉积体系研究,逐步成为各石油公司的勘探热点^[16-18]。碳酸盐台地时空分布和油气资源潜力是一个很值得重视的勘探领域,形成了具有自身特色

的古近纪至中新世深水油气系统^[19-20]。

目前陆地和浅海地区油气剩余可采资源越来越少,而深水海域蕴藏着丰富的油气^[19-20]。我国三大石油公司近年来都陆续挺进大陆边缘深水油气勘探,但由于深水油气勘探面临诸多基础科学问题和技术难题,使得我国在深水油气勘探领域的研究水平滞后于国际同行,深水油气成藏理论与勘探技术已成为我国海洋石油工业能否占领国际市场的巨大挑战。南海南部南沙海区油气生储盖条件良好,是我国油气资源接替的重要远景区。近年来的深水油气发现,都是由南海周边国家取得,如菲律宾巴拉望近海水深864 m的Malampaya

油气田和水深 350 m 的 Linapacan 油田, 印尼东加里曼丹近海水深 885 m 的 Seno 油田以及马来西亚鲁科尼亚的 F6 构造气田、Kikeh 油田等。临近文莱、马来西亚等国家的勘探实例说明南沙海域确实具有良好的油气勘探前景。然而, 南沙岛礁区的深水油气勘探一直未有突破。究其原因, 尽管与张裂边缘远端裂陷盆地的油气成藏理论与勘探技术难度有关, 主因却是南海中南部沉积盆地的基础地质研究薄弱, 缺乏针对这些特色油气系统的理论研究^[5,10]。然而, 关于盆地的构造区划和演化方面, 国内外有极大的认识差异^[21-22]。这制约了该陆缘构造认识和深水油气勘探。关于南沙海区的深水盆地构造和储层的再认识势在必行。

因此, 针对上述问题, 根据近年来获得的探测新资料, 讨论南海南部大陆边缘深水油气盆地与油气系统, 为拓展油气勘探的新领域提供理论依据。

1 区域地质背景

南海发育了宽约 1 000 km 的非火山型大陆边缘, 与大西洋大陆边缘相比, 具有形成时间新、洋陆过渡带窄的特点, 这可能是一种特殊的大陆边缘, 已经成为国际大陆边缘构造演化的重要类型, 吸引着国内外专家的关注^[4,10,12,23]。关于南海大陆边缘的构造属性, 一直存在着火山型和非火山型大陆边缘的争论^[23-24]。但从层析成像结果来看, 除了在南海东北部陆缘存有较多的张裂期火山岩外, 其他地区火山活动相对较少^[23,25]。目前, 大多数学者比较接受非火山形大陆边缘的观点^[1,23,26]。

针对南海北部大陆边缘的构造演化, 我国已经开展了不少科学研究, 包含大量深反射地震、OBS 探测和钻井^[1,24,27-29]。相对于南海北部陆缘, 南部陆缘的研究十分薄弱, 由此增加了这一共轭陆缘对比的难度。南沙地块与北部边缘如何对应呢? 也存在两种观点: 一种认为礼乐滩与东沙相对应^[30]; 另一种观点则认为南沙群岛与中、西沙地块相对应^[31]。中、西沙地块的莫霍面埋深为 18~26 km 左右, 南沙地块莫霍面埋深多在 20 km 以上, 如礼乐滩、安渡滩、郑和九章群礁达到 24~26 km, 上述特征表明中、西沙地块与南沙地块均为拉张减薄的陆壳, 具有可对比性。南沙地块存在多期裂陷作用, 形成了大量性质各异、规模不一、纵横交错的断裂构造^[32-33]。但是, 因为地球物理资

料品质有限, 关于裂陷期的构造和层序仍存在争议, 尤其是未识别出可靠的拆离断层。根据对婆罗洲和南沙北康盆地的研究, Hutchison^[34] 提出一个重要的中中新世破裂不整合 (MMU, middle Miocene unconformity), 年代为 16 Ma, 在其模式中, 裂陷期自晚中生代到中中新世。Cullen 等^[10] 更加精确地标定了裂陷期的时代, 提出 SCSU 界面。最近国外的研究结果表明, 南沙地块裂陷期与裂后期的界面大多定在早、中中新世之间, 并提出了是碳酸盐台地的发育造成了构造沉降的异常^[4,35]。由此看来, 南沙地块裂陷盆地的构造演化不甚清楚。南沙海区发育一系列与张裂有关的盆地, 如北康盆地、南薇西盆地、礼乐盆地、安度北盆地、九章盆地、永暑盆地、南华盆地等, 还有许多未命名的小断陷。由于盆地基底构造不清楚, 对盆地构造区划也存在较大的争议^[21,26]。

