

DOI: 10. 16562/j. cnki. 0256-1492. 2017. 02. 009

# 南海中南—司令断裂带的延伸特征 及其与南海扩张演化的关系

黎雨晗<sup>1,2</sup>, 刘海龄<sup>1</sup>, 朱荣伟<sup>1,2</sup>, 王印<sup>1,2</sup>, 周洋<sup>1,2</sup>, 徐子英<sup>3</sup>

(1. 中国科学院南海海洋研究所边缘海与大洋地质重点实验室, 广州 510301; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 广州海洋地质调查局国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510075)

**摘要:**为了确定中南—司令断裂带在南海海盆及其在南部陆缘的延伸位置,并探讨其与南海扩张的关系,本文利用重磁异常、地震、莫霍面深度、P波速度特征、钻井拖网资料,对中南—司令断裂带的延伸位置进行了综合地质和地球物理研究,厘定了中南—司令断裂带在东部次海盆与西南、西北次海盆之间呈 NS 向延伸,并南延至南海南部陆缘之上,深度上切割至莫霍面。根据南海海盆中磁异常条带走向的变化,及磁异常条带、走滑/转换断裂、扩张方向的印证关系,结合前人对古南海“剪刀状”碰撞闭合、南海扩张演化、构造应力场的研究,提出在 32~25 Ma,伴随着南海东部次海盆的 NNW 向扩张,南海海盆及南沙地块整体发生顺时针旋转,使中南—司令断裂走向由形成初期的 NNW 向转变为 N—S 向;23.5 Ma 之后,顺时针旋转停止,南海东部次海盆继续 NNW 向扩张,西南次海盆呈 NW—SE 向渐进式扩张。作为一条切穿地壳的深大断裂,中南—司令断裂与红河—越东断裂、马尼拉海沟断裂三条深大断裂一起组成区域“滑线场”,制约南海海盆的扩张与南沙地块的南移。

**关键词:**南海扩张;滑线场;古双峰—笔架碰撞造山带;新生代;中南—司令断裂带

**中图分类号:**P736.11 **文献标识码:**A **文章编号:**0256-1492(2017)02-0082-17

中南断裂带是南海海盆中的一条位于 116°E 附近的近 N—S 向走滑/转换断裂带<sup>[1,2]</sup>,这条断裂带将南海东部次海盆(亦称中央次海盆)与西南次海盆、西北次海盆分割开来,向北部陆缘延伸可能与一统东断裂相连接,向南部陆缘延伸可能与费信-司令断裂相连接<sup>[3]</sup>。这条断裂整体又被称为中南-礼乐断裂<sup>[4]</sup>。本文所指的中南—司令断裂带位于南海海盆中及其向南部陆缘延伸的部分(图 1)。

目前,对于中南—司令断裂的走向、位置和走滑性质仍然存在很大争议。Tongkul<sup>[4]</sup>、姚伯初<sup>[5]</sup>认为中南-礼乐断裂是一条近 N—S 向的右旋走滑断层;刘海龄认为中南—司令断裂两侧地块相对滑移方向以南沙海槽为界,北段为右旋,南段为左旋<sup>[3]</sup>;熊莉娟等认为礼乐盆地中的 N—S 向走滑断裂与太平洋板块楔入欧亚板块的走滑调整过程(由 NNW 俯冲转变为 NWW 向俯冲)有关,推测其为左旋走滑<sup>[6]</sup>;Li 等也认为为了协调西北次海盆与东部次海

盆的磁异常差异以及相对运动,需要引进一条转换断裂,这条断裂可以与东部次海盆与西南次海盆之间的转换断裂相连接<sup>[7]</sup>,即中南断裂;而李家彪认为南海东部和西南海盆之间的分界断裂并非 N—S 向,而是 NNW 向的,一系列 NNW 向的转换断裂切错了洋中脊,控制了东部和西南次海盆的形成<sup>[8]</sup>,但仅依据了重磁异常特征,没有相关地震剖面依据。总的来说,中南—司令断裂在南海海盆及南部陆缘北段的走向是确定的,一些学者<sup>[3,9]</sup>认为该断裂在南海南部陆缘上是礼乐地块和永暑-太平地块的分界线,是礼乐地块向南滑移的西边界线。

中南—司令断裂带形成于古南海闭合时期,在新南海扩张时期以转换断层形式活动,作为一条深达莫霍面附近<sup>[4,10]</sup>的走滑/转换断裂带,对于南海的扩张起到了重要的控制作用<sup>[10-12]</sup>。因此,研究中南断裂的活动时间、走滑运动特征、切错地层等对于修正南海扩张的构造演化具有重要的意义。

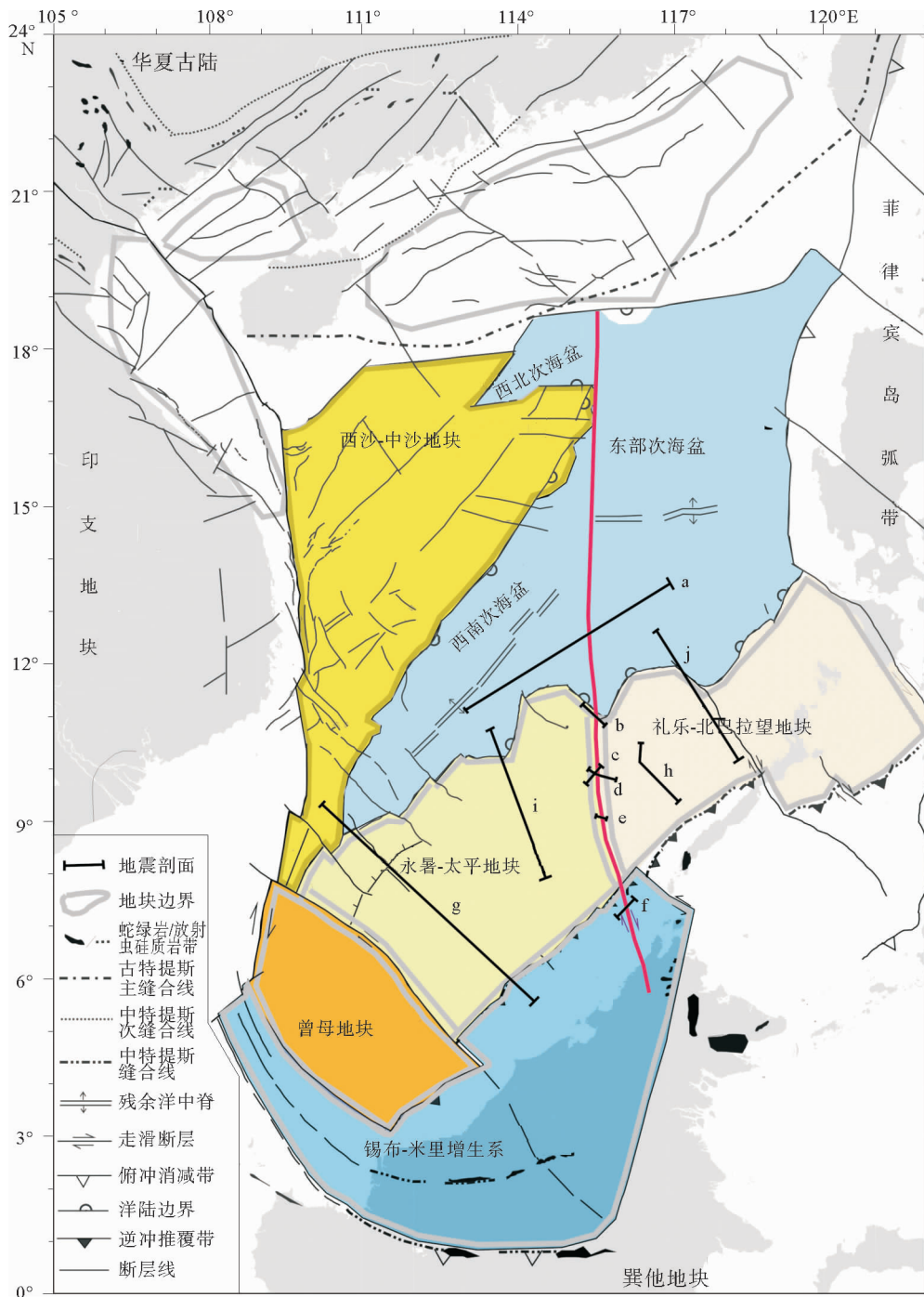
南海海底扩张的构造演化模式一直是中外学者所争论的问题,不同学者提出了许多不同的成因模式,主要有弧后扩张模式<sup>[10-12,16-18]</sup>、地幔上涌模式<sup>[19]</sup>、碰撞-挤出-拉张模式<sup>[20-22]</sup>、古南海俯冲拖曳模式<sup>[2,23-25]</sup>、Morley 综合模式<sup>[26]</sup>。这些观点争议很大,可以确定的是南海区域在中生代经历了东亚陆缘大规模地块拼合、构造挤压和大规模走滑伸展以

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41276048, 91328205, 41606080 和 41476039);中国海及邻域地质地球物理及地球化学系列图项目(GZH200900504-WX02)

**作者简介:**黎雨晗(1994—),男,硕士研究生,主要研究南海地质构造,E-mail:liyuhan15@mails.ucas.ac.cn

**通讯作者:**刘海龄,研究员,E-mail:liuh82@126.com

**收稿日期:**2016-09-10;**改回日期:**2016-10-31. 周立君编辑



红色线段为中南—司令断裂带。

地震剖面: a. 973SCSIO2(据文献[13]); b. 02N03(中科院南海所采集); c. 94N02-1A(中科院南海所采集);  
 d. 02N05(中科院南海所采集); e. 90N10-2(中科院南海所采集); f. 剖面 e(据文献[4]); g. 90N9(中科院南海所采集);  
 h. L1(中科院南海所采集); i. NH973-1(据文献[14]); j. NH973-2(据文献[14])

图 1 南海区域构造图(底图据文献[15]修改)

Fig. 1 Regional tectonic map of the South China Sea (Modified from reference[15])

及最终关闭的过程,在新生代经历了古南海和新南海两大边缘海构造旋回。根据目前较具代表性的观点<sup>[27,28]</sup>,南海扩张构造演化过程可归纳为如下几个阶段:

阶段 1:晚始新世末期-渐新世(40~32 Ma),受到古太平洋板块运动方向由 NNW 向转为 NWW

向<sup>[29]</sup>、古太平洋板块向欧亚板块的俯冲发生后撤的影响<sup>[23]</sup>,东亚陆缘带构造应力场发生变化,由挤压转变为拉张环境,使得古南海持续向南俯冲消减,自西段开始消亡,期间古洋盆逐渐消减,南沙地块西部首先与婆罗洲地块碰撞;西北次海盆开始扩张,扩张时间为 35.8~33.2 Ma<sup>[30]</sup>。

阶段 2:早渐新世-晚渐新世(32~25 Ma),南海东部次海盆开始扩张。向南运动的南沙地块自西向东与婆罗洲地块发生俯冲碰撞,西部的文莱区先与加里曼丹岛缝合,东部仍属古南海范畴。

阶段 3:晚渐新世-早中新世(25~21 Ma),东部次海盆与西南次海盆的扩张继续进行。南沙地块东部与加里曼丹岛东北部俯冲碰撞,只剩下巴拉望岛附近还存在古南海残留。

阶段 4:早中新世-中中新世(21~16 Ma),扩张在东部次海盆与西南次海盆继续进行。南沙地块持续向南漂移,到中中新世时与巴拉望岛发生碰撞,沿巴拉望岛发生大规模北西向推覆。在 16 Ma,南海洋盆扩张停止,洋盆整体进入热沉降阶段。

本文就中南—司令断裂带的走向、延伸特征进行详尽分析,并结合印度-欧亚板块碰撞、南海扩张的位置及时代研究,明确其时空耦合关系,探讨断裂走向与南海扩张的印证关系,为南海扩张演化过程的进一步研究提供依据。

## 1 中南—司令断裂带延伸的地球物理特征

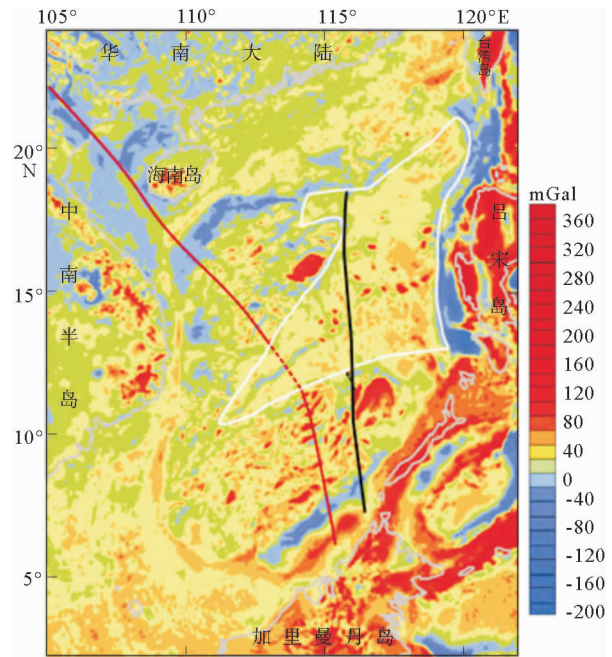
### 1.1 重磁异常特征

自由重力异常反映的是实际地球的形状分布与大地椭球体的偏差。从南海地区卫星重力异常图上可以看出,中南—司令断裂延伸段具有明显的正低值异常特征,且东西两侧的异常方向明显不同(图 2)。在西南次海盆中,其西侧的中南海岭呈 NS 向狭长中高值异常特征,海岭西侧的中南海山则呈极高值异常特征,中南海岭与中南海山的高重力异常特征与其较高的海底地形和洋壳基底的直接暴露有关。

在南海海盆中,中南—司令断裂东侧即东部次海盆内,残余洋中脊表现为高值异常,而在断裂西侧的西南次海盆内,残余洋中脊大部分表现为负异常带,在发育尚未成熟的西南次海盆西南段残余洋脊重力异常显示为正低值异常。东部次海盆与西南次海盆重力异常特征差距明显,中南—司令断裂可能对下部岩浆活动和海底扩张的方式存在很强的控制作用。

在南海南部陆缘上,中南—司令断裂东侧即礼乐滩呈现大片自由重力异常高值区,西侧郑和群礁附近呈一系列 NEE—SWW 到 NE—SW 向的正高值和正低值狭长杂乱条带状自由重力异常相间循环出现的特征。图 2 中中沙地块也有一块与礼乐滩相似的大片正高值自由重力异常区,为礼乐滩在地

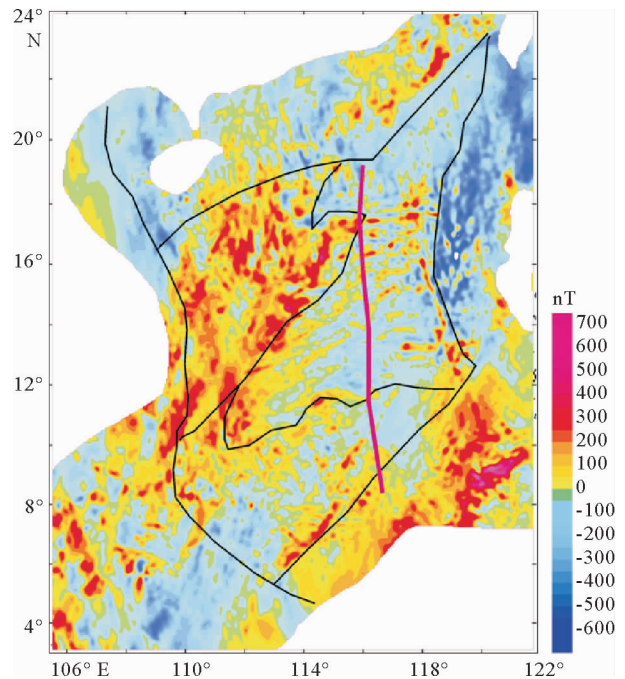
质历史时期曾与中沙地块拼接、处在相似地质环境下提供了侧面证据。



黑线为中南—司令断裂;红线为红河断裂及其延伸段;白线为洋壳边界;灰线为陆地边界。图中卫星重力异常资料来自文献[31]

图 2 南海地区卫星重力异常图

Fig. 2 Satellite gravity anomaly map of the South China Sea



红线为中南—司令断裂位置,黑线为地块区域分界线,白色区块为陆地。区域化极磁异常资料来自文献[32]

图 3 南海地区区域化极磁异常图

Fig. 3 Regional polar magnetic anomaly map of the South China Sea

在南海区域化极磁力异常图上中南—司令断裂的延伸位置也表现得很清晰(图 3)。在南海海盆中,中南—司令断裂东侧磁异常呈近 EW 向条带状,在西侧呈 NE—SW 向;在南沙地块上,断裂两侧磁异常也表现出巨大的差异,在南沙地块东部礼乐滩表现出大片的负值区域,在南沙地块西部郑和群礁则表现出大面积低值正异常、局部低值负异常特征。这表明断裂两侧的磁性基底具有巨大差异,佐证了中南—司令断裂向南延伸的位置。

Li 等通过对东亚磁异常数据的详细分析,发现中南—司令断裂两侧的磁异常条带不但走向差异明显,其磁性层结构也存在很大差异:在礼乐地块磁原体埋深较浅( $<3.2$  km),永暑-太平地块磁原体埋深较深( $>3.2$  km),同时中南—司令断裂也是磁性层厚度的梯级渐变带<sup>[7,33,34]</sup>,这进一步证明了中南—司令断裂带的存在。

## 1.2 地震剖面特征

本文收集了近 30 年来先后完成的穿过中南—司令断裂带的 6 条代表性的地震剖面。地震剖面不仅可以明确指示断层穿过的位置,还可以揭示其切穿地层,确定其活动时代及断层性质,是研究海洋构造地质学不可或缺的工具。

地震剖面 a 位于南海洋盆南部(图 4),从中可

以注意到,中南—司令断裂带由一系列可达海底面的断层组成,往深部切穿上中新世沉积层直达洋壳基底,其双程走时为 5.8~7.2 s。在中南—司令断裂西部可见与断裂平行的中南海岭<sup>[7,33]</sup>,海岭周围被断裂带所围限。在地层方面,更新世地层在东部次海盆非常薄,这与在西南次海盆 U1433 钻井确定的较厚的更新世地层形成鲜明的对比,其他各沉积层在这两个次海盆中也有相似的对比特征,显示出中南—司令断裂带是一条明显分隔东部次海盆与西南次海盆的深大断裂,断裂活动的控制及基底的沉降导致了这两个次海盆沉积地层的差异。断裂在此段的活动时间约为晚渐新世到更新世。

地震剖面 b 位于海盆向南部陆缘的出口处(图 5),剖面中可见一负花状走滑断层,断层在基底面下呈向下收敛的特点,基底之上新生代充填的地堑深达 2 000 m,断层由基底向上切穿至  $T_2$ ,说明中南—司令断裂在  $T_2$  地层形成之前(即中新世)活动,地堑可能形成于中生代晚期,是中南—司令断裂走滑伸展作用的结果。断裂在此段的活动时间约为晚白垩世—晚中新世。其南侧约 130 km 远的地震剖面 c(图 6)具有与地震剖面 b 相似的负花状构造特征,活动时间与 b 段相同,表明断裂在南沙块体上继续向南延伸,且其走滑伸展活动方式、强度没有发生较大的改变。

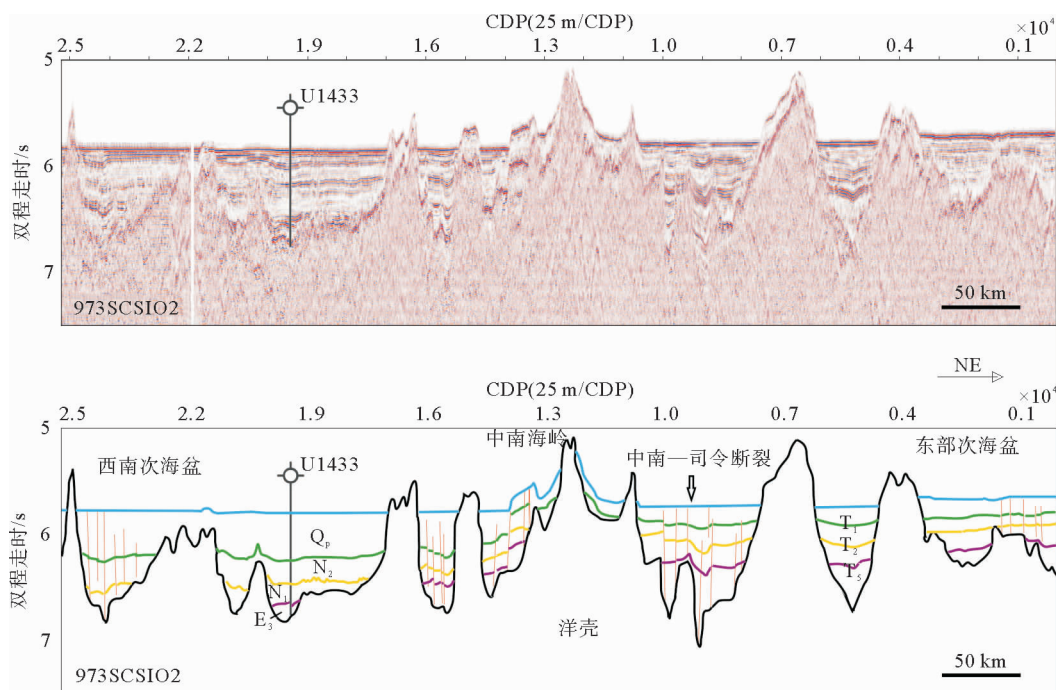


图 4 南海洋盆中 973SCSIO2 剖面(位置见图 1 中 a 剖面段;据文献[13],有修改)

Fig. 4 Seismic profile 973SCSIO2 in the South China Sea basin (For location, see line a in Fig. 1; Modified from[13])

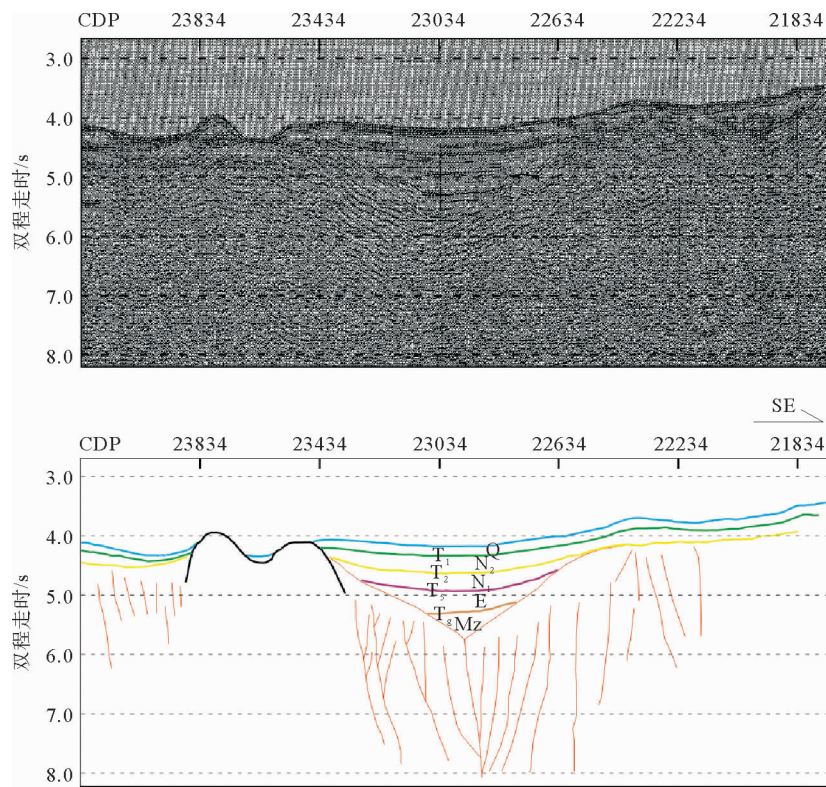


图5 02N03地震剖面及其地质解释图(位置见图1中b剖面段)

Fig. 5 Seismic profile 02N03 and its geological interpretation (For location, see line b in Fig. 1)

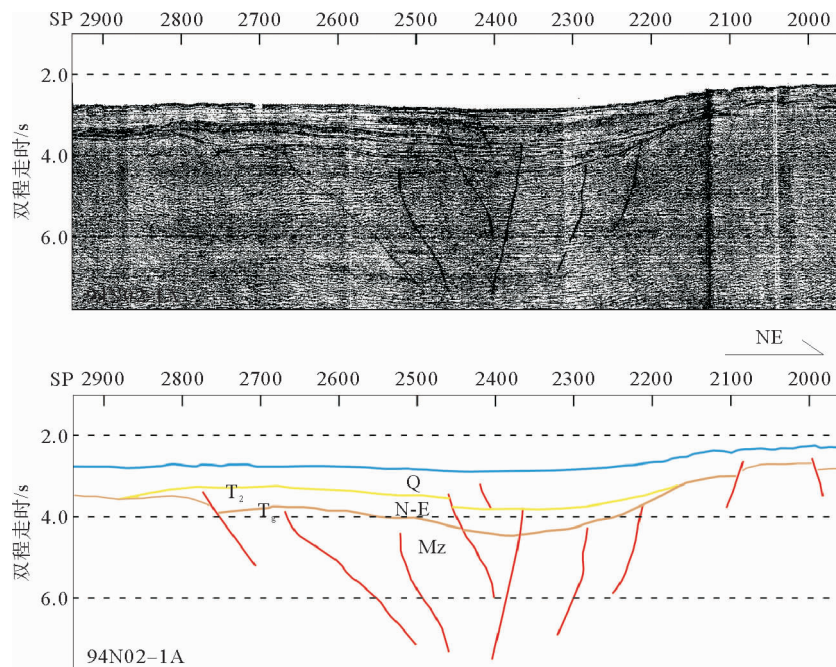


图6 94N02-1A地震剖面及其地质解释图(位置见图1中c剖面段)

Fig. 6 Seismic profile 94N02-1A and its geological interpretation (For location, see line c in Fig. 1)

在地震剖面 d(图 7)上,同样可见负花状构造,同时在东侧可见一系列伸展正断层组成的半地堑构造,断层垂直断距达 3 000~4 300 m,断裂带切割上

新统-第四系的  $T_2$  不整合面,断距较大,早期切断下中新统( $T_5$  不整合面),说明断裂至少有过两次明显的活动<sup>[3,35]</sup>。此段断裂的活动时间为晚白垩世—上

新世。

向南约 80 km,在地震剖面 e(图 8)上,可见数条倾向为 NWW 向的较陡立的伸展正断层,其断距较

小,断层向下切穿  $T_g$  面,向上切穿至  $T_2$  面。断裂在此段的活动时间也为晚白垩世—上新世,走滑特征不明显,由走滑作用主导变为伸展拉张作用主导。

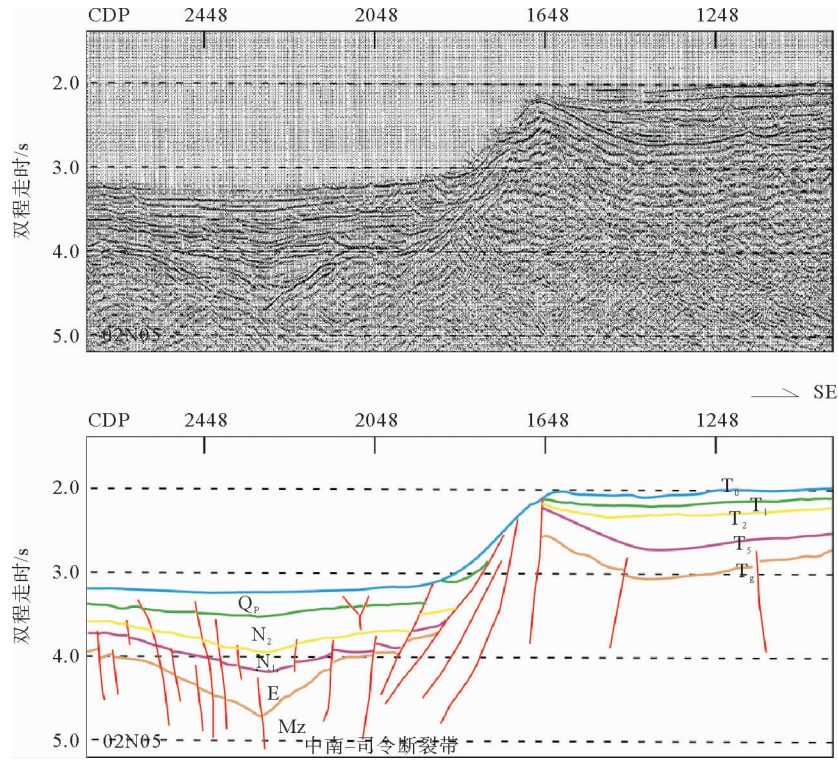


图 7 02N05 地震剖面及其地质解释图(位置见图 1 中 d 剖面段)

Fig. 7 Seismic profile 02N05 and its geological interpretation (For location, see line d in Fig. 1)

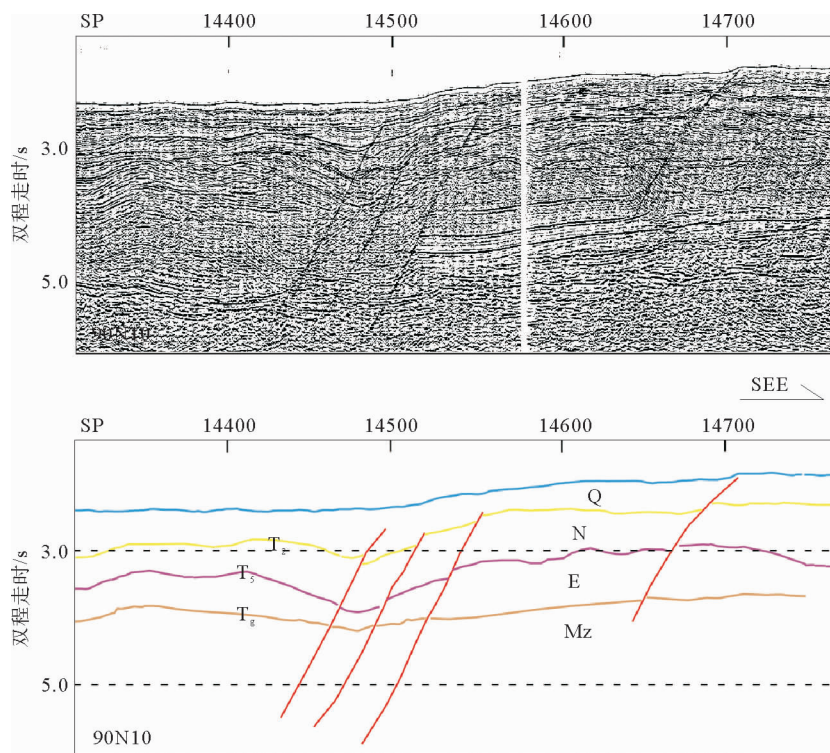


图 8 90N10-2 地震剖面及其地质解释图(位置见图 1 中 e 剖面段)

Fig. 8 Seismic profile 90N10-2 and its geological interpretation (For location, see line e in Fig. 1)

向 N163°E 向 170 km, 断裂在南沙海槽继续向南延伸, 其延伸特征见姚伯初于 1995 年发表的穿过中南—司令断裂的地震剖面 f(图 9) 中, 可见两条近直立的断裂, 均呈负花状构造, 其间构成一个基底地堑, 新生代沉积层厚达 3 400 m。断裂切穿 T<sub>2</sub> 地层直至海底表面, 这说明中南断裂在南沙海槽中的活动持续到现代。同时, 在此负花状构造的旁侧地层观察到有构造反转现象, 这些向斜褶皱可能代表了后期南沙海槽区域受到的南北向的挤压应力, 这种挤压应力也是导致中南—司令断裂在南沙海槽活动较断裂在南沙块体北段的活动至更近代时期的原因。

由地震剖面 b、c、d、e、f 断裂特征分析可知, 在南沙地块上, 这几条剖面中的断裂是同一条断裂, 为张性走滑性质, 统一称为司令断裂, 极可能与海盆中的中南断裂相连接。厘定了断裂基本向南延伸、出海盆后稍稍向东偏转(偏转角度不超过 20°)的大体走向, 排除了断裂延伸终结于海盆出口处及向东南延伸的可能性。

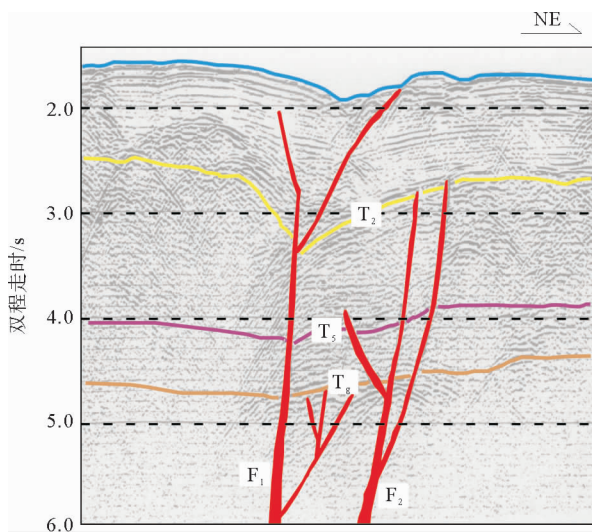


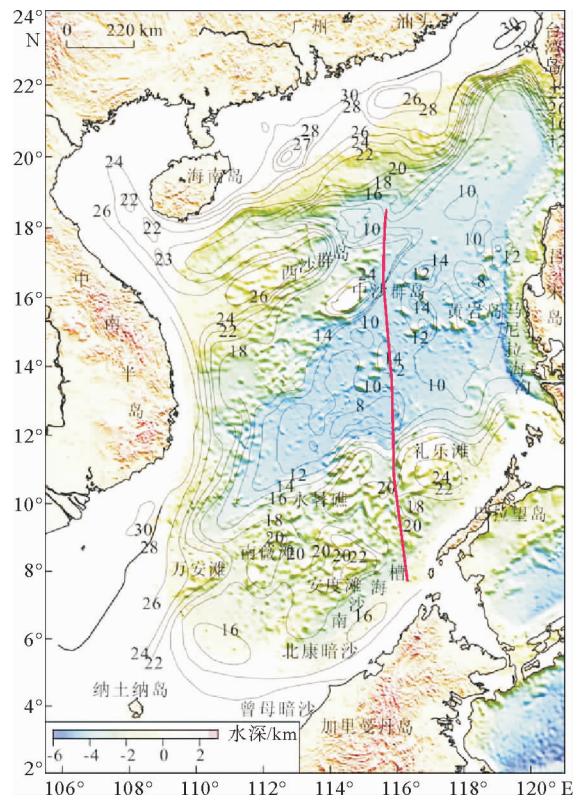
图 9 中南—司令断裂带在南沙海槽南部的地震反射特征 (位置见图 1 中 f 剖面段; 地震剖面资料引自文献[4])

Fig. 9 Seismic characteristics of Zhongnan-Siling fault zone in southern Nansha trough (For location, see line f in Fig. 1; Seismic profile data from reference[4])

### 1.3 莫霍面深度

从采用重力和水深资料计算地壳厚度和莫霍面深度<sup>[36]</sup>的结果可以看出, 沿中南—司令断裂, 莫霍面深度具有明显的异常特征(图 10), 表现为一个壳体断裂异常特征, 影响可达莫霍面。在南海洋盆内,

莫霍面埋深多在 10 km 以下, 薄的不足 8 km, 局部偶见 14 km。在西南次海盆与中央次海盆交界处, 莫霍面等值线表现为急剧变化的梯级带。沿中南—司令断裂向南, 从海盆至南沙地块中, 莫霍面深度由北向南由 8 km 加深至 22 km, 逐渐变深, 表现为凸向南的弧形特征, 弧顶向南插入南沙地块, 说明该断裂延伸入南沙地块, 地壳类型也由海盆的洋壳转变为南沙地块的陆壳。在南沙地块上, 莫霍面埋深表现为从该断裂的西南侧到东北侧逐渐加深, 到礼乐滩达到最大(28 km)<sup>[37]</sup>。张训华通过重磁场上延发现西南次海盆、西北次海盆与东部次海盆不仅在重力、磁力异常上明显分区(图 2 和 3), 在地壳结构上自断裂东侧向断裂西侧有莫霍面逐渐抬升的趋势, 充分说明了中南—司令断裂这条深大断裂的存在<sup>[38]</sup>。



红线所示为中南—司令断裂带。莫霍面深度等值线资料引自文献[36]

图 10 南海莫霍面深度等值线图

Fig. 10 The Moho depth contour map of the South China Sea

### 1.4 岩石圈 P 波速度结构特征

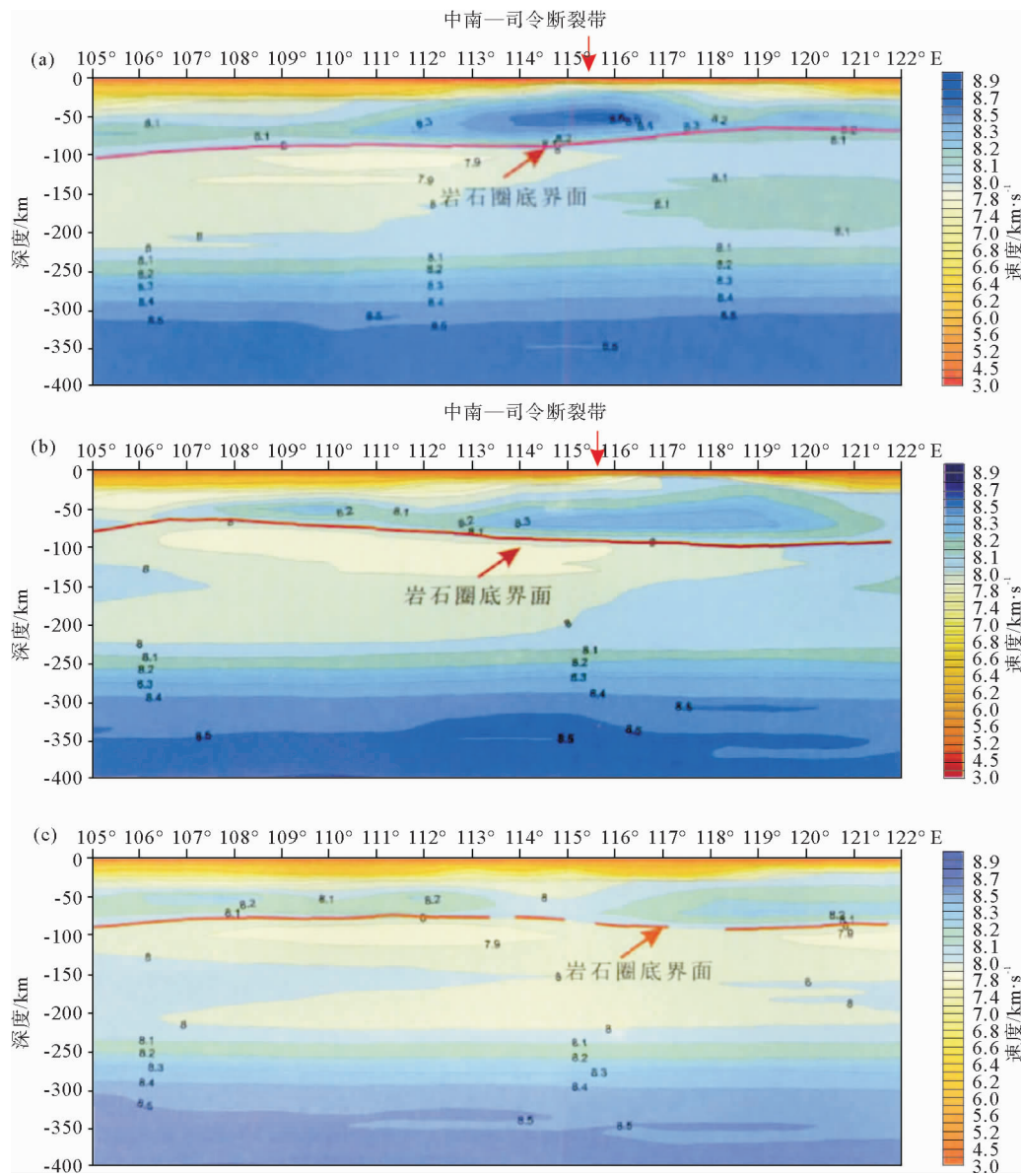
沿 18°N 穿过南海的 P 波速度剖面(图 11a)显示在南海西北次海盆至东部次海盆(114°~119°E), 地壳厚度减薄到 5~6 km, 莫霍面深度 10 km, 是典

型的洋壳。岩石圈厚约 60 km,上地幔在 50~80 km 深度之间存在 8.3~8.5 km/s 的高速层。西北次海盆至东部次海盆交界处,上地幔高速层 P 波速度逐渐由 8.3 km/s 增大到 8.5 km/s。姚伯初根据 1983 年作的一条穿过西北次海盆和东部次海盆的地壳剖面发现西北次海盆地壳厚度为 5 km 左右,至东部次海盆地壳厚度加厚至 7~7.5 km;地壳结构上东部次海盆与标准的大洋地壳结构一样,可分亚层,而西北次海盆不分亚层,这两次海盆在地壳厚度和结构上都存在巨大差异,应存在一条壳体断裂<sup>[4]</sup>。

沿 14°N 穿过南海的 P 波速度剖面(图 11b)在西南次海盆和东部次海盆段,地壳厚度减薄,莫霍面

深度变浅至 10 km;岩石圈在 20~32 km 深度之间存在一低速层,速度为 7.1~7.2 km/s,上地幔在 60~80 km 深度存在一高速层,速度为 8.2 km/s。在 115°~116°E 之间,上地幔结构存在明显变化,西南次海盆中的上部 20~32 km 深度之间的低速层(7.1~7.2 km/s)在东部次海盆之下消失,下部深度在 60~80 km 之间的高速层速度从西南次海盆的 8.1 km/s 变到 8.2 km/s。说明这里存在的南北走向的中南—司令断裂是一条岩石圈断裂,在南海东部次海盆的海底扩张时期起了重要作用<sup>[39]</sup>。

在沿 8°N 穿过南海的 P 波速度剖面(图 11c)由于南沙海槽曾是地质历史时期的俯冲带,构造环境复杂,中南—司令断裂穿过的特征并不明显。



(a)沿北纬 18°剖面;(b)沿北纬 14°剖面;(c)沿北纬 8°剖面

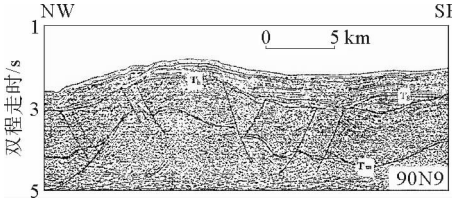
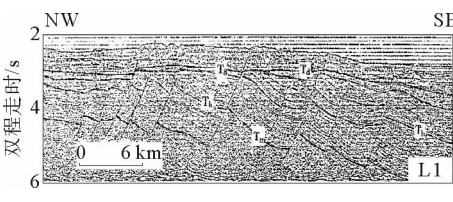
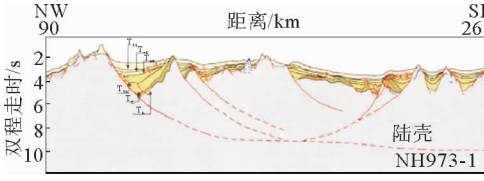
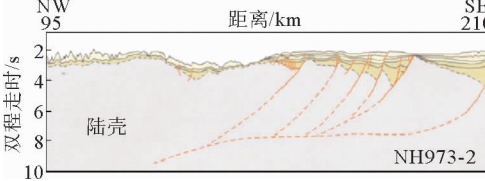
图 11 穿过南海的纵波速度剖面(据文献<sup>[39]</sup>,有修改)

Fig. 11 P-wave seismic velocity profiles across the South China Sea (Modified from reference<sup>[39]</sup>)



表1 南沙块体东西部构造、地层、沉积特征对比

Table 1 Structural, stratigraphic and sedimentary characteristics of the eastern and western parts of Nansha block

	(西部)永暑-太平地块	(东部)礼乐-北巴拉望地块
典型地震剖面		
基底构造样式	褶皱强烈,顶部剥蚀,块断形成半地堑和掀斜断隆	舒缓褶皱,岩浆侵入,块断掀斜
下构造层及其地震相特征	T-K <sub>1</sub> 海相沉积; 地震相为弱振幅连续反射,高频,层次密集,平行层状反射结构	J <sub>1</sub> 三角洲相-浅海相砂泥岩-K <sub>1</sub> 滨浅海相含煤碎屑岩系; 地震相层次相对清晰,连续性中等至较好,振幅和频率中等,平行层状-发散结构,厚 2~4 km
中构造层及其地震相特征	厚 1~3 km,较厚,最厚达 4.5 km;下部为半地堑充填,上部为席状披盖; 地震相为弱-中等振幅,低-中等频率,中-较好连续性,层次较清晰	厚度大多小于 1 km,较薄; 未变质的 E <sub>1</sub> -E <sub>2</sub> 三角洲相和外浅海-半深海相碎屑沉积,充填于半地堑底部的下延至 K <sub>2</sub> ; 地震相为准平行至发散的反射结构
上构造层及其地震相特征	下部:E <sub>2</sub> <sup>3</sup> -E <sub>3</sub> <sup>1</sup> 充填地堑的海陆过渡相碎屑沉积,发散反射结构; 中部:E <sub>3</sub> <sup>3</sup> -N <sub>1</sub> <sup>1</sup> 浅海台地相层状碳酸盐岩,水平层状上超充填结构,连续性好,低频率,亚平行强反射 上部:N <sub>1</sub> <sup>2</sup> -Q 现代生物礁体,席状披盖海侵超覆沉积	浅海-半深海相碳酸盐岩和碎屑岩,台地相碳酸盐岩和生物礁沉积; 地震相为低振幅,低频率,连续性好,准平行反射结构
北缘伸展断层特征	陡立阶梯状组合形式,形成一些孤立的半地堑	铲状伸展断层,组成同向翘倾型半地堑群
岩石圈伸展机制	纯剪伸展作用	简单剪切伸展作用
地震地质解释剖面		
基底构造样式	半地堑和掀斜断块;拆离断层向 SE 倾斜	礼乐盆地中发育铲式正断层,多米诺状半地堑;礼乐滩中为边缘高原构造样式;拆离断层向 NW 向倾斜
沉积层特征	尚未将基底完全掩埋,掀斜断块顶部形成碳酸盐礁体	礼乐盆地中裂后期沉积将半地堑完全充填,礼乐滩沉积薄
构造变形	构造变形强烈	构造变形较弱
新生代沉积特征	<p>南薇西盆地</p> <p>E<sub>1</sub>-E<sub>2</sub><sup>2</sup>: 冲积相、河泛平原沼泽相、扇三角洲、湖相碎屑岩</p> <p>E<sub>2</sub><sup>3</sup>-E<sub>3</sub>: 海陆过渡相、泻湖相、滨海-浅海碎屑岩</p> <p>E<sub>3</sub><sup>3</sup>-N<sub>1</sub><sup>2</sup>: 海相砂泥岩互层</p> <p>N<sub>1</sub><sup>3</sup>-Q: 浅海-半深海砂质泥岩、泥岩</p> <p>北康盆地</p> <p>E<sub>1</sub>-E<sub>2</sub><sup>2</sup>: 西部为冲积平原碎屑岩、湖泊与沼泽相泥岩、碳质泥岩;东部为浅海相砂泥岩互层、滨海砂岩、海岸平原砂岩</p> <p>E<sub>2</sub><sup>3</sup>-N<sub>1</sub><sup>2</sup>: 西部为三角洲相砂泥岩,滨岸沼泽、河漫沼泽和冲积平原砂岩向滨浅海砂泥岩、台地灰岩-生物礁过渡;东部为浅海-半深海相砂泥岩互层,半深海相泥岩</p> <p>N<sub>1</sub><sup>3</sup>-Q: 浅海-半深海相碎屑岩</p>	<p>礼乐盆地</p> <p>E<sub>1</sub>-E<sub>2</sub><sup>1</sup>: 湖相、滨海、浅海、半深海相碎屑岩</p> <p>E<sub>2</sub><sup>3</sup>-Q: 浅海、半深海相碳酸盐岩和砂泥岩</p>

注:L1 中段地震剖面、90N9 北段地震剖面参考文献[3],NH973-1、NH973-2 测线参考文献[14],剖面位置见图 1。新生代沉积特征根据文献[40-42]总结。

## 2 断裂在南沙块体上南延的地质依据

由于南海西南次海盆与东部次海盆在磁条带、地壳结构、扩张的方向等方面存在较大差异,多数学者认同中南断裂作为转换断裂在南海洋盆中的存在<sup>[1,2,6,7,9,11,34]</sup>,但这条断裂是否延伸到南沙块体之上、走向如何还存在一定争议。本文通过对比南沙块体东部与西部在新生代的沉积特征、基底构造样式、地震地层特征的差异来论证中南—司令断裂带在南沙块体上的向南延伸(表 1)。

永暑-太平地块与礼乐-北巴拉望地块在构造、地层和沉积特征上都有着明显差异,在构造样式上显示出永暑-太平地块较礼乐-北巴拉望地块变形更为强烈,应是受到了更强的挤压应力作用。虽都在同一时期经历了伸展作用阶段,但东西部伸展断层型式各异,且下部的主拆离断层倾向截然相反,伸展模式自东向西由纯剪切过渡为简单剪切,显然南沙块体东西部分属不同地块,其受力不联动,应变不一致。南沙地块东西部在中、下构造层地震相特征上的差异也反映出其基底岩系的不同,体现其在新南海扩张之前的沉积环境存在差异。

目前普遍的观点认为,礼乐-北巴拉望地块是随新南海的扩张以中南—司令断裂为边界滑移到现今位置的,我们只能从扩张前的新生代沉积及新生代基底着手来研究礼乐-北巴拉望地块是否曾经发生过滑移。由表 1 中新世代沉积特征的对比发现,古新世到始新世期间,自西向东显示出由陆相向海相过渡的特征,而在东部次海盆开始扩张之后,即渐新世开始后,南沙块体东西部的沉积相开始趋于一致,直至第四纪的浅海-半深海相。而礼乐-北巴拉望地块与珠江口盆地南侧的新生代基底都为中生代变质岩、火山岩和沉积岩,在渐新世之前二者也具有相似的地层岩性、古生物分布、地层展布特征和沉积环境<sup>[43]</sup>。郝天珧等、李家彪分别通过最新重磁资料和 OBS 资料对礼乐-北巴拉望地块的地壳结构进行了研究,发现其与中沙地块在结构分层有对应的特征,其基底均以前寒武系基岩即岩浆岩隆起为主,认为礼乐-北巴拉望地块与中沙地块是扩张前的共轭点<sup>[44,45]</sup>。孙珍等用物理模拟的方法研究南海海盆的共轭对比,也得出相似结论<sup>[46]</sup>。综上所述,礼乐-北巴拉望地块在南海扩张之前应处于珠江口盆地南侧、中沙地块东侧,与现今永暑-太平地块并不直接相连,礼乐-北巴拉望地块与永暑-太平地块相比较今日的位置更错列向北,故而可以断定,中南—司令

断裂是存在于南沙块体之上的,它的存在是礼乐-北巴拉望地块滑移至现今位置的必要条件。

## 3 中南—司令断裂运动学特征

作为一条在南海海盆扩张过程中形成的壳体断裂带,中南—司令断裂的走滑运动方向不仅对南海南部陆缘上各个地块的运动产生直接影响,也控制了南海海盆扩张的方向。由于中南—司令断裂带位于海底面之下,对这条断裂的走滑性质的研究也只能从地震剖面、地形特征及地块碰撞时间等方面进行推测,目前对于这条断裂的走滑运动方向、运动时间、期次仍然存在较大的争议。

姚伯初依据礼乐-北巴拉望地块在东部次海盆扩张过程中南移,中南—司令断裂为礼乐-北巴拉望地块的西部边界,判断断裂为右旋走滑<sup>[4]</sup>。刘海龄通过礼乐-北巴拉望地块比永暑-太平地块与东部次海盆洋壳的交接线更向南错列认为断裂北段为右旋走滑,而在南沙海槽南缘,由于来自沙巴的外来构造混杂岩及沉积盖层组成的推覆体沿着永暑-太平地块和礼乐-北巴拉望地块南延下来的碳酸盐岩顶界面往北逆冲推进,在中南—司令断裂带东侧的逆冲推覆体向北推进速度快于西侧,这就导致在中南—司令断裂带南段,以碳酸盐岩顶面所充当的逆冲滑移面为界,其下的礼乐-北巴拉望地块和永暑-太平地块保持与断裂北段相同的右旋走滑运动,其上覆东西侧推覆体之间为左旋走滑运动(图 12)。这种断裂在不同段落部位、不同深度层位上表现为不同旋移方向的性质是层块构造的一个基本特征,称为“立交传输运动”<sup>[3]</sup>。

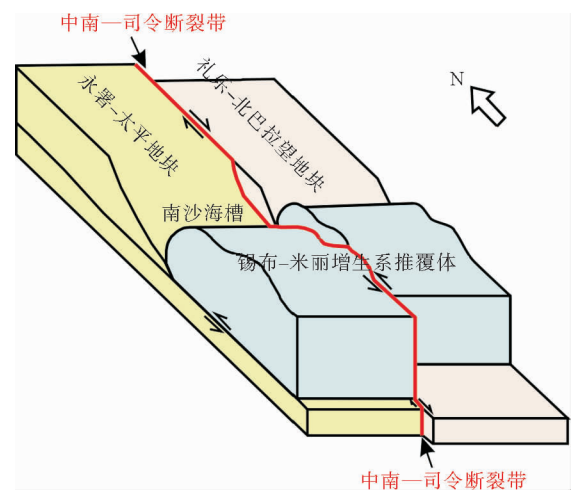


图 12 层块构造“立交传输”运动示意图(据文献[3],有修改)

Fig. 12 Illustration showing the “cross-deck bridge-like transport” movement (Modified from references[3])

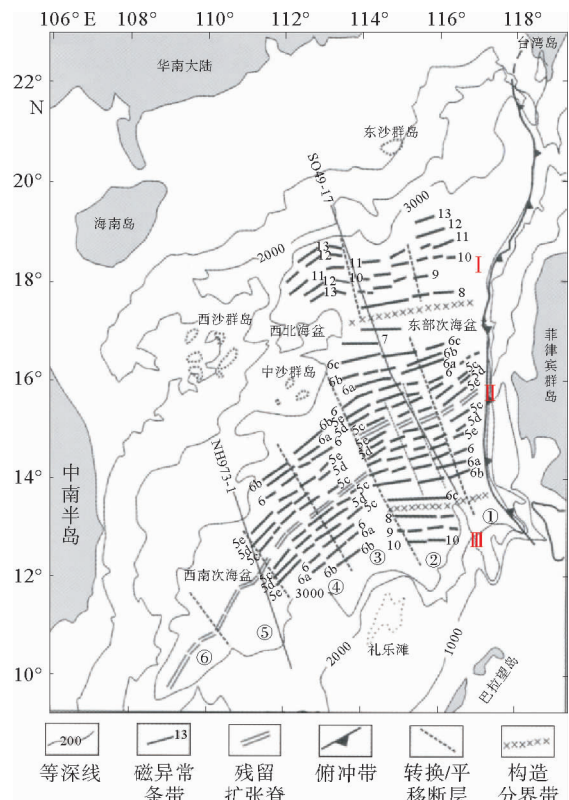
由地震剖面 d(图 7)可以看出,断裂带切割上新统-第四系,早期可能切穿下中新统,说明至少有过两次较为明显的活动。由剖面 b(图 5),可见始新统顶界面反射界面  $T_0$  披盖于具充填结构的下伏层序之上,中中新统顶界面反射界面  $T_2$  披覆于断裂之上,说明中南一司令断裂在南沙地块上的活动时期为新生代早期到早中新世。由剖面 f(图 9),可见断裂切穿  $T_2$  直至海底沉积层,说明中南一司令断裂在南沙海槽段活动至更近代时期。

中南一司令断裂在南海洋盆段是在渐新世-早中新世时期随南海东部次海盆的扩张所导致的南沙地块往南漂移而产生的走滑/转换断层<sup>[6,9]</sup>。而由前述地震剖面特征可知,中南一司令断裂在南沙地块延伸段可能在新生代之前已经形成,而此时新南海尚未张开,南沙地块是与华南陆缘连接在一起的,形成之时这条断裂是贯穿华南陆缘和南沙地块的,随着南海的扩张才逐渐往洋盆内伸展并拉长。据此推测中南一司令断裂可能是由中生代时期特提斯-伊佐奈岐洋中的 NNW 向转换断层演化而来,在晚白垩世古特提斯在华南陆缘 NNW 向俯冲消减并发生碰撞造山作用,形成 NEE 向古双峰-笔架碰撞造山带<sup>[47-53]</sup>,此时断裂随华南陆缘与南沙块体的碰撞,由深部已俯冲下去的转换断层脆性破裂向上拓展而初步形成,起到调节造山带应变差异的作用。据周洋等的研究<sup>[48]</sup>,古双峰-笔架造山带呈东部宽西部窄的特征,且造山带东部轴迹较西部更错列于 NNW 向。笔者认为中南一司令断裂及其北延段(即今一统东断裂)在此过程中发生了左旋走滑,导致造山带发生错列。至晚始新世,印-澳板块向北俯冲挤压,块体发生逃逸向 SSE 方向挤压,诱发古南海向南俯冲消减,古南海洋壳板片进入俯冲带后,地幔中提供极大的负浮力,导致古南海以北的华南陆缘与南沙地块发生 NNW—SSE 向伸展作用,存在其间的古双峰-笔架碰撞造山带山根发生拆沉<sup>[47,48,51]</sup>,这期间中南一司令断裂受到 NNW—SSE 向拉张力再次开始强烈活动,调节伸展作用。

#### 4 中南一司令断裂走向讨论与南海扩张构造演化的修正

中南一司令断裂现今走向为近 N—S 向,一些学者<sup>[4,5,28]</sup>认为中南一司令断裂是由于在 N—S 向挤压应力环境下伴随着新南海扩张,南沙地块受到向南的推力形成的。而根据张涛等对西北次海盆磁异常条带的解析<sup>[30]</sup>,以及一些学者对南海断裂及断

陷盆地的认识<sup>[2,54,55]</sup>,认为晚白垩世末期以来南海区域构造应力场(扩张方向)为 NW—NNW 向。另据李家彪等利用最新船测 1:50 万磁力数据制作的磁异常条带分布图(图 13)来看,东部次海盆从南北两侧向扩张中心方向,磁异常条带有从 E—W 向转为 NE 向和 NEE 向的趋势,南海海盆呈现“南北分区,东西分段”之格局,南、北部亚区磁条带为 E—W 向,中央亚区磁条带为 NEE 向,东西方向又可以分为 6 个洋段,认为南海东部与西南次海盆的分界断裂不是 N—S 向的,而是 NNW 向的<sup>[8]</sup>。由图中可以看到,东部次海盆在磁条带 C6C 之后,即 23.5 Ma 之后走向开始由 EW 向转为 NEE 向。另据南海中部多波束线性构造解释图(图 14),东部次海盆发育大量 NEE 向线性构造,西南次海盆发育较多 NE 向线性构造,与磁异常条带走向相近。由此可以确定在 23.5~16 Ma,南海东部次海盆扩张方向为 NNW 向,西南次海盆扩张方向为 NW—SE 向。而东部次海盆南北亚区 E—W 向的磁异常条带是



依据东部次海盆磁条带走向分三个亚区：  
I. 北部亚区；II. 中央亚区；III. 南部亚区  
图 13 南海海盆构造分区及磁异常条带图  
(据文献[8],略有修改)

Fig. 13 Tectonic division and distribution of magnetic anomalies of the South China Sea basin  
(Slightly modified from reference[8])

否意味着在 25 Ma 之前扩张方向是 N—S 向的? 这样是否意味着南海的扩张发生了应力场的转变导致扩张方向发生转变?

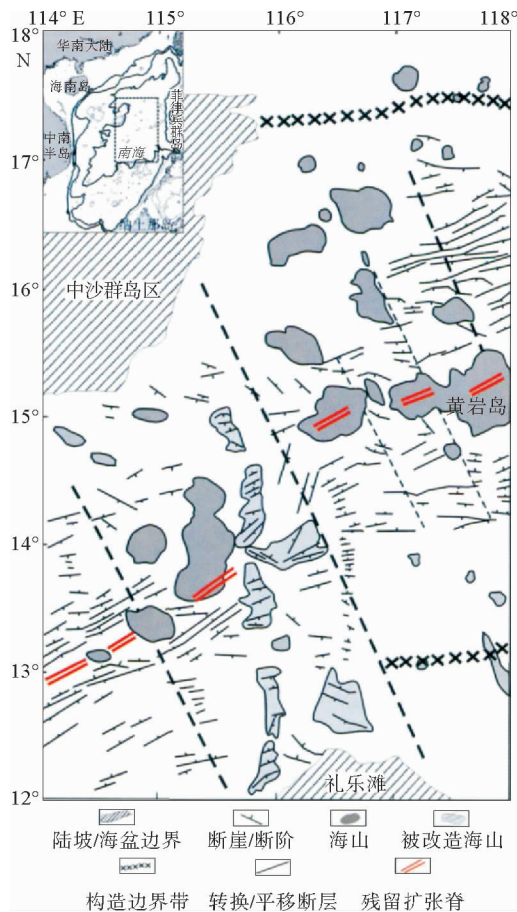


图 14 南海中部多波束线性构造解释图(据文献[8])  
Fig. 14 Interpretation of multi-beam linear structures  
in the middle of the South China Sea basin  
(from reference[8])

笔者考虑到中南—司令断裂现今走向以及现今磁异常条带特征,认为至少在 25 Ma 之前磁异常条带走向与中南断裂走向是相互印证的,在 25 Ma 之后的磁异常走向很难与中南断裂相互印证,中南—司令断裂是东部次海盆南、北部亚区的一条走滑/转换断层,而其在中央亚区段则不是由于调节海底扩张形成的,更可能是由于先期断裂的存在而延展到中央亚区。古南海南北两侧陆壳被认为是始新世晚期首先在西南部与婆罗洲发生碰撞,然后向东北方向递进<sup>[56-59]</sup>,也即古南海由西南向东北逐渐关闭。由于在 32~25 Ma 期间古南海洋壳在古南海西南部持续向南俯冲、南北两侧陆壳相继在西南侧卢帕尔线碰撞缝合,而在东北部仍为残余古南海,这种古南海关闭的不同时性也对北部华南陆缘的张裂产生了影响,在渐新世早期华南陆缘开始发生强烈塑性

减薄引起海底扩张的过程中,华南陆缘西南部比东北部经历了较小的伸展,故新南海先在东部打开<sup>[60]</sup>。注意到在 25~23.5 Ma 前后发生了一个重大地质事件,即南沙东部礼乐-北巴拉望地块与婆罗洲发生俯冲碰撞<sup>[28,57]</sup>,这也许是南海扩张方向看起来在此期间发生了转变的原因。笔者认为,在南沙东部礼乐-北巴拉望地块与婆罗洲碰撞之前,由于古南海洋壳在地幔中的负浮力产生的拉力,使得东部地区水平拉张应力更强,而西部由于受到陆壳对俯冲的阻力,拉张应力被减弱,由此造成的东西部向南水平拉张应力差便成为东部地区一种顺时针水平扭力矩,使得古南海以北的南沙地区(礼乐-北巴拉望地块、永暑-太平地块、曾母地块)和新形成的海盆整体发生顺时针旋转,对应于婆罗洲此时的逆时针旋转<sup>[25,28,60-64]</sup>。这就解释了先期磁异常条带(C13-C8)走向及中南—司令断裂走向与后期扩张方向看起来不能相互印证的原因,中南—司令断裂形成时是呈近 NNW 向的,南北亚区的磁异常条带形成时也呈近 NEE 向,由于南沙地块及海盆整体顺时针旋转,中南—司令断裂南北两段对应于 C13-C8 磁条带洋壳的段落的走向从原来的 NNW 向变为 NS 向,C13-C8 磁条带的走向从原来的 NEE 向变为 EW 向。在西北次海盆中也可以找到顺时针旋转存在的相关证据,张涛等发现西北次海盆靠近中南—司令断裂的位置(115.5°E)洋脊段走向为近 N90°E,其西部其他各段洋脊走向为近 N70°E,也表明了这段与东部次海盆相邻近的洋脊连同东部次海盆和南沙地块发生了一定程度(约 20°)的顺时针旋转,在顺时针旋转部分与不发生旋转部分拉扯的过程中,在 115.5°~116°E 附近产生了一个在磁条带性质上既不同于西北次海盆也不同于东部次海盆的区域<sup>[30]</sup>。至 25~23.5 Ma 期间,南沙东部与婆罗洲发生碰撞,顺时针旋转停止,此时中南—司令断裂旋转到近 N—S 向,23.5 Ma 之前的磁异常条带(C13-C8)随同海盆旋转到近 E—W 向,即现今位置。之后,23.5~16 Ma,扩张在东部次海盆与西南次海盆继续进行,东部次海盆呈 NNW 向扩张,西南次海盆呈 NW—SE 向且向西南渐进式扩张。南沙地块持续向南漂移,到中中新世时与南巴拉望岛发生碰撞,沿南巴拉望岛发生大规模北西向推覆。在 16 Ma,南海洋盆扩张停止,洋盆整体进入热沉降阶段(图 15)。

对于南沙地块及海盆发生的顺时针旋转,下一步还可以通过计算华南陆缘东西侧在渐新世的伸展量来佐证,此外,需要进一步研究永暑-太平地块和

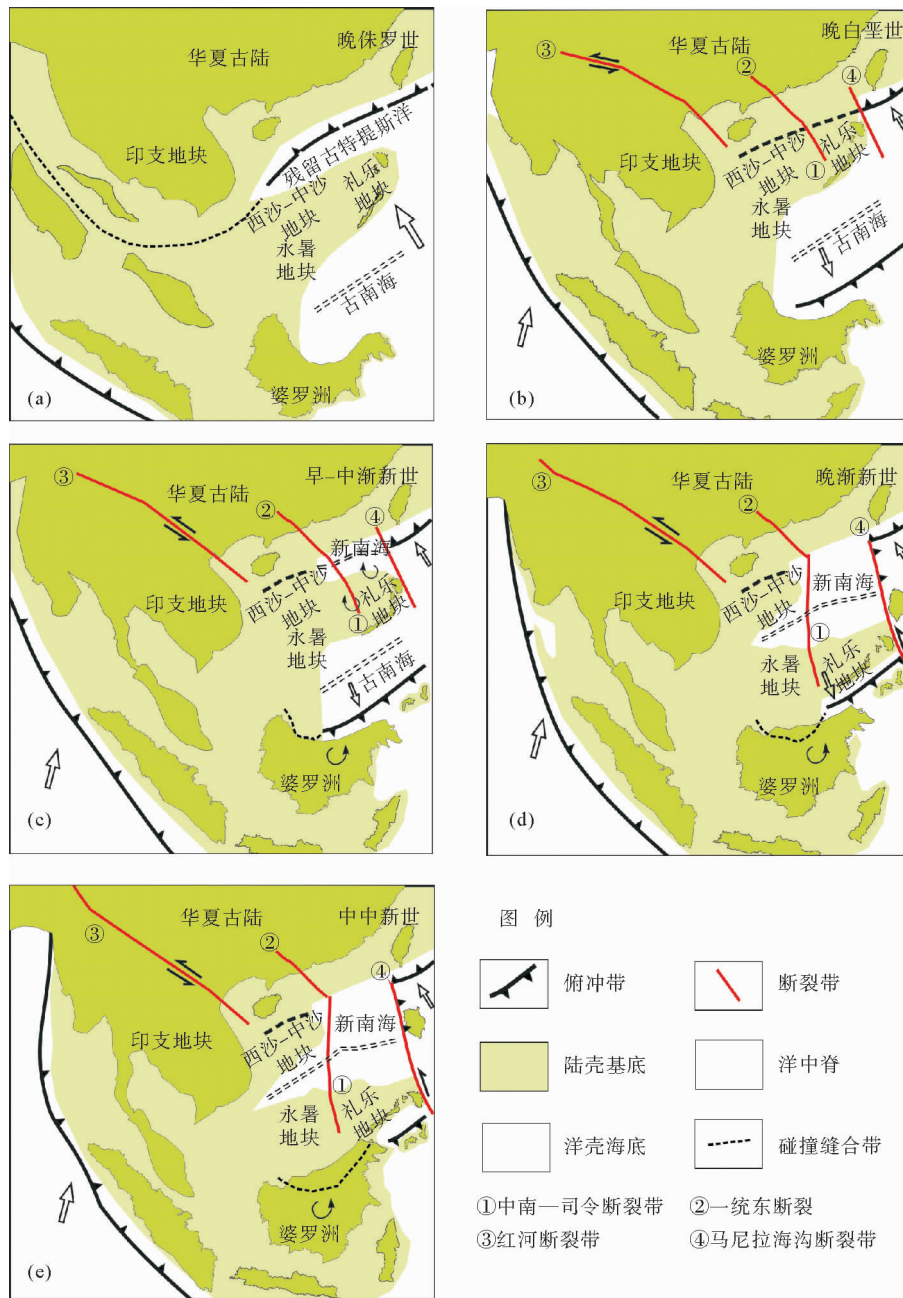


图 15 南海扩张构造演化图

Fig. 15 Evolution of the South China Sea seafloor spreading

礼乐-北巴拉望地块与婆罗洲的碰撞时间、碰撞俯冲速率。

### 5 中南—司令断裂走滑活动的大地构造意义

作为一条在晚白垩世伴随华南陆缘与南沙块体碰撞造山形成的走滑断裂，中南—司令断裂起到了调节古双峰-笔架碰撞造山带东西部压缩应变差异的作用，前文已经提到，在此不赘述。

晚白垩世末期，印度板块沿 NNE 方向俯冲于欧亚板块之下，产生强烈的挤压，同时西太平洋发生俯冲带后撤，在两大构造域共同作用下，欧亚大陆东南边缘发生弧后扩张，形成 NE—NEE 向张性断裂和 NW—NNW 向剪性断裂<sup>[31]</sup>。中南—司令断裂在此时沿碰撞时期形成的 NNW 向断裂在长度和深度上不断扩展，成为一条切穿地壳的深大断裂，在“构造挤出模式”<sup>[20,21]</sup>所推断的印支地块和南沙地块向南东挤出逃逸中，与红河断裂相似，作为块体走滑逃逸的边界，调节了古南海北部陆缘东西部应变的差

异,红河-越东断裂带、中南—司令断裂带和马尼拉海沟断裂带同是印度-欧亚板块碰撞形成的“滑线场”中的 3 条支线,共同控制了南海的形成演化。此外,在西南次海盆的扩张过程中,红河断裂带在海域的大规模走滑运动控制了西南次海盆的扩张方向由东部次海盆的 NNW—SSE 向转变为 NW—SE 向<sup>[31]</sup>,中南—司令断裂带的存在使扩张逐渐转为渐进式扩张<sup>[65]</sup>。

## 6 结论

(1)南海东部次海盆与西南次海盆、西北次海盆之间存在切穿地壳的中南—司令断裂带,断裂可向南延伸至南沙地块之上,形成于晚白垩世。其走滑活动早期的走向呈 NNW 向,经过南沙地块和海盆的顺时针旋转,其走向逐步转变为 NS 向。

(2)中南—司令断裂与红河-越东断裂、马尼拉海沟断裂组成区域上的小“滑线场”,共同制约南海的扩张和南沙地块的南移。同时,中南—司令断裂还是导致西南次海盆渐进式扩张的原因。

## 参考文献 (References)

- [1] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Sea[C]//The Tectonic and Geologic Evolution of South Eastern Asian Seas and Islands, I. Washington D C: Geophysical Monograph Series, 1980, 23: 89-104.
- [2] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea basin[C]// The Tectonic and Geologic Evolution of South Eastern Asian Seas and Islands, II. Washington D C: Geophysical Monograph Series, 1983, 27: 23-56.
- [3] 刘海龄,郭令智,孙岩,等. 南沙地块断裂构造系统与岩石圈动力学研究[M]. 北京:科学出版社,2002. [LIU Hailing, GUO Lingzhi, SUN Yan, et al. Study on fault system in Nansha block (South China Sea) and the block's lithospheric dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2002. ]
- [4] Tongkul F. Structural style and tectonics of western and northern Sabah[J]. Geological Society of Malaysia Bulletin, 1990, 27: 57-63.
- [5] 姚伯初. 中南—礼乐断裂的特征及其构造意义[J]. 南海地质研究, 1995, 7: 1-14. [YAO Bochu. Characteristics and tectonic meaning of Zhongnan-Lilefault[J]. Geological Research of South China Sea, 1995, 7: 1-14. ]
- [6] 熊莉娟,李三忠,索艳慧,等. 南海南部新生代控盆断裂特征及盆地群成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 113-127. [XIONG Lijuan, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Cenozoic basin-controlling faults and their bearing on basin groups formation in the southern South China Sea[J]. 2012, 32(6): 113-127]
- [7] Li C F, Song T R. Magnetic recording of the Cenozoic oceanic crustal accretion and evolution of the South China Sea basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(20): 5063-5069.
- [8] 李家彪,丁巍伟,高金耀,等. 南海新生代海底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, 2011, 54(12): 3004-3015. [LI Jiabiao, DING Weiwei, GAO Jinyao, et al. Cenozoic evolution model of the sea-floor spreading in South China Sea: new constraints from high resolution geophysical data[J]. Chinese J. Geophys., 2011, 54(12): 3004-3015. ]
- [9] 金庆焕,李唐根. 南沙海域区域地质构造[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(1): 1-8. [JIN Qinghuan, LI Tanggen. Regional geologic tectonics of the Nansha sea area[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2000, 20(1): 1-8. ]
- [10] 姚伯初,曾维军, Hayes D E, 等. 中美合作调研南海地质专报[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1994. [YAO Bochu, ZENG Weijun, Hayes D E, et al. The geological memoir of South China Sea surveyed jointly by China and USA[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994. ]
- [11] Li C F, Zhou Z, Li J, et al. Structures of the northeastern most South China Sea continental margin and ocean basin: Geophysical constraints and tectonic implications[J]. Mar. Geophys Res., 2007, 28: 59-79.
- [12] Ru K, Pigott J D. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea[J]. AAPG Bull, 1986, 70: 1136-1155.
- [13] Li C F, Li J, Ding W, et al. Seismic stratigraphy of the central South China Sea basin and implications for neotectonics [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120 (3): 1377.
- [14] 丁巍伟,李家彪. 南海南部陆缘构造变形特征及伸展作用:来自两条 973 多道地震测线的证据[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3038-3056. [DING Weiwei, LI Jiabiao. Seismic stratigraphy, tectonic structure and extension factors across the southern margin of the South China Sea: evidence from two regional multi-channel seismic profiles[J]. Chinese J. Geophys., 2011, 54(12): 3038-3056. ]
- [15] LIU Hailing, ZHENG Hongbo, WANG Yanlin, et al. Basement of the South China Sea area: Tracing the Tethyan realm [J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 2011, 85(3): 637-655.
- [16] Karig D E. Origin and development of marginal basins in the western Pacific[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76(11): 2542-2561.
- [17] Ben-Avraham Z, Uyeda S. The evolution of the China Basin and the Mesozoic paleogeography of Borneo[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 18(5): 365-376.
- [18] 郭令智,施央申,马瑞士. 西太平洋中生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成和演化[J]. 地质学报, 1983, 57(1): 11-12. [GUO Lingzhi, SHI Yangshen, MA Ruishi. Formation and evolution of continental margins and island arcs along West Pacific Ocean during Mesozoic and Cenozoic[J]. Acta Geologica Sinica, 1983, 57(1): 11-12. ]
- [19] Tamaki K. Upper mantle extrusion tectonics of Southeast A-

- sia and formation of the western Pacific back-arc basins[C]// Workshop: Cenozoic Evolution of the Indochina Peninsula, Hanoi/Do son, Abstract with Program, 1995: 89.
- [20] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 1982, 10(12):611-616.
- [21] Tapponnier P, Mercier J L, Armijo P. On the mechanics of the collision between India and Asia[J]. *Journal of Geologic Society of London*, 1986, 19: 115-157.
- [22] 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[J]. *Nature*, 1990, 243: 431-437.
- [23] Hollway N H. 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[J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66: 1357-1383.
- [24] Hall R. Reconstructing Cenozoic SE Asia[C] //Tectonic evolution of Southeast Asia. London: Geological Society Special Publication, 1996: 153-184.
- [25] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific computer-based reconstructions, model and animations[J]. *Journal of Asian Earth Sci.*, 2002, 20: 353-431.
- [26] Morley C K. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia[J]. *Tectonophysics*, 2002, 347(4): 189-215.
- [27] 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]. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(B4):6299-6328.
- [28] 张功成,王璞珺,吴景富,等. 边缘海构造旋回:南海演化的新模式 [J]. *地学前缘*, 2015, 22(3): 27-37. [ZHANG Gongcheng, WANG Pujun, WU Jingfu, et al. Tectonic cycle of marginal oceanic basin: A new evolution model of the South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(3): 27-37.]
- [29] Hilde T W C, Uyeda S, Kroenke L. Evolution of the Western Pacific and its margin[J]. *Tectonophysics*, 1977, 38: 145-165.
- [30] 张涛,高金耀,李家彪,等. 南海西北次海盆的磁条带重追踪及洋中脊分段性[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(9): 3163-3172. [ZHANG Tao, GAO Jinyao, LI Jiabiao, et al. The magnetic lineation identifications and segmentation of the northwestern sub-basin in the South China Sea[J]. *Chinese J. Geophys.*, 2012, 55(9): 3163-3172.]
- [31] 鲁宝亮,王万银,张功成,等. 红河断裂带海域延伸位置的地球物理证据及其与南海扩张的关系[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(5): 64-74. [LU Baoliang, WANG Wanyin, ZHANG Gongcheng, et al. Geophysical evidence of the red river fault extending position in the South China Sea and the relationship with seafloor spreading[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(5): 64-74.]
- [32] Li S L, Meng X H, Guo L H, et al. Gravity and magnetic anomalies field characteristics in the South China Sea and its application for interpretation of igneous rocks[J]. *Applied Geophysics*, 2011, 7(4): 295.
- [33] Li C F, Zhou Z, Li J, et al. Magnetic zoning and seismic structure of the South China Sea ocean basin[J]. *Mar Geophys Res*, 2008, 29: 223-238.
- [34] Li CF, Shi X, Zhou Z, et al. Depths to the magnetic layer bottom in the South China Sea area and their tectonic implications[J]. *Geophys J Int.*, 2010, 182: 1229-1247.
- [35] Hinz K, et al. Geology of the dangerous grounds, South China Sea, and the continental margin off southwest Palawan: Results of SONNE cruises SO-23 and SO-27 [J]. *Energy*, 1985, 10(3/4): 297-315.
- [36] 专项综合报告编写组. 我国专属经济区和大陆架勘测专项综合报告[M]. 北京:海洋出版社, 2002. [Project Report Team. Report of Exploring and Mapping EEZ and Shelf of China [M]. Beijing: China Ocean Press, 2002.]
- [37] 万玲,吴能友,曾维军,等. 南沙及其邻近海域地壳结构特征 [C]. *南海地质研究*, 2004: 1-9. [WