

doi: 10.12029/gc20200512

聂鑫, 邱燕, Manuel Pubellier, 汪俊, 朱荣伟, 杜文波. 2020. 南海西南次海盆构造特征及其沉积响应[J]. 中国地质, 47(5): 1463–1473.

Nie Xin, Qiu Yan, Manuel. Pubellier, Wang Jun, Zhu Rongwei, Du Wenbo. 2020. Tectonic characteristics and sedimentary responses of the southwest Subbasin of the South China Sea[J]. Geology in China, 47(5):1463–1473(in Chinese with English abstract).

南海西南次海盆构造特征及其沉积响应

聂鑫^{1,2}, 邱燕¹, Manuel Pubellier³, 汪俊¹, 朱荣伟¹, 杜文波^{1,2}

(1. 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 51760; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458; 3. Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure, C.N.R.S. UMR 8538, 24 rue Lhomond, Paris 75231, France)

摘要: 本文对穿过南海西南次海盆的逾 1000 km 的多道地震测线 CFT 剖面进行了地震界面特征的识别和地震层序的划分, 分段分析了拆离断层对其减薄陆壳的拆离作用。结合前人研究成果, 对南海西南次海盆地壳结构特征开展了分析, 并总结了其构造特征。西南次海盆在发生陆缘张裂—海盆扩张、洋壳出现—扩张后稳定沉积这一系列过程中, 可划分为 4 个阶段的沉积响应: A 阶段(古新世之前)——前裂谷阶段, 表现为地壳在拉张应力下产生小的断层; B 阶段(始新世—早渐新世)——陆缘的裂谷阶段, 地壳在拉张应力下拉张减薄, A 阶段产生的断层出现了旋转, 出现了大型掀斜的拆离断层, 沉积物为同裂谷沉积, 该阶段以产生了破裂不整合结束; C 阶段(晚渐新世—早中新世)——海盆扩张阶段, 海盆开始扩张, 张应力从陆缘转移到了洋盆; D 阶段(中中新世以来)——海盆扩张结束以后, 以一套稳定沉积为特征。

关键词: CFT 剖面; 破裂不整合; 洋盆扩张; 沉积响应; 西南次海盆; 海洋地质调查; 南海

中图分类号: TE122.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–3657(2020)05–1463–11

Tectonic characteristics and sedimentary responses of the southwest Subbasin of the South China Sea

NIE Xin^{1,2}, QIU Yan¹, MANUEL Pubellier³, WANG Jun¹, ZHU Rongwei¹, DU Wenbo^{1,2}

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Key Laboratory of Marine Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 51760, Guangdong, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, Guangdong, China; 3. Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure, C.N.R.S. UMR 8538, 24 rue Lhomond, Paris 75231, France)

Abstract: In this paper, the authors analyzed over 1000 kilometers' multi-channel seismic line (the CFT profile) across the southwestern subbasin of the South China Sea, with identification of seismic interface characteristics and seismic sequence division,

收稿日期: 2019–10–29; 改回日期 2020–04–02

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0207)、中国地质调查局项目(DD20160138、DD20190627、DD20190209、DD20191002、GZH201400203)及国家自然科学基金委员会—广东省联合基金重点项目(U1901214)和国家自然科学基金项目(41572083、41606080) 联合资助。

作者简介: 聂鑫, 女, 1986 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋沉积地层和地震地层的研究; E-mail: nie_xin@126.com。

通讯作者: 邱燕, 女, 1956 年生, 博士, 教授级高级工程师, 长期从事海洋地质与大地构造研究工作; E-mail: zqyan@21cn.com。

and analyzed the detachment effect of detachment faults on the thinning of continental crust in segments. On the basis of the previous research results, an analysis of the crustal structure characteristics of the South China Sea was carried out, and its structural characteristics were summarized. The southwest sub-basin can be divided into four stages of sedimentary response during the series of continental marginal rifting and sea basin spreading and post-expansion: Stage A was the pre-rift stage, showing that the small faults was generated under tensile stress; Stage B was the rifting stage, when the crust of continental margin was thinning in the tensile stress, the fault generated in Stage A was rotated, and the large tilting detachment fault appeared. The sediments were the synrift deposits, and this stage ended with the breakup unconformity; Stage C was the basin expansion stage, during which the sea basin began to expand and the tensile stress shifted from the continental margin to the ocean basin; Stage D was the post-spreading stage, after ending of the basin expansion, the sediments were a set of stable deposits.

Key words: CFT profile; breakup unconformity; ocean basin expansion; sedimentary response; southwest subbasin; marine geological survey; South China Sea

About the first author: NIE Xin, female, born in 1986, master, senior engineer, mainly engages in the study of marine sedimentary strata and seismic strata; E-mail: nie_xin@126.com.

About the corresponding author: QIU Yan, female, born in 1956, doctor, professor, engages in marine geology and geotectonic research; E-mail: zqyan@21cn.com.

Fund support: Supported by Key Special Project for Introduced Talents Team of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou) (No. GML2019ZD0207), China Geological Survey Project (No. DD20160138, No. DD20190627, No. DD20190209, No. DD20191002, No. GZH201400203), The Joint Program of NSFC and Guangdong Province (No. U1901214) and National Natural Science Foundation of China (No. 41572083, No. 41606080).

1 引 言

南海中央海盆经历了海底扩张形成洋壳、岩浆溢出造成火山链以及海盆板块俯冲消减等构造事件。西南次海盆是南海中央海盆的一个次海盆,位于该海盆的西南部,其地壳结构特征和构造属性是研究南海海底扩张的重要内容。西南次海盆区及周缘的地壳结构变化和沉积层特征,均包含南海扩张的重要信息,需要深入研究。更为重要的是,西南次海盆北邻中建南盆地,南接南沙地块诸盆地,而这些盆地又都是具油气潜力的重要盆地,因此研究西南次海盆深部地壳结构,建立该区地壳形成演化和变形过程规律,达到科学地认识这些规律以及产生的原因,对认识其相邻的含油气盆地的特征均具有重要意义(姚伯初,1997)。

南海西南次海盆是一个在 15.5 Ma 左右停止扩张的残留扩张脊,前人对其进行了大量的研究。宋海斌(1998)采用三维频率域变密度迭代方法计算了西南次海盆的 Moho 面为近对称穹隆状对称分布。唐仁敏等(2006)利用重力梯度方法反演了西南次海盆的深部结构,指出在 6~15 km 处存在一个密度界面,沿 NE-SW 向以西南海盆扩张轴为对称轴呈穹隆状对称分布,其中间较薄、两侧较厚,反映

了西南次海盆 NE-SW 向的海底扩张形态(唐仁敏,2006)。赵长煜(2011)认为西南次海盆洋壳基底存在两种类型,一种是火山型基底,另一种为掀斜断块型基底。李家彪等(2012)认为西南次海盆为强烈构造拉张作用下的渐进式扩张机制形成的。前人对西南次海盆 Moho 面、深部结构、基底类型、海底扩张方式等进行了大量的研究,由于该研究区域构造的复杂性及资料的局限性,对于西南次海盆的研究还有大量的工作需要深入。本文通过对横跨西南次海盆的多道地震反射特征分析,揭示不同的构造阶段、不同构造部位的沉积表现,从而印证西南次海盆所经历的 4 个构造期次。

2 地质背景与资料来源

南海西南次海盆位于南海中沙地块、西沙地块和南沙地块之间,在 115°E 附近与南海东部次海盆相连,平面形态总体呈一个往 NE 方向开口、尖角朝 SW 方向的似三角形盆地(或 V 形盆地)。海盆长轴方向为 NE-SW 向,总长约 600 km,最宽处约 400 km,水深 3000~4400 m。海盆底部相对平坦,其上分布着大小不等的海山、海山链或海丘(邱燕,2005)。构造总体走向以 NE 向为主,扩张中心被线性中央裂谷占有,构成与东部海盆截然不同的特点。

为了更为准确地确定沉积地层的速度、沉积基底以及之下的各种速度层的位置,使之更为精确地认识深部地壳结构特征,2011年广州海洋地质调查局与法国巴黎高等师范学院合作在南海西南次海盆及邻区进行了海底地震仪和长电缆地震同位置调查,并辅助于重、磁的同位置调查。布设了50个海底地震仪测站,以及相应的重、磁调查。OBS投放间隔12~100 km,总测线长度达1000 km,采用等距离单边放炮,作业炮间距为150 m。2013年同位置布置了长达6~8 km电缆的多道地震探测,总称为CFT(China France cooperation of Transect)测线。该测线布设范围为10°N~17°N,109°E~116°E(图1),测线从南海北部海南岛南部陆坡始,途经诸多构造和地质单元,穿过西南次海盆,直到南海南部的南沙群岛区止,全长1000 km余,采用648道Seal数字电缆,道间距12.5 m,电缆深度12 m,电缆深度2.0 m,最小偏移距250 m,作业炮间距为50 m,

震源总容量0.1049 m³,沉放深度为10 m。这是迄今为止在南海所做的最长的一条海底地震仪、重、磁、长电缆地震同位置调查的测线。

从图1可知,该剖面途经了华光凹陷,广乐隆起,中建南盆地、盆西海岭、西南次海盆、双子群礁、郑和盆地、仁爱礁等地质构造单元。

3 西南次海盆的地层划分及界面和层序特征

运用地震地层学基本原理,根据地震剖面上侵蚀、削截、顶超、上超及下超等反射波终止类型,结合地震反射层组特征,在CFT地震剖面上自上而下识别出T₀、T₁、T₂、T₃、T₅、T₆、T₇、T₈、T_g、T_{Mz}共9个地震反射界面(图2),并结合区域地质资料将反射层组以T₅、T₇、T_g为界划分出4个超层序:Ⅰ(T₀-T₅)、Ⅱ(T₅-T₇)、Ⅲ(T₇-T_g)和Ⅳ(T_g-T_{Mz})。在超层序中可进一步划分出9个地震层序A、B、C、D、E、F、G、H、I

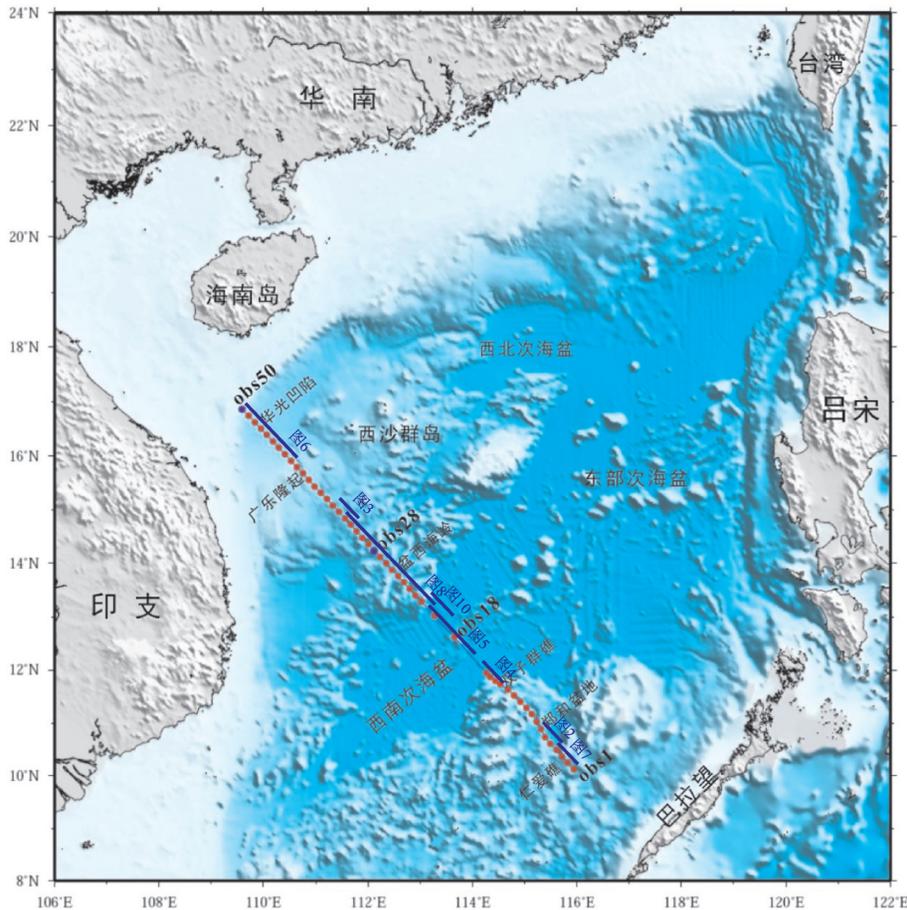


图1 中法合作综合地球物理测线(CFT测线)位置图(红色小圈为OBS测站位置)

Fig.1 Location of the comprehensive geophysical survey of China-France cooperation of transect (CFT)

(表1,图2)。以下自老而新分析各层序特征。

3.1 超层序IV(T_g-T_{Mz})

超层序IV(T_g-T_{Mz}):仅含一套层序I,主要分布在南部陆架、陆坡局部区域,其层组反射特征如下:

层序I(T_g-T_{Mz}):总体为一套中-低频、中-强振幅、低连续-杂乱的反射层组,偶见连续性较好的反射, T_{Mz}是一个构造剥蚀面,出现比较局限,大部分区

域未见此界面,被深部断层切割强烈。

3.2 超层序III(T₇-T_g)

超层序III(T₇-T_g)也是仅含一套层序,即层序G。

层序G(T₇-T_g):该层序的成层性总体上较优于层序H,多数为一套中-低频、中-强振幅、中-低连续的反射层组,偶见杂乱反射(图3)。以同生断层控制下形成的楔状外形为主,内部亚平行结构,

表1 地震层序划分
Table 1 Seismic sequence division table

年代地层单位				年龄 /Ma	地震界面	超层序	地震层序	构造事件			
界	系	统									
新 生 界	第四系	全新统	Q	2.6	T ₁	I	A	扩张结束后阶段			
		更新统					N ²		B		
	上新统	上	N ₁ ³	C							
		中新统	中	N ₁ ²	D						
	渐新统		下	N ₁ ¹	23.0	T ₆	II	E	海盆扩张阶段		
		上	E ₃ ²	28.1	T ₇	F					
	古近系	始新统	上	E ₂ ³	41.2	T ₈	III	G	陆缘裂谷阶段		
			中	E ₂ ²							
		古新统	下	E ₂ ¹	56.0			T ₈		H	前裂谷阶段
			上	E ₁	66.0						
	中生界					T ₈	IV	I			

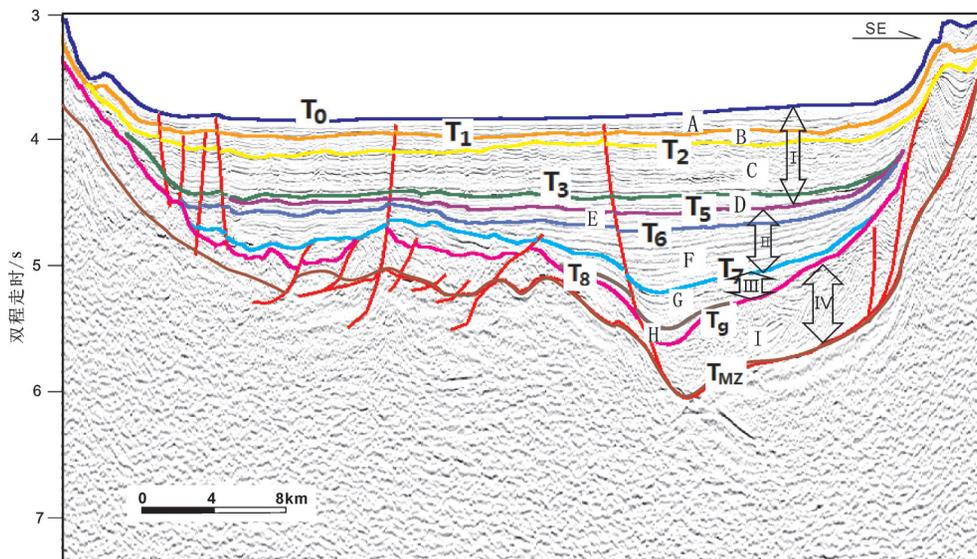


图2 CFT多道地震剖面反射界面与地震层序划分

Fig.2 Divisions of seismic interfaces and seismic sequences of CFT multi-channel seismic profile

与上部层序为不整合接触。在华光凹陷、尤其是中建南盆地北部拗陷中部,该层序厚度较大,往隆起边缘逐渐减薄(图3),层序外形总体亦呈楔形。

层序H(T_8-T_9):该层序多数为一套低频、中—强振幅、中—低连续的反射层组,偶见杂乱反射(图3)。同生断层少见发育,层序外形总体亦呈楔形。

3.3 超层序 II (T_5-T_7)

超层序 II (T_5-T_7)包括层序F(T_6-T_7)和层序E(T_5-T_6)。层序F(T_6-T_7)分布在陆架、陆坡区,层序E(T_5-T_6)在陆架、陆坡区和西南次海盆中均有分布。

各层序反射特征如下:

层序F(T_6-T_7):总体呈中频、中—强振幅、中—高连续反射,以平行—亚平行结构、席状—发散外形为主,在同生断层控制的边缘大多表现为同沉积特征(图4),在凹陷内多为填充沉积,底部为凹面,顶部较平,可见上超、下超现象。由于界面 T_7 在西南次海盆缺失,因此在西南次海盆中无该层序发育。

层序E(T_5-T_6 、 T_5-T_{oc}):总体呈中频、中—强振幅、中—高连续反射,沉积较薄。在南沙岛礁区的郑和地块一带,该层序与层序F特征类似,以内部平行—亚平行结构、席状—发散外形为主,为凹陷填充沉积,底部为凹面,顶部较平。西南次海盆缺失 T_7 界面,海盆的 T_{oc} 界面具有穿时性, T_6 界面仅出现西南次海盆边缘,往海盆延伸渐与 T_{oc} 界面重合,而 T_5 界面在海盆中部与 T_{oc} 界面重合,因此在西南次海盆该层序仅出现在西南次海盆边缘,为 T_6-T_{oc} (图5)。

3.4 超层序 I (T_0-T_5)

该超层序为最顶部的一套超层序,包括层序A、层序B、层序C和层序D四套层序,在陆坡和海盆中均有发育。其主要特点是一套厚度较稳定的披覆沉积,体现了稳定的水体环境。

各层序反射特征如下:

层序D(T_3-T_5):该层序在南沙岛礁区主要为一套高频、中连续反射,平行—亚平行结构、弱振幅—空白反射的薄层(图3,图4);在西南次海盆中内部结构表现为连续、平行反射;在琼东南盆地区和南海北部陆架、陆坡区厚度增加,为一套强振幅、中连续、亚平行—杂乱结构的层序(图3)。

层序C(T_2-T_3):该层序广泛发育,总体为高频、中—强振幅、高连续的反射层组,具平行—亚平行反射结构,呈席状披盖外形(图4,图6)。在西南次海盆区为层组特征稳定、变化不大的反射;在琼东南盆地华光凹陷有明显的波状起伏现象,内部反射为充填状或透镜状,广泛发育水道群,剖面上可见外形为明显的“U形”或“V”形的充填沉积(图6),是充填水道的地震响应,有些区域可见叠置的充填水道反射。

层序B(T_1-T_2):该层序广泛发育。层序内部反射层组总体为高频、中—强振幅、高连续反射,具平行—亚平行反射结构,呈席状披盖外形,厚度稳定,局部具发散结构(图6)。有些区域可见明显的波状起伏反射,偶见充填状和杂乱状反射,局部发育水道充填沉积。

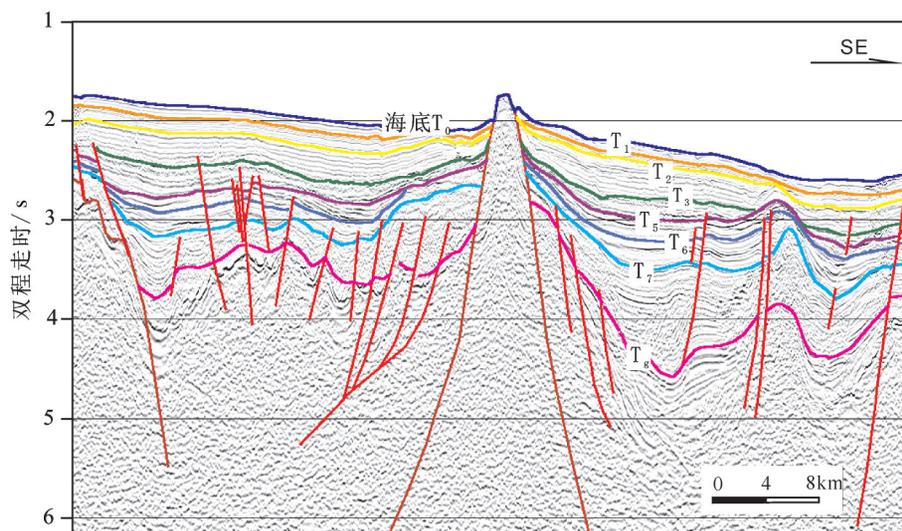


图3 华光凹陷与中建南盆地北部拗陷地震界面反射特征

Fig.3 Reflection feature of the seismic interfaces of the Huaguang Sag and the northern sag in Zhongjiannan Basin

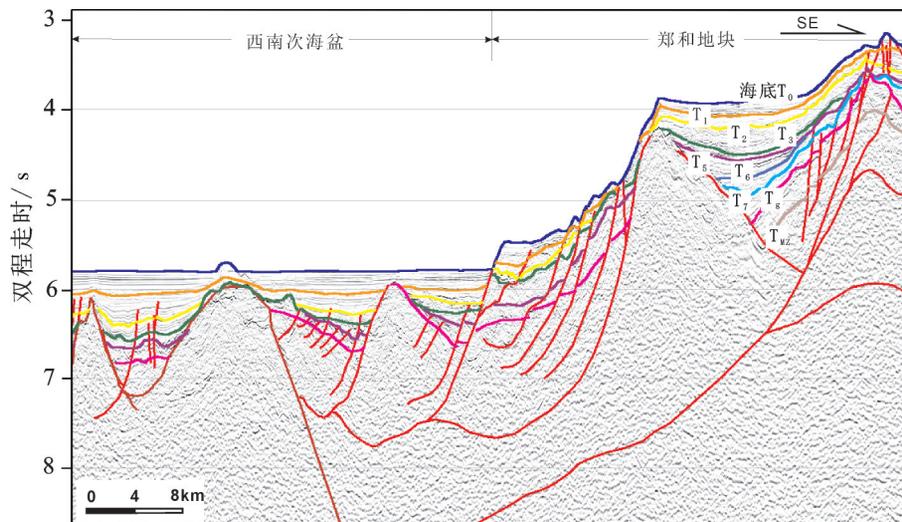


图4 郑和地块区段层序F(T₆-T_g)层组特征
Fig.4 Layer reflection feature of the sequence F(T₆-T_g) in the Zhenghe Block

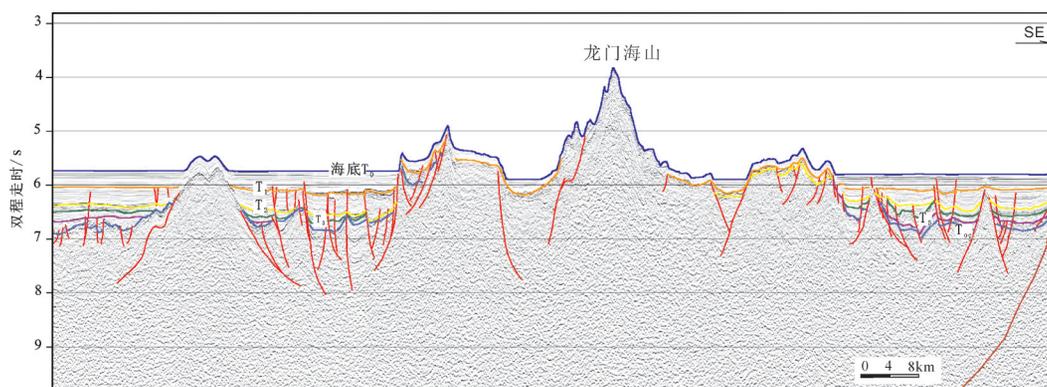


图5 西南次海盆中部地震层序发育特征
Fig.5 Feature of the seismic sequences of the central southwest Sub-basin

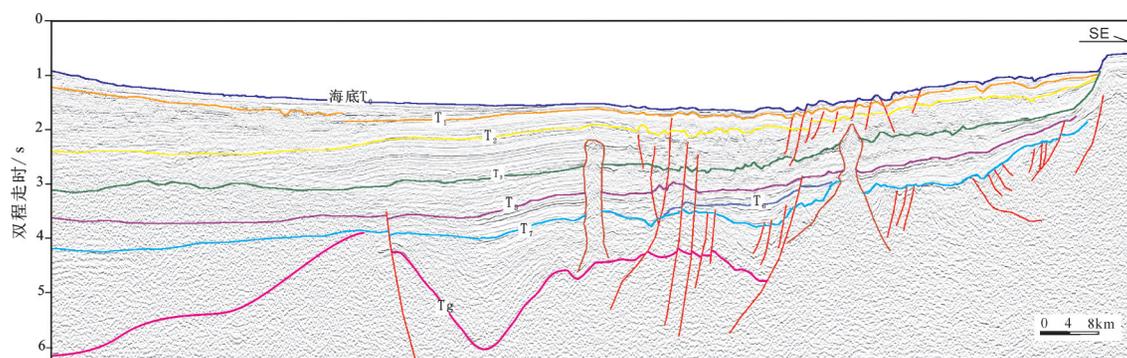


图6 华光凹陷层组反射特征
Fig.6 Layer reflection feature of the Huaguang sag

层序A(T_0-T_1):本层序广泛分布。底界面为 T_1 ,顶界面为 T_0 (海底)。层序总体呈中—高频率、中—弱振幅、高连续、平行结构、席状—席状披盖外形,局部可见同相轴呈波状反射,水道下切现象比较常见。在隆起区域,层序内部反射特征明显不同,表现为中频、弱振幅—空白反射,连续性变差。在西南次海盆区,该层序变厚,为一套厚度均匀的、中—强振幅、高连续反射层组。

由于本剖面没有通过任何钻井,地震反射界面地质属性的讨论主要靠收集的附近钻孔的地层划分来进行,以及地震反射界面结合构造运动分析来推断。参考了120-CS-1X井、XC-1井、U1433井等钻孔分层数据及构造运动期次和不整合面对应关系,共同认为,地震层序的划分如下:层序A(T_0-T_1):第四系;层序B(T_1-T_2):上新统;层序C(T_2-T_3):上中新统;层序D(T_3-T_4):中中新统;层序E(T_4-T_5):下中新统;层序F(T_5-T_6):上渐新统和部分下渐新统;层序G(T_6-T_7):下渐新统一上始新统;层序H(T_7-T_8):中始新统一古新统;层序I(T_8-T_{Mz}):中生界。

4 西南次海盆构造特征

在新生代期间,南海经历了陆缘张裂—海盆扩张、洋壳出现和增生—洋壳俯冲消亡和陆陆碰撞过程(Fyhn, 2009),表现在西南次海盆上主要为陆缘张裂—海盆扩张、洋壳出现—扩张后稳定沉积这一系列过程。西南次海盆陆缘张裂阶段,在强烈的拉张作用下,陆壳被拉成了一系列地堑或半地堑构造,深大同沉积断层的发育使得地堑或半地堑上沉积了一套同张裂沉积,这样的大型断层形成了一铲式断层,收敛于同一滑脱面,该滑脱面以上的地层和断层都发生了旋转和倾斜,也影响着基底形态起伏变化(图7)。陆缘裂谷阶段结束之后,随着海盆的扩张,仍有大量非均匀的张裂活动存在。扩张时的沉积仍伴有同沉积特征。后扩张期沉积地层主要表现为全区披盖的近水平沉积,地层厚度相对稳定,随着基底隆起呈波状起伏展布,断层破坏较小(李家彪,2011)。

通过局部的滑脱构造(图7),显示了大陆裂谷和洋盆扩张的证据。大的铲状断层是在三维空间连续存在的一个大的滑脱面,该滑脱面以上的地层和断层都发生了旋转和倾斜。其中,从地层上看: T_7-T_8

之间的地层在裂谷作用下,沿着大的铲状断层发生掀斜,断层作用时间长,使得地层呈现出同沉积的特征; T_5-T_7 之间的地层是继裂谷作用之后沉积的,即洋盆扩张时陆缘的沉积,也具有同沉积特征,说明了洋盆扩张时期,陆缘断裂继承性发育,仍有活动性; T_5 以后,洋盆完成扩张,断层活动停止, T_5 以上沉积一套全区披盖的近水平沉积,地层厚度相对稳定。从断层方面来看: T_8 以下小断层产生于 T_8 之前,小断层收敛到一个潜在的滑脱面(地震剖面上看不到), T_8 以后,大的滑脱面的运动使得 T_8 之前的小断层发生了旋转。这个潜在的滑脱面是机械不连续的弱层产生的,由岩性或者地层突变而引起,故可以怀疑,这个潜在滑脱面是新生界和中生界的分界。

从整体上看,在陆缘张裂阶段和海盆的扩张阶段,西南次海盆构造特征主要受拉张力、岩浆作用的影响,主要特征表现在以下三个方面:

(1) 拉张应力下大型拆离断层的发育

T_7 之前,大型的拆离断层沿着滑脱面在拉张应力的作用下将上陆壳拆离成一系列掀斜的块体,北部大型的拆离断层的滑脱面深度可以达到海底5~6 s,根据花岗岩的速度,推测沿着拆离断层的滑脱面深度为15 km左右,这刚好符合我们对上下地壳分界的预估,认为拆离断层是沿着上下地壳进行的拆离。在西南次海盆这个强烈拉伸的区域应力环境下,下地壳也被拉伸减薄的特别厉害,加之下地壳的塑性流动,形成了下地壳的“石香肠化”形态,也暗示了伸展的下地壳取得了均衡补偿(图8)。

(2) 贫岩浆、薄洋壳

由于西南次海盆地层中可以识别明显的断裂活动,原始地壳厚度较薄,CFT测线在海盆中显示包含沉积层在内的洋壳厚度5~7 km,(图9)呈现中间稍厚、两侧稍薄的特征,进而推算出西南次海盆地壳厚度异常薄,仅为1.5~3.6 km(沉积层除外)。在南海裂谷期和海底扩张期,南海的大陆边缘上虽然存在岩浆火山,但岩浆的分布面积和厚度从规模上看都较小,没有见到洪流玄武岩层和巨厚的底侵层,而具有岩浆匮乏型大陆边缘的特点(Geoffroy, 2005)。说明西南次海盆海底扩张时岩浆供应不足。因此,南海西南次海盆的海底扩张为构造主导型。

海底扩张时洋中脊处的岩浆供应量可以由地震探测得到的洋壳厚度来衡量(White et al., 1992;

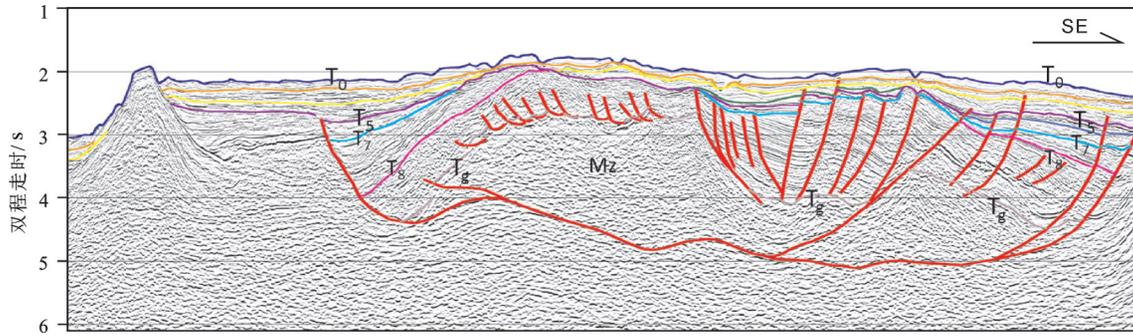


图7 测线最南端陆壳张裂特征
Fig.7 Continental crustal rifting feature of the southernmost end

Minshull et al., 1998; Hopper et al., 2004)。富岩浆型海底扩张产生的洋壳一般较厚,大于 5.5 km,平均 7.1 km(White et al., 1992)。然而,贫岩浆型海底扩张产生的洋壳通常较薄(小于 5 km)甚至缺失,上地幔岩石可能被部分蛇纹石化甚至直接出露海底。例如,北大西洋纽芬兰大陆边缘的洋壳厚度仅为 3~4 km(Hopper et al., 2004)、西南印度洋中脊(Cannat et al., 2006)地壳缺失,地幔岩石直接出露海底。

南海西南次海盆的地壳异常的薄,且与由卫星重力数据反演得到的结果(1~4 km)一致(Braitenberg et al., 2006; Gozzard et al., 2018)。

(3)疑似地幔暴露

近来,Savva et al. (2013)、McIntosh et al. (2014)分别提出在中建南盆地和台南盆地存在强一超级地壳裂谷拉张,导致地壳极度减薄甚至拉断,出现

地幔直接出露在海底被蛇纹岩化。Franke et al. (2014)推测,在南海南北陆缘靠海盆区都存在拉张剥露的地幔蛇纹岩带。因此,在构造主导的西南次海盆海底扩张的应力环境下,在拆离断层将地壳拆离的同时,存在着将地幔拉出地表的可能性。

从CFT剖面(图10)可以清楚地观察到地幔上拱,莫霍面升高,但并不能通过①和②两个反射界面确定到底哪一个是莫霍面,不能确定是否真正存在地幔暴露。然而在这个强烈拉张应力使地壳拉张减薄的条件下,是很有可能出现的。如果地幔被拉出,它会和浅部物质或者海水接触发生蛇纹石化,形成大洋核杂岩,大洋核杂岩成分主要为地壳深部和上地幔的物质。然而,OBS在海盆中间布设密度不够,在地震剖面上无法确认准确莫霍面的位置,只有通过钻井才能得以验证。

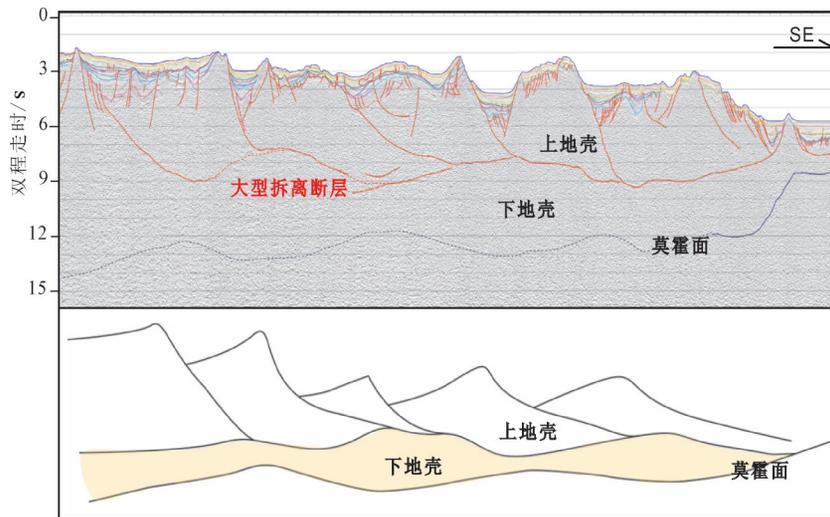


图8 海盆以北大型拆离断层特征
Fig.8 Characteristics of large detachment faults in the north of the sea basin

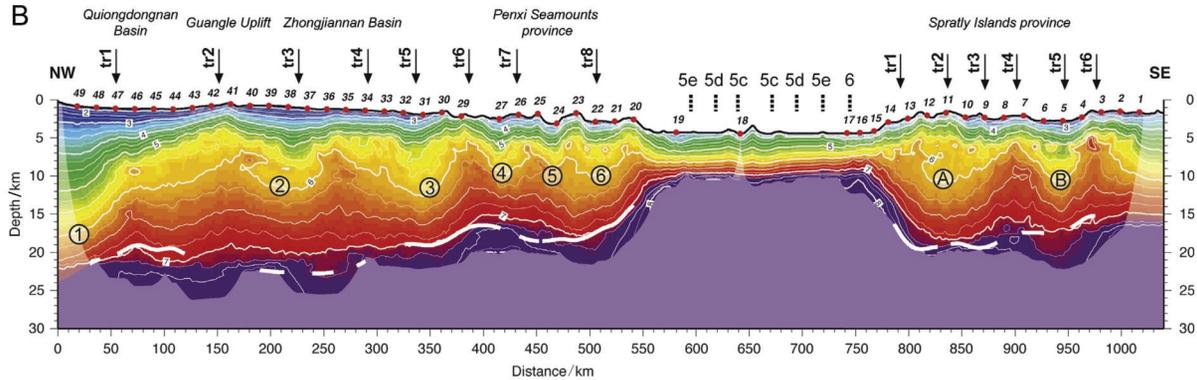


图9 OBS反演CFT速度剖面(据Pichot, 2014)

Fig.9 CFT velocity profile inversion by OBS (after Pichot, 2014)

5 构造演化阶段及其沉积响应

结合CFT剖面上各不整合面特征和层序内部结构,可将其沉积响应跟西南次海盆经历的“前裂谷阶段—陆缘裂谷阶段—海盆扩张阶段—扩张后稳定沉积”这四个阶段结合对应(图11):

A阶段——前裂谷阶段,陆壳在拉张应力下产生小的断层,位移量不大,对应层序H,仅在陆缘区发育, T_8-T_9 的地层不受同沉积作用的影响,可以看到最初的小断层切断了 T_9 界面, T_8-T_9 的地层并没有发生大的水平位移,只是随着滑脱面的运动产生了倾斜。

B阶段——陆缘张裂阶段,强烈的拉张作用使得地壳在拉张应力下拉张减薄,陆内裂谷形成,A阶段产生的断层出现了旋转,大型的拆离断层使地块得以拆离,地层沿着大的铲状断层发生掀斜,并产生较大的横向位移,断层作用时间长,使得地层呈现出同沉积的特征,直到 $T_7(BU)$,南北陆缘被拉开,

产生了破裂不整合。地层主要分布在被基底断块分割的局部断陷内,沉积特征主要表现为—侧受正断层控制的箕状沉积结构,并常被其他次级正断层进一步切割破坏。在整个裂谷阶段,沉积物为同裂谷沉积,对应层序G,海盆不发育(李家彪,2012);其沉积响应特点为发育大型铲状断层的同沉积特征地层。“陆缘张裂”阶段结束后,形成了以 T_7 为特征的破裂不整合面(Break Unconformity),由此开始了“洋盆扩张”。由此认为, T_8 为陆缘张裂的开始, T_7 为陆缘张裂的结束和洋盆扩张的开始。

C阶段——海盆扩张阶段,海盆从被拉出到开始扩张,到扩张停止,此时拉张应力从陆缘转移到了洋盆,同时在南北部陆缘也有持续拉张应力的存在,B阶段的断层在C阶段得以继承式的发育,直到中中新世 T_3 ,海盆扩张停止,中中新世的不整合(MMU)是海盆停止扩张的标志。该阶段对应超层序II (T_5-T_7),其沉积响应特点在陆坡为区陆缘断裂仍有活动性, T_5-T_7 的地层也具有同沉积特征,但张

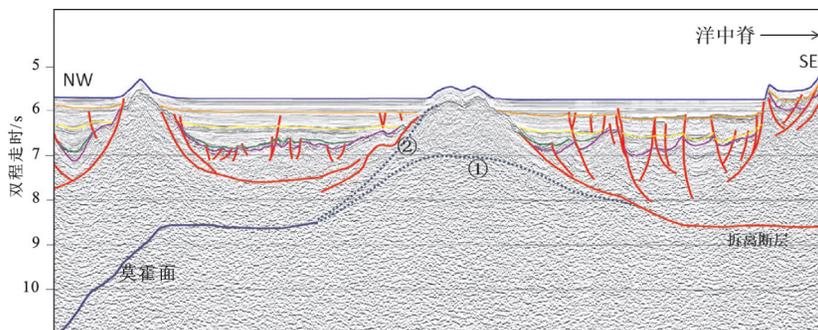


图10 扩张脊以北的海盆中疑似地幔被拉出

①—可能的地幔位置显示未有地幔暴露;②—可能的地幔位置显示地幔暴露

Fig.10 Suspected mantle pulled out from the basin north of the spreading ridge

①—Possible mantle location showing no mantle exposure; ②—Possible mantle location showing mantle exposure

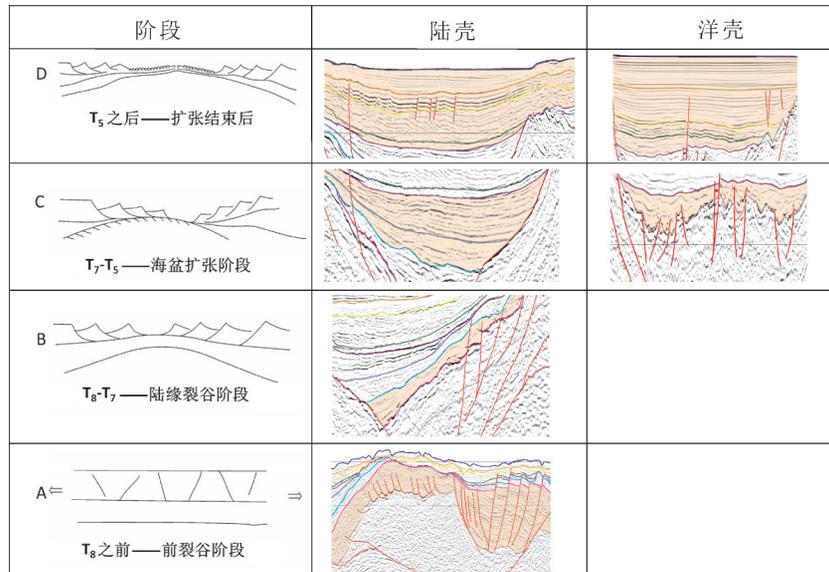


图 11 西南次海盆扩张的 4 个构造演化阶段的沉积响应

Fig.11 Sedimentary responses of the southwest subbasin expansion in four stages

应力已经主要转移到了洋盆。在海盆区发育扩张期的洋盆沉积,也具有同沉积特征,混杂着扩张时的玄武岩。还受到后期岩浆作用的影响,使得部分地层被后期岩浆吃掉。

D 阶段——海盆扩张结束以后, T₅ 以后, 陆缘的沉积拉张应力影响不大, 沉积地层为披覆沉积。该阶段对应超层序 I (T₀-T₅), 为一套广泛接受海相沉积的泥岩, 有继承性的断层穿过 T₁、T₂、T₃。

以上通过 4 个阶段对南海西南次海盆不同构造阶段的沉积响应分析, 是基于对 CFT 剖面上各个层序的地震反射特征的捕捉, 共同从陆坡和洋盆两个不同部位印证西南次海盆所经历的 4 个构造期次。后续的研究工作可结合 OBS 反演的速度结构等信息来考虑, 把构造活动、岩浆期次和沉积响应结合起来进行。

6 结 论

本文对穿过南海西南次海盆的逾 1000 km 的多道地震测线 CFT 剖面进行解译, 得出以下结论:

(1) 对 CFT 剖面进行地震层序的划分和构造特征的提取, 以关键地震界面 T₅、T₇、T_g 为界划分出 4 个超层序: I (T₀-T₅)、II (T₅-T₇)、III (T₇-T_g) 和 IV (T_g-T_{Mz}), 基本上分别对应了 4 个构造阶段, 层序上表现为上平、中拗、下断拗的大体特征。

(2) 分析了 CFT 剖面构造特征, 西南次海盆构

造特征主要受拉张力、岩浆作用的影响, 在经历了陆缘张裂阶段和海盆的扩张阶段后, 大型的拆离断层沿着上下地壳进行的拆离, 将上陆壳拆离成一系列掀斜的块体, 海底扩张时岩浆供应不足, 洋壳厚度仅为 1.5~3.6 km, 在拆离断层将地壳拆离的同时, 存在着将地幔拉出地表的可能性。

(3) 总结出西南次海盆构造演化经历的“前裂谷阶段—陆缘裂谷阶段—海盆扩张阶段—扩张后稳定沉积”这 4 个阶段, 分别对应了不同层序独特的沉积响应方式。

References

- Braitenberg C, Wienecke S, Wang Y. 2006. Basement structures from satellite-derived gravity field: South China Sea ridge[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111: B05407.
- Cannat M, Sauter D, Mendel V, Ruellan E, Okino K, Escartin J, Combier V, Baala, M. 2006. Modes of seafloor generation at a melt-poor ultraslow-spreading ridge[J]. *Geology*, 34(7): 605-608.
- Franke D, Savva D, Pubellier M, Steuer S, Mouly B, Auxietre J L, Meresse F, Chamot-Rooke N. 2014. The final rifting evolution in the South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 704-720.
- Fyhn M B W, Boldreel L O, Nielsen L H. 2009. Geological development of the Central and South Vietnamese margin: Implications for the establishment of the South China Sea, Indochinese escape tectonics and Cenozoic volcanism[J]. *Tectonophysics*, 478(3): 184-214.

- Geoffroy L. 2005. Volcanic passive margins[J]. *C. R. Geoscience*, 337: 1395–1408.
- Gozzard S, Kusznir N, Franke D, Cullen A, Reemst P, Henstra G. 2018. South China Sea crustal thickness and oceanic lithosphere distribution from satellite gravity inversion[J]. *Petroleum Geoscience*, 25(1):112–128.
- Hopper J R, Funck T, Tucholke B E, Larsen H C, Holbrook W S, Loudon K E, Shillington D, Lau H. 2004. Continental breakup and the onset of ultra-slow seafloor spreading off Flemish Cap on the Newfoundland rifted margin[J]. *Geology*, 32: 93–96.
- Li Jiabiao, Ding Weiwei, Gao Jinyao, Wu Ziyin, Zhang Jie. 2011. Cenozoic evolution model of the sea-floor spreading in South China sea: new constraints from high resolution geophysical data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(12): 3004–3015 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiabiao, Ding Weiwei, Wu Ziyin, Zhang Jie, Dong Congzhi. 2012. The propagation of seafloor spreading in the southwestern subbasin, South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57 (20): 1896–1905 (in Chinese with English abstract).
- McIntosh K, Lavier L, van Avendonk H, Lester R, Eakin D, Liu C S. 2014. Crustal structure and inferred rifting processes in the northeast South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 612–626.
- Minshull T A, Muller M R, Robinson C J, White R S, Bickle M J. 1998. Is the oceanic Moho a serpentinization front?. *Geological Record*. London: Geological Society, London, Special Publications: 71–80.
- Pichot T, Delescluse M, Chamot-Rooke N, Pubellier M, Qiu Y, Meresse F, Sun G, Savva D, Wong K P, Watremez L, Auxietre J-L. 2014. Deep crustal structure of the conjugate margins of the SW South China Sea from wide-angle refraction seismic data[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 627–643.
- Qiu Yan, Zeng Weijun, Li Tangen. 2005. Fracture Systems and their tectonic significance in the central and southern parts of the South China Sea[J]. *Geotectonica et Metallogenia*. 29(2):166–175(in Chinese with English abstract).
- Savva D, Meresse F, Pubellier M, Chamot-Rooke N, Lavier L, Wong K P, Franke D, Steuer S, Spain F, Auxietre J L, Lamy G. 2013. Seismic evidence of hyper-stretched crust and mantle exhumation offshore Vietnam[J]. *Tectonophysics*, 608: 72–83.
- Song Haibin. 1998. Integrated Geophysical Researches on the Basement Fault System and Rifted Continental Margin of South China Sea[D]. Beijing: Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Tang Renmin, Zhang Jian. 2006. Gravity gradient inversion of deep structure in the Southwest Sea Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 12(1):49–54(in Chinese with English abstract)
- White R S, McKenzie D, O'Nions R K. 1992. Oceanic crustal thickness from seismic measurements and rare earth element inversions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B13): 19683–19715.
- Yan Wei, Zhang Guangxue, Zhang Li, Xia Bin, Yang Zhen, Lei Zhenyu, Lin Zhen, Qian Xing, Luo Shuaibing. 2018. Focused fluid flow systems and their implications for hydrocarbon accumulations on the southern margin of South China Sea[J]. *Geology in China*, 45(1): 39–47(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhen, Zhang Guangxue, Zhang Li, Yan Wei, Lin Zhen, Luo Shuaibin, Qian Xing. 2017. The style and hydrocarbon prospects of reefs in the Beikang Basin, southern South China Sea[J]. *Geology in China*, 44(3): 428–438(in Chinese with English abstract).
- Yao Bochu. The sea floor spreading in the SW subbasin of South China Sea and its tectonic significance[M]// *Geological research of South China Sea (memoir 9)*. Wuhan: China University of Geoscience Press, 20–36 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lei, Zhang Xiaoliang, Bai Lingyan, Cai Xiangmin, Wang Jiming, Yang Tianshui. Quaternary magnetic stratigraphy and its sedimentary response to new tectonic movement in Shahe depression, plain area of Beijing[J]. *Geology in China*, 2016, (3): 1076–1084(in Chinese with English abstract).
- Zhao Changyi, Song Haibin, Li Jiabiao, Song Yang, Tian Lihua. 2011. Tectonic and seismic interpretation of line NH973–1 along southwest sub-basin in South China Sea[J]. *Chinese J. Geophys.*, 54(12):3258–3268 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 李家彪, 丁巍伟, 高金耀, 吴自银, 张洁. 2011. 南海新生代扩张的构造演化模式: 来自高分辨率地球物理数据的新认识[J]. *地球物理学报*, 54(12): 3004–3015.
- 李家彪, 丁巍伟, 吴自银, 张洁, 董崇志. 2012. 南海西南海盆的渐进式扩张[J]. *科学通报*. 57 (20):1896–1905.
- 邱燕, 曾维军, 李唐根. 2005. 南海中、南部断裂体系及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*. 29(2):166–175.
- 宋海斌. 1998. 南海基底构造格架及张裂大陆边缘的综合地球物理研究[D]. 北京: 中国科学院地球物理研究所.
- 唐仁敏, 张健. 2006. 利用重力梯度反演南海西南海盆深部构造[J]. *地质力学学报*. 12(1):49–54
- 鄢伟, 张光学, 张莉, 夏斌, 杨振, 雷振宇, 林珍, 钱星, 骆帅兵. 2018. 南海南部陆缘地质流体类型及其油气成藏意义[J]. *中国地质*, 45 (1): 39–47.
- 杨振, 张光学, 张莉, 鄢伟, 林珍, 骆帅兵, 钱星. 2017. 南海南部北康盆地生物礁的类型及油气勘探前景[J]. *中国地质*, 44(3): 428–438.
- 姚伯初. 1997. 南海西南海盆的扩张及其构造意义[M]// *南海地质研究(九)*. 武汉: 中国地质大学出版社, 20–36.
- 张磊, 张晓亮, 白凌燕, 蔡向民, 王继明, 杨天水. 2016. 北京平原沙河凹陷第四纪磁性地层学研究及其新构造运动的沉积响应[J]. *中国地质*, (3): 1076–1084.
- 赵长煜, 宋海斌, 李家彪, 宋洋, 田丽花. 2011. 南海西南次海盆 NH973–1 测线地震解释[J]. *地球物理学报*, 54(12):3258–3268.