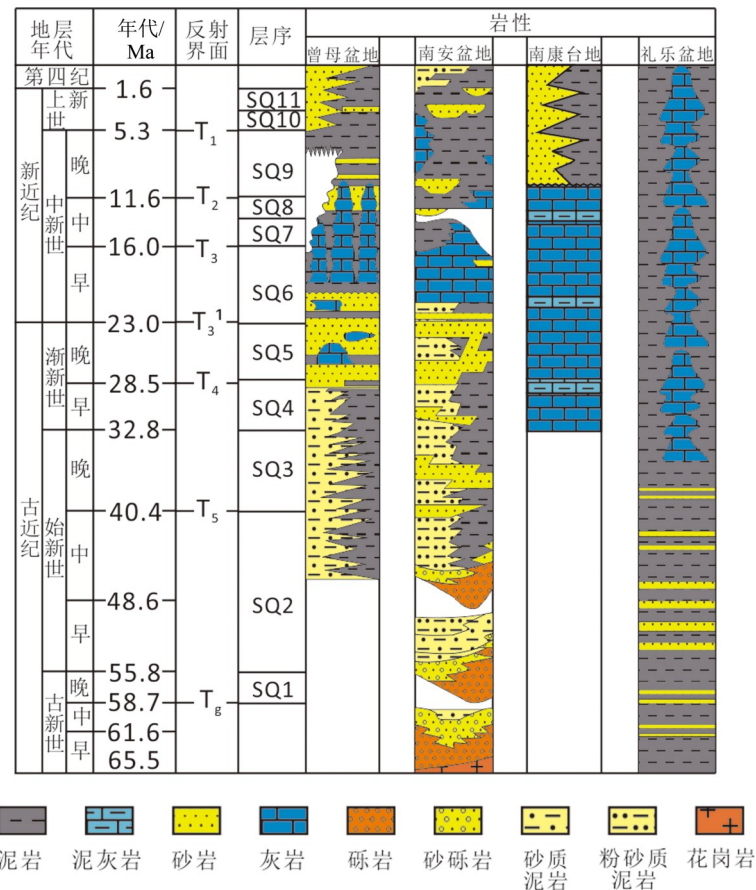
2 南海南部陆缘远端深水盆地构造

2.1 主要反射界面与层序

关于南海南部陆缘盆地构造的认识, 存在两个差异, 一是南沙地块西边界问题, 很多观点认为沿越东断裂、经南安断裂, 向下连接卢帕尔断裂, 作为南部边缘西界^[36], 实际上, 西边界比较复杂, 万安断裂可能不存在, 在卢帕尔断裂和南沙地块之间, 可能还存在一个始新世的前陆褶皱逆冲带 (图 1)。综合考虑南安盆地、曾母盆地均呈 NE-SW 向展布, 我们认为南沙地块的西界至南安盆地和曾母盆地西缘, 因而重新划分了各盆地构造的构造区划。

南沙地块深水盆地总体 NE-SW 走向, 南北分带, 东西分块, 沉积层序东西方向上存在一定差异 (图 2^[36-37])。西部盆地以曾母盆地为例, 古新世-中始新世 (Tg~T5): 发育了一套由同生断层控制的断陷型沉积; 晚始新世-早中新世末 (T5~T3): 由于受到了曾母地块和婆罗洲碰撞的影响, 处于周缘前陆构造位置的曾母盆地发育了一套由陆向海厚度逐渐减薄的地层; 中中新世以来 (T3~现今): 地层以拗陷充填为主, 构造平缓, 断裂系统不甚发育, 总体表现为陆架-陆坡不断向海盆进积, 进入被动大陆边缘演化。

东部盆地以礼乐盆地为特征。整体上以 T3 为界, 分为两个大的不同阶段: 古新世-早中新世末 (Tg~T3): 发育了一套由同生断层控制的断陷型沉积; 以 T5 和 T4 界面分隔为三幕的伸展; 由于南沙

图2 南海南部陆缘远端裂陷盆地层序与演化^[36-37]Fig. 2 Sequence and evolution of the rift basins on the southern margin of the South China Sea^[36-37]

地块和婆罗洲由西向东呈剪刀式的俯冲碰撞，在盆地中构造-地层变形的响应东部比西部强烈；中新世以来（T3~现今）：地层总体表现为由南部、西部向北和东部逐渐上超减薄，断裂的活动较弱但地层仍有轻微的褶皱变形，表明南沙地块和婆罗洲碰撞在盆地东部仍在进行。

根据区域地质资料、研究区与邻区钻井以及地震资料进行综合分析，深水裂陷盆地可划分为11个三级层序（图2）。

首先，超层序界面对应了南海区域构造演化历史中较大的构造运动，在地震剖面上反映为明显的区域性不整合。其中Sg界面（Tg）对应燕山运动末期；S5界面（T5）对应西卫运动^[38]，与Haq等^[39]提出的全球海平面变化曲线对比，T5也对应于中晚始新世间的最大海平面下降；S3界面（T3）在整个南海南部以及东南亚地区表现尤为突出，在国外称之为绿色不整合（green unconformity）或中中新世不整合（MMU），该界面记录了南沙地块与曾母地块碰撞事件，即南海扩张运动的终止。

S1、S2、S4分别对应地震界面T1、T2、T4，

属于次一级不整合界面，它们受控于次级的构造运动以及次级海平面下降，为二级层序及层序组界面。T1界面在区域上对应菲律宾-太平洋板块向NWW俯冲以及台湾弧-陆碰撞的结束，在南海表现为沉积速率最快；T2界面对应了中晚中新世时的全球最大海平面下降事件；T4界面则为一区域破裂不整合界面，对应南海海盆扩张开始。S01、S21、S31、S41、S51界面在地震表现为分布范围相对较小的地震反射界面，它们受控于三级或四级海平面下降以及较小的构造运动，为层序组内三级层序界面。

在超层序及层序组尺度上南沙海域新生代地层大致可以进行统一对比，整个南沙地区新生代地层由于T5界面之下地震资料的品质以及钻井资料的限制，对超层序I（S5~Sg）的研究不确定成分较多，仅限于推测，不可能进行细致研究。

在三级层序的划分中，由于三级层序主要受局部构造的控制，因此各个盆地之间有所不同，需根据沉积层序边界特征和沉积旋回的组合关系，对地震、钻井及古生物等方面的资料进行综合研

究。但如上文已论述过的一样, 根据与其他课题的共同研究探讨, 可认为曾母盆地北部与北康盆地在区域地质背景上具有可比性, 并且两个盆地在沉积上存在密切的成因关联, 因此对两个盆地三级层序的划分上也采用统一方案。该方案有助于整个研究区层序的统一对比, 并且对层序格架下进行沉积成因分析奠定了基础, 可实现整个研究区沉积相研究的无缝拼接。

2.2 盆地主要构造样式

基于穿过南沙海区6条新处理的偏移地震剖面 and 前人发表的构造大剖面 (图3~图4), 厘定了盆地的主要构造时间和反射界面 (图3~图4)。南沙地块深水盆地呈NE-SW向, 发育一系列NE向张性断层 (图3)。地震测线CC'、DD'是穿过曾母盆地的东西向剖面 (图3c)。该剖面发育的新生代地层比较齐全, 以T4界面为界, 可以将地层总体分为两大套, T4界面之下的地层, 受构造的控制作

用明显, 发育数量众多的伸展断层, 早期的断层控制了下部的半地堑式的古新统-中始新统 (T_g~T₅) 发育, 后期的断层则使地层发生了错断, 形成了一系列的断块构造。T₄界面之上的地层受断层的影响较小, 地层的厚度在两侧隆起区较薄, 在盆地沉降最深的康西拗陷内地层最厚, 总体上呈碟形披覆于下部地层之上 (图3c)。

FF'地震测线 (图3d) 由南西到北东经过曾母盆地, 由西南卢科尼亚盆地向北进入塔陶垒堑, 并穿过塔陶垒堑进入曾母盆地南部康西凹陷, 所经过的区域由浅水的陆架区逐渐过渡到深水盆地地区 (图3d)。该剖面发育的新生代地层序列完整。各地层序列的厚度在盆地不同构造单元内有所不同, 在曾母盆地南部的塔陶垒堑构造单元内, 古新统-中始新统为一套厚度变化的由早期活动的同生正断层所控制的半地堑式结构的地层; 上始新统-下中新统 (T₅~T₃) 总体为一套由陆上向海域

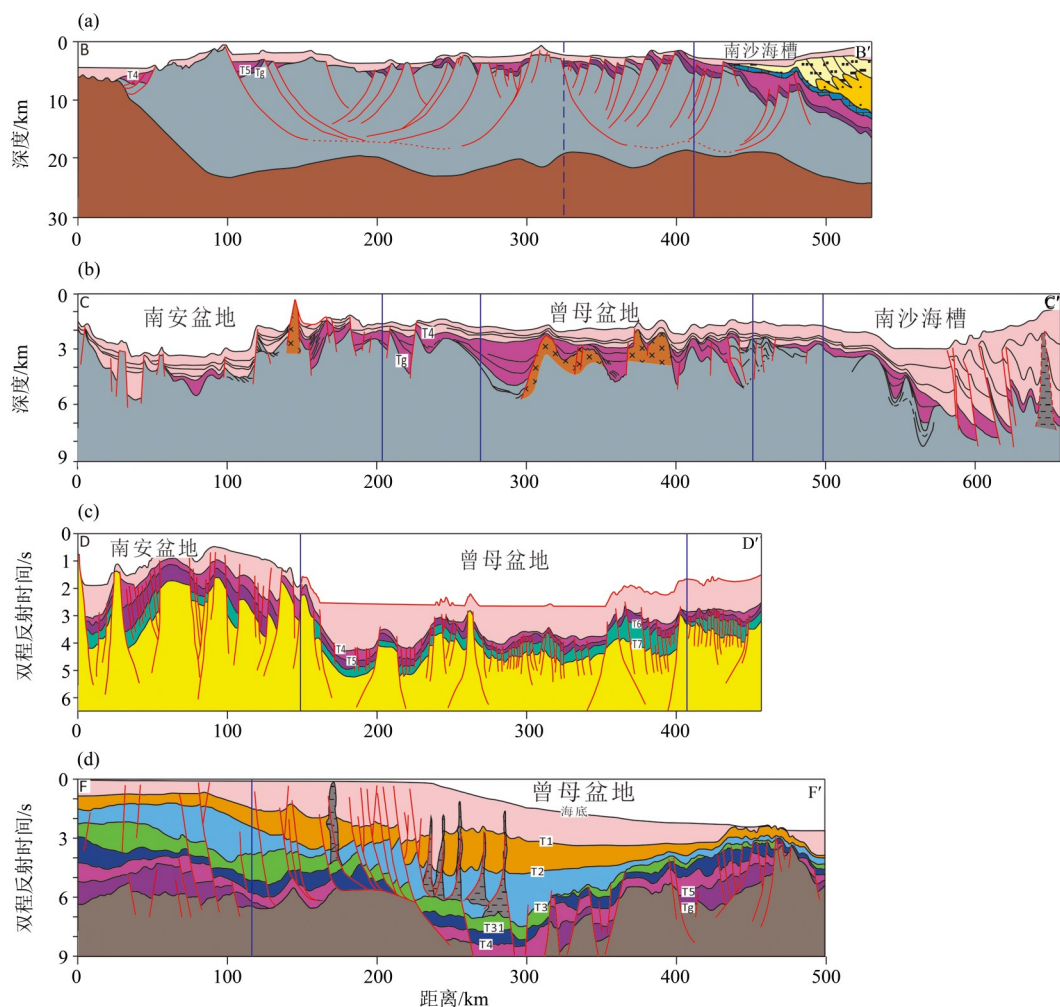


图3 穿过曾母盆地、南沙海槽、洋盆的地质剖面

Fig. 3 Geological sections through Zengmu Basin, Nansha Trough and Ocean Basin

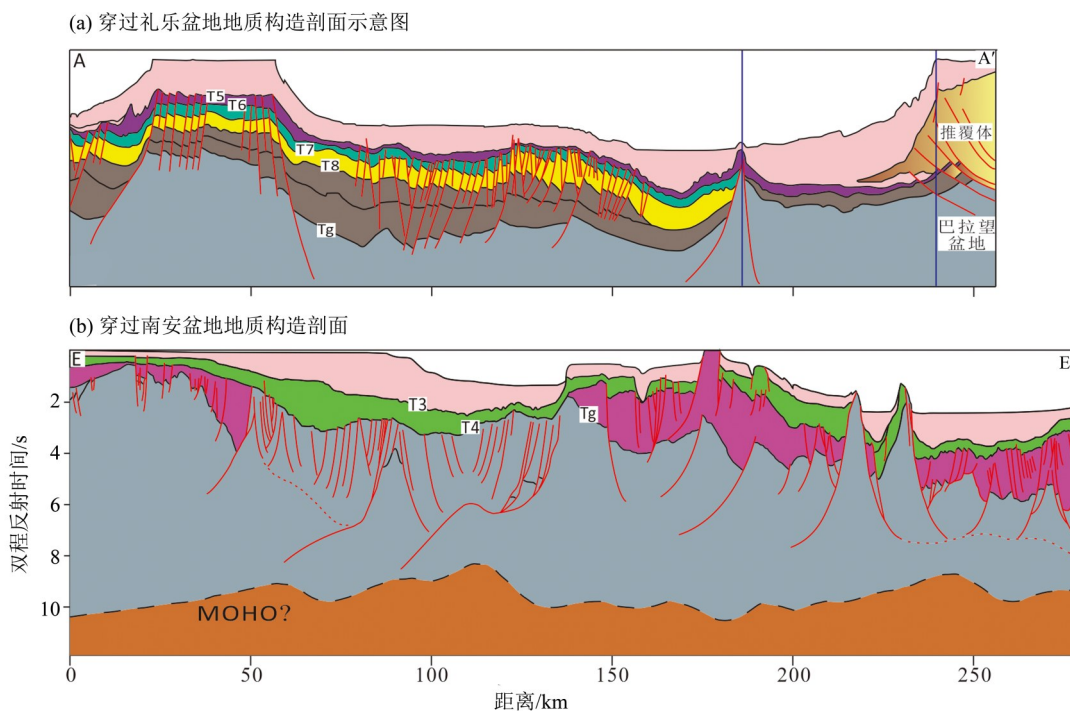


图4 穿过礼乐盆地和南安盆地的地质剖面(剖面位置见图1)

Fig. 4 Geological sections through Liyue Basin and Nanan Basin (See position in Fig. 1)

厚度逐渐减薄的楔形地层,具有超覆结构特征;由中中新统(T3~T2)开始,盆地进入了新的演化阶段,开始了陆架陆坡体系的发育,地层由陆上向海域发生大规模的前积,厚度逐渐变大。由塔陶全堑向北进入康西坳陷,地层的结构和构造样式发生了变化,早期的地层由于沉降太深无法在剖面上揭示,但从盆地演化的构造背景上分析,其总体上还是受控于早期活动的伸展断层,地层的结构和厚度变化不大。而从中中新统开始,地层向康西坳陷的中心部位厚度逐渐加大,由于盆地的陆架陆坡地形及晚期的快速沉积使得沉积地层在重力的作用下沿早期的张性断层发生滑动,这种滑动使得地层内的软弱层发生挤压、加厚并在前缘形成一系列叠瓦状逆冲构造,这种叠瓦状逆冲构造兼具逆断层和流体底辟的性质,在现今的陆架坡折带附近这种滑动冲断构造最发育。由康西坳陷向北进入北康盆地,在西部坳陷内,早期断层的活动仍以伸展为主,控制了下部地层的发育,上中新世末期,在盆地的重要变革界面T3形成过程中,由于受到了南海扩张停止以及西北婆罗洲旋转并与南沙地块发生碰撞的影响,北康盆地遭受了大规模的挤压,使得上新统(T4~T31)及以下地层挠曲褶皱并发生了强烈的剥蚀。T3之后的地层由于盆地的快速沉降以及水深的不断加深,远离物源区,使得地层的厚度较康西坳陷要

小很多(图3d)。

AA'地震测线(图4a)穿过了礼乐盆地中部,并进入到西南巴拉望盆地。剖面中礼乐盆地整体呈现为长且缓的挠曲“背斜形态”。整体来看,以T5为界,T5以下地层受张裂构造作用控制明显,从剖面西部隆起区为中心,向两侧发育众多伸展断层,隆起区和凹陷区在不同时期地层厚度对比较为明显,T8~Tg时期两侧凹陷区地层厚度明显厚于隆起区,T5~T8时期隆起区与凹陷区地层厚度相差不明显,这表明控制隆起区隆起的断层早期活动较为强烈,T8以后构造活动趋缓。T5界面以上,礼乐盆地表现披覆沉积和碳酸盐台地发育。巴拉望盆地向西北发生逆冲推覆,地层挤压变形明显,具有前陆构造特征。图4b为穿过南安盆地中部的NW-SE向剖面,T4以下地层受张裂构造控制明显,表现出完整的地堑结构。在剖面的西部和东部部分断层向深部延伸较深,并且表现出滑脱构造现象,部分断层向T4以上继续延伸,小部分向上一直延伸出海底,造成了剖面东部部分地层缺失。整体同时期地层不同区域差异明显,西部和中部隆起区域T4以上地层明显较凹陷区域更薄。T3以来,形成了完整的陆架陆坡体系。

3 南沙海区深水油气储集体系

大陆边缘的深水油气系统是国内外研究的热

点, 同时, 十分复杂, 也存在极高的风险^[40-41]。位于张裂边缘的远端深水盆地由于缺乏有效储层进一步加大了勘探的风险。然而南沙海区正是因为处于远端张裂边缘, 是发育在减薄陆壳之上的沉积盆地, 中国地质调查局、美国地质调查局、中国海洋石油总公司等权威机构估计南沙地块沉积盆地的油气资源量仍然十分丰富^[22,42]。

关于碳酸盐岩油气系统和陆架边缘三角洲油气系统研究较多。但是, 关于南沙地块盆地深水沉积研究甚少。近年来, 南沙地块至少在渐新世就已进入深水, 位于古南海陆缘的南沙地块深水区, 应该发育了古近纪深水陆缘碎屑沉积体系^[18,43-44], 是否形成了深水砂岩油气系统, 尚存在争议。

3.1 碳酸盐岩油气储集体系

在南海海域已发现 30 多个碳酸盐岩油气田, 特别是生物礁油气田, 如珠江口盆地油田流花 11-1, 曾母盆地西部 L 礁、F6 和 F23, 万安盆地的万安滩, 巴拉望盆地的尼多礁、盖洛克和奎拉等 20 个生物礁油气田^[14-16,45]。关于深水盆地碳酸盐岩油气系统也是值得关注的问题。钻井资料揭示, 礼乐盆地存在古近纪(早始新世-中始新世)的孤立碳酸盐台地^[33,43,45]。南沙海区的碳酸盐台地发育于中新世, 它是在裂陷掀斜断块脊部发育的生物礁碳酸盐台地, 经历了前陆盆地前缘隆褶和迁移, 具有独特的演化规律。为什么在深水背景下发育如此广泛的碳酸盐台地? 这些碳酸盐台地的演化可能造成沉降异常和裂陷延迟的动力学机制也是南沙地块的独特问题^[35]。

国外对南康台地中中新统-上中新统地层中的碳酸盐岩沉积体做了较细致的工作, 提出了该区碳酸盐岩层序发育的基本模式^[46]。每一个沉积旋回的碳酸盐岩发育都有海进和海退沉积序列组成, 并且包含了 4 个基本的碳酸盐岩发育阶段(图 5)。生长期 (building-up) 阶段对应于相对海平面中速上升期, 该阶段发育的碳酸盐岩沉积较纯; 阻滞期 (building-in) 为最大的海泛时期, 该阶段由于水深较深不利于造礁生物生长, 碳酸盐岩沉积停滞, 此时的沉积物中泥质含量明显增多, 这种情况在碳酸盐岩沉积旋回的末期(即补偿期)也会出现; 补偿期 (building-out) 阶段为相对海平面的缓慢上升或下降阶段; 最后, 在海平面下降到最低时, 碳酸盐岩发育进入暴露期 (subaerial exposure) 而终止。

Zampetti 等^[15]利用高精度三维地震资料以及

测井资料对南康台地碳酸盐岩沉积体的内部结构特征做了更为详尽的研究工作, 从碳酸盐岩沉积体内部成功识别出碳酸盐岩沉积旋回, 以及最大海泛沉积界面(图 5)。综合分析南康台地碳酸盐岩发育模式以及淹没不整合型层序模式的特征, 对 L 构造碳酸盐岩层序地层及沉积特征进行剖析, 可归纳研究区中中新统-上中新统碳酸盐岩层序地层模式。该模式在研究区及整个南海南部地区具有普遍意义, 该模式具有以下几点特征: ①研究区中中新统-上中新统碳酸盐岩地层中发育 3 期较大规模的碳酸盐岩沉积旋回, 即可划分 3 套三级层序旋回, 分别为中中新世发育的 SQ7 和 SQ8 层序及晚中新世发育的 SQ9 层序; ②中中新世为碳酸盐岩台地发育期, 该时期沉积的碳酸盐岩地层厚度较大, 延伸范围较广, 在整个南海南部地区分布较为普遍; 而晚中新世时期则主要以台地边缘生物礁体发育为主; ③层序 SQ7 和 SQ8 之间以淹没不整合接触, 钻井上以泥质含量较高的泥灰岩段的出现为其标志性特征, 地震剖面上表现为一组连续性较好的强相位, 具有较强的反射能量, 并常介于上下空白、杂乱反射层之间, 所对应时期的海平面在相对上升期; SQ8 与 SQ9 层序之间不整合接触明显, 钻井上表现为明显的测井曲线突变面, 在地震剖面上该界面有明显的削截、上超等构造不整合特征, 该界面所对应的时代为晚中新世初期最大海平面下降时期。

3.2 深水浊流沉积体系

南沙海区, 位于远端大陆边缘, 具有高度减薄陆壳, 特定的热结构和深水沉积体系。这一方面尚未开展细致的研究。为了推进南海中南部深水油气勘探, 中国海洋石油总公司、广州海洋地质调查局、中国科学院、国家海洋局第二海洋研究所在南沙及其周围完成重力、磁力、地震和 OBS 调查。我们相信通过此项目, 能够促进南沙海区深水油气理论的研究, 建立远端裂陷盆地特色的深水碎屑沉积成藏模式。

目前为止, 关于南沙地块深水沉积体系, 仍然缺乏研究。根据地震测线和构造位置, 存在两类深水水道沉积体系。一类主要发育于晚中新世之后的半深海陆坡及坡底环境, 如南安盆地和曾母盆地, 表现为中-低频、中-强振幅、差连续的充填状地震相, 横向延伸短, 垂向表现为多期叠置现象, 形态上呈现出下切特征和鸥翼状结构。另一类是南沙地块腹地 pond 盆地, 缺乏大型陆源

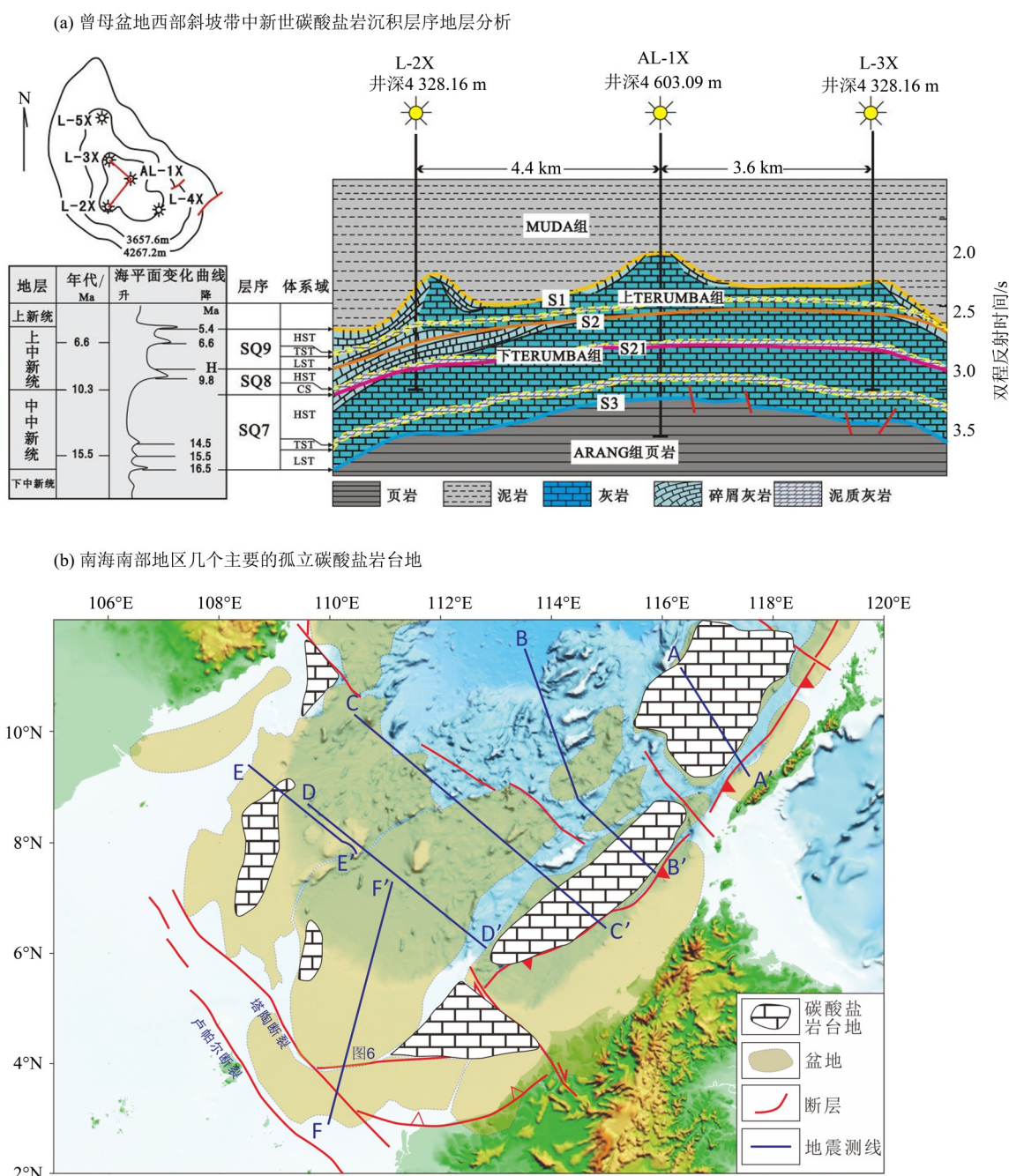


图5 曾母盆地的碳酸盐岩储层

Fig. 5 Carbonate reservoir in Zengmu Basin

物质供给,物源主要来自前陆盆地的前隆地带,物源相对近缘,还有大量碳酸盐岩碎屑,广见于南沙地块南部地区^[40]。

3.3 陆架三角洲—陆架边缘三角洲层序模式及地震相发育特征

与大陆架有关的三角洲主要包括湾头三角洲(bay-head delta)、陆架三角洲(inner-shelf margin)、大陆架三角洲(mid-shelf delta)与陆架边缘三角洲。在一次海平面升降过程中,随着沉积物

的不断向海洋方向转运,沿大陆架逐渐从湾头三角洲—内陆架三角洲—陆架三角洲—陆架边缘三角洲进行递进。湾头三角洲的规模较小,厚度一般只有几米,常见波状交错层理,仅仅是河流三角洲向陆架三角洲发育的过渡阶段。内陆架三角洲与大陆架三角洲规模相对较大,厚度可达几十米,但内陆架三角洲相对大陆架三角洲坡度较缓,近水平发育,平面上常呈鸟足状或马尾状产出;大陆架三角洲坡度相对内陆架三角洲较大,但一般

小于 0.5° 。陆架边缘三角洲较陡, 厚度可达几百米, 坡度可达 $3^{\circ}\sim 6^{\circ}$, 主要因为物源可以沿平缓的大陆架大量运移, 到陆架坡折处由于急剧变陡因而得到大量堆积, 因此陆架边缘三角洲主要沿着大陆坡折附近生长, 并且在陆架坡折处形成最厚沉积。在陆架边缘三角洲的生长过程中, 4个三角洲类型并不是单独形成的, 而是物源沿着大陆架运移不同阶段形成的, 4种三角洲并不是能够明确区分的, 通常只有陆架三角洲和陆架边缘三角洲可以区分开来^[47-48]。

曾母盆地从晚渐新世-早中新世开始主要发育受中卢科尼亚台地(东界)和纳土纳台地(西界)限制的大型NE-SW向张裂盆地, 晚期受巽他三角洲沉积体系控制(图6)。国内外学者也认为自早中新世以来曾母盆地西部一直有三角洲

发育^[38, 47-48]。

对曾母盆地南缘的古水系分布特征的分析结果表明, 发育于加里曼丹西南部的NNE向展布的古巽他河河流三角洲向盆地提供巨量的初始物源; 自渐新世-早中新世以来, 古Rajang/Lupar陆架三角洲快速向北进积; 自17.5 Ma左右则在陆架三角洲之上发育了西卢科尼亚三角洲(图6)^[6-7]。可见研究区三角洲发育自加里曼丹陆架, 也应该经历了典型的与大陆架有关的三角洲发育序列, 即河流三角洲-陆架三角洲-陆架边缘三角洲。对于陆架边缘三角洲层序进积发育模式: ①三角洲终端通过上超逐渐向陆尖灭; ②多期水道的冲刷侵蚀作用导致地层缺失; ③三角洲斜坡向海坡度减小并呈“S”形生长; ④斜坡的近陆地边缘处由于受冲刷侵蚀被切割, 甚至出现下切谷。

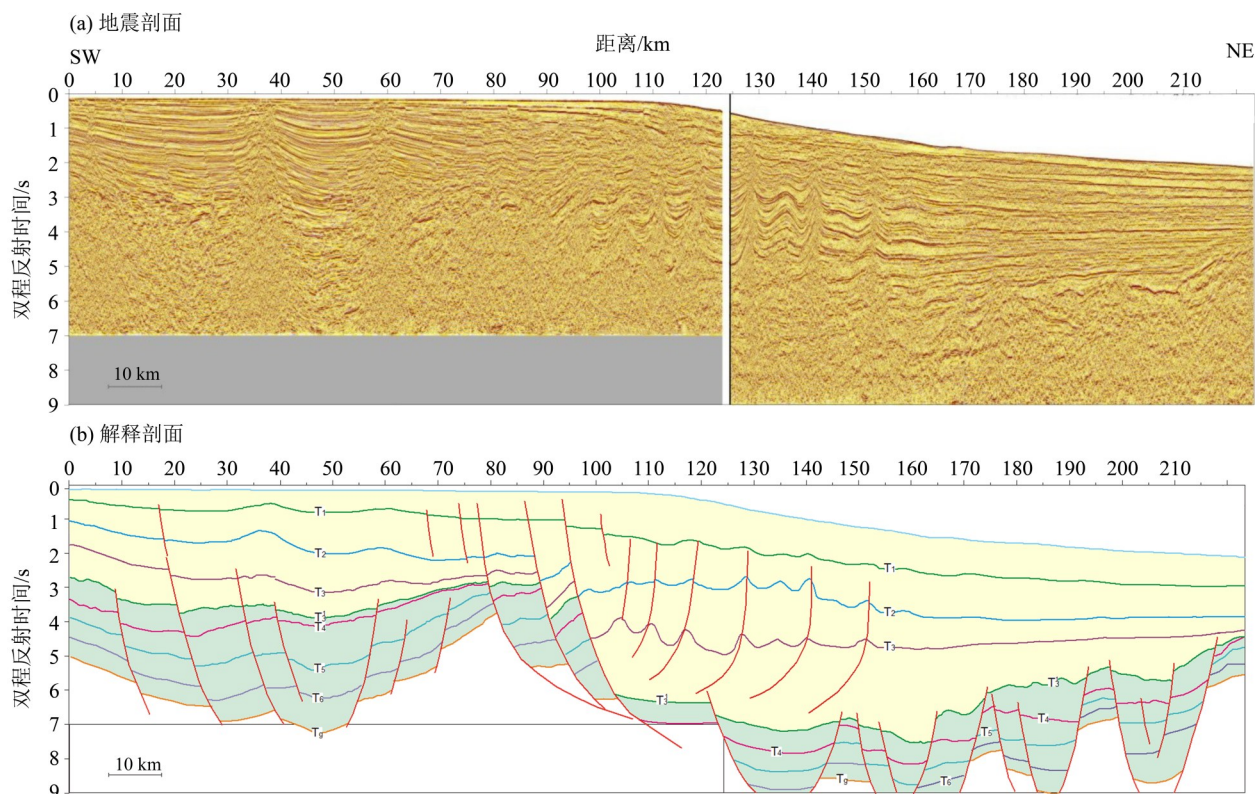


图6 穿过巽他三角洲陆架边缘三角洲的地震剖面(该剖面与剖面FF'位置相同)

Fig. 6 Seismic section across the marginal delta of the Xunda delta shelf(This section is at the same position as section FF')

综合分析地震剖面解释结果及层序格架特征, 并结合国外的研究成果, 归纳总结了研究区大型陆架-陆架边缘三角洲体系的层序地层发育特征, 并建立了相应模式(图6)。①发育的规模较大, 从康西坳陷南缘一直延伸至曾母盆地中部(原北康盆地南部), 其大致发育于巽他陆架和Rajang陆坡之间; ②构成三角洲的单个斜坡体的发育形态

呈反“S”形, “S”形的倾斜沉积结构的最厚部分位于已经存在的推覆转折附近。“S”形的底部出现类似陆架坡折的形态, 随着三角洲的生长沉降中心逐渐向北迁移始终与陆架坡折的生长保持一致; ③三角洲沉积中心随着陆架坡折地向海推进而迁移, 即由南向北迁移; ④由于三角洲前积层向深水区快速进积时表现出极大的不稳定性, 通

常产生同沉积构造,如生长断层发育、顺生长断裂产生的重力滑动、陆架边缘崩塌、大量反转断层以及底辟刺穿结构将依次出现,并且在三角洲前缘发育浊流沉积。

4 结 论

阐明南海南部陆缘近端和远端盆地的构造差异,远端陆缘以深水裂陷盆地为主要特征,主要包括南安、曾母和礼乐等深水盆地。盆地发育完好的地堑、半地堑结构,断裂以NE-SW向正断层为主,伴有NW向走滑断裂构造。盆地位于充分减

薄的陆壳之上,存在拆离断层和盆地张裂过程。我们进一步厘定了盆地构造区划问题。

建立南沙海区古近系至中中新统的特色深水油气系统成藏模式,包括孤立碳酸盐台地、深水陆源碎屑沉积体系及陆架边缘三角洲的油气成藏模式;位于南海和古南海盆地之间的南沙地块,在古近纪就进入深水,远离陆地,深水陆源碎屑沉积体系相对不发育,相反,发育了一套巨厚的碳酸盐层序。南沙海区古近纪陆源碎屑沉积体系和孤立碳酸盐台地油气系统的共生规律,必将丰富南海深水油气成藏理论,拓展油气勘探的新领域。

参考文献:

- [1] 李家彪. 南海大陆边缘动力学:科学实验与研究进展[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 2993-3003.
- [2] 丘学林,赵明辉,敖威,等. 南海西南次海盆与南沙地块的OBS探测和地壳结构[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3117-3128.
- [3] FRANKE D, BARCKHAUSEN U, BARISTEAS N, et al. The continent-ocean transition at the southeastern margin of the South China Sea [J]. *Mar Petrol Geol*, 2011, 28:11987-1204.
- [4] FRANKE D. Rifting lithosphere breakup and volcanism: comparison of magma-poor margin and volcanic rifted margins[J]. *Mar Petrol Geol*, 2013, 43:63-87.
- [5] MORLEY C K, BACK S, van RENSBURG P, et al. Characteristics of repeated, detached, Miocene-Pliocene tectonic inversion events, in a large delta province on an active margin, Brunei Darussalam, Borneo [J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25 (7) : 1147-1169.
- [6] 王利杰,孙珍,姚永坚,等. 南海东南部陆缘Nido灰岩发育特征及其构造控制因素[J]. 地球科学, 2021, 46(3):956-974.
- [7] PUBELLIER M, MORLEY C K. The basins of Sundaland (SE Asia): Evolution and boundary conditions[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58 (part B) : 555-578.
- [8] HAYES D E, NISSEN S S. The South China Sea margins: implication for rifting margin contrast. *Earth Planet[J]. Sci Letters*, 2005, 237: 601-616.
- [9] McINTOSH K, van AVENDONK H, LAVIER L, et al. Inversion of a hyper-extended rifted margin in the southern Central Range of Taiwan[J]. *Geology*, 2013, 41: 871-874.
- [10] CULLEN A, REEMST P, HENSTRA G, et al. Rifting of the South China Sea: new perspectives[J]. *Petroleum Geosci*, 2010, 16: 273-282.
- [11] SAVVA D, MERESSE F, PUBELLIER M, et al. Seismic evidence of hyper stretched crust and mantle exhumation offshore Vietnam [J]. *Tectonophysics*, 2013, 608:72-83.
- [12] SIBUET J C, YEH Y C, LEE C S. Geodynamics of the South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2016, 692 (Part B):98-119.
- [13] SUN Z, LARSEN H, LI C, et al. Testing hypothesis for lithosphere thinning during continental breakup drilling at South China Sea margin[R]. *IODP Proposal*, 2016:878.
- [14] WU S, ZHANG X, YANG Z, et al. Spatial and temporal evolution of Cenozoic carbonate platforms in the continental margin of South China Sea: Response to opening of the ocean basin[J]. *Interpretation*, 2016, 4(3): 1-119.
- [15] ZAMPETTI V, SCHLAGER W, KONIJNENBURG J H, et al. 18-Architecture and growth history of a Miocene carbonate platform from 3D seismic reflection data: Luconia province, offshore Sarawak, Malaysia [M]// ROBERTS D G, et al, eds. *Regional geology and tectonics: Principles of geologic analysis*. Amsterdam: Elsevier, 2012: 512-537.
- [16] FOURNIER F, MONTAGGIONI L, BORGOMANO J. Paleoenvironments and high-frequency cyclicity from Cenozoic South-East Asian shallow-water carbonates: a case study from the Oligo-Miocene buildups of Malampaya (Offshore Palawan, Philippines) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21(1): 1-21.
- [17] VAHRENKAMP V C, DAVID F, DUIJNDAM P, et al. Growth architecture, faulting, and karstification of a middle miocene carbonate platform, Luconia Province, offshore Sarawak, Malaysia [J]. *AAPG Memoir*, 2005(81): 329-350.
- [18] BANERJEE A, SALIM A M A. Stratigraphic evolution of deep-water Dangerous Grounds in the South China Sea, NW Sabah Platform Region, Malaysia[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 201:108434.

- [19] 张功成,米立军,吴时国,等. 深水区-南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J]. 石油学报,2007,28(2):15-21.
- [20] 朱伟林,张功成,钟锴,等. 中国南海油气资源前景[J]. 中国工程科学,2010,12(5):46-50.
- [21] DONG M, WU S G, ZHANG J. Thinned crustal structure and tectonic boundary of the Nansha Block, southern South China Sea [J]. *Mar Geophys Res*, 2016, 37: 281-296.
- [22] 姚伯初,刘振湖. 南沙海域沉积盆地与油气资源分布[J]. 中国海上油气,2006,189(3):150-160.
- [23] GAO J, WU S, McINTOSH K, et al. Crustal structure and extension mode in the northwestern margin of the South China Sea [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2016, 17:2143-2167.
- [24] YAN P, ZHOU D, LIU Z S. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2001, 338(1):1-21.
- [25] SAVVA D, PUBELLIER M, FRANKE D, et al. Different expressions of rifting the South China Sea margins [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58 (part B): 579-598.
- [26] DING W W, LI J B, CLIFT P D. Spreading dynamics and sedimentary process of the Southwest Sub-basin, South China Sea: Constraints from multi-channel seismic data and IODP Expedition 349 [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016(115):97-113.
- [27] 吴振利,李家彪,阮爱国,等. 南海西北次海盆地壳结构:海底广角地震实验结果[J]. 中国科学(地球科学),2011,41(10):1463-1476.
- [28] QIU X L, YE S Y, WU S M, et al. Crustal structure across the Xisha trough, northwest South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2001, 341: 179-193.
- [29] ZHU J J, SUN Z X, KOPP H, et al. Segmentation of the Manila subduction system from migrated multi-channel seismics and wedge taper analysis [J]. *Mar Geophys Res*, 2013, 34: 379-391.
- [30] 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[J]. 地质通报,2005,24(1):1-8.
- [31] 孙珍,赵忠贤,李家彪,等. 南沙地块内破裂不整合与碰撞不整合的构造分析[J]. 地球物理学报,2011,54(12):3196-3209.
- [32] 刘海龄,阎贫,张伯友,等. 南海前新生代基底与东特提斯构造域[J]. 海洋地质与第四纪地质,2004,24(1):15-28.
- [33] YAO Y J, LIU H L, YANG C P, et al. Characteristics and evolution of Cenozoic sediments in the Liyue Basin, South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 60:114-129.
- [34] HUTCHISON C S. Marginal basin evolution: the southern South China Sea [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2004, 21: 1129-1148.
- [35] STEUER S, FRANKE D, MERESSE F, et al. Time constraints on the evolution of southern Palawan Island, Philippines from onshore and offshore correlation of Miocene limestones [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 76:412-427.
- [36] 姚永坚,吕彩丽,王利杰,等. 南沙海区万安盆地构造演化与成因机制[J]. 海洋学报,2018,40(5):62-74.
- [37] ZHANG G C, TANG W, XIE X J, et al. Petroleum geological characteristics of two basin belts in southern continental margin in South China Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*,2017,44(6):899-910.
- [38] 吴进民. 南海西南部人字形走滑断裂体系和曾母盆地的旋转构造[J]. 南海地质研究,1997,9:54-66.
- [39] HAQ B U, HARDENBOL J, VAIL P R. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change [M]// WILGUS C K, et al, eds. *Sea-Level Changes: An Integrated Approach*. Tulsa: SEPM, 1988: 7-108.
- [40] BEGLINGER S, DOUST H, CLOETINGH S. Relating petroleum system and play development to basin evolution: West African South Atlantic Basin [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2012, 30: 1-25.
- [41] WEIMER P, SLATT R. Introduction to the petroleum geology of deepwater settings [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2006: 419.
- [42] OWEN N A, SCHOFIELD C H. Disputed South China Sea hydrocarbon in perspective [J]. *Marine Policy*, 2012, 36: 809-822.
- [43] ZHANG L, LI W C, ZENG X H. Stratigraphic occurrence and its relationship with oil and gas in Liyue Basin [J]. *Experimental Petroleum Research*, 2003, 25(5):469-573.
- [44] 张亚震,李俊良,裴健翔,等. 礼乐盆地深水区新生代生物礁的发育条件与地震特征[J]. 海洋地质与第四纪地质,2018,38(1):108-117.
- [45] GRÖTSCH J, MERCADIER C. Integrated 3D reservoir modeling based on 3D seismic: The Tertiary Malampaya and Camago buildups, off shore Palawan, Philippines [J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83: 1703-1727.
- [46] ALI M Y, ABOLINS P. The petroleum geology and resources of Malaysia [M]. London: Geological Society Publishing House, 1999: 369-392.
- [47] ABDUL M M, ROBERT H. F. WONG. Seismic sequence stratigraphy of Tertiary sediment, offshore Sarawak deepwater area, Malaysia [J]. *Bulletin of Geological Society of Malaysia*, 1995, 37: 3345-3361.
- [48] 郭秀荣,武强,邱燕,等. 南海南部曾母盆地陆缘三角洲沉积特征[J]. 海洋地质与第四纪地质,2006,26(4):1-5.

(责任编辑 张冰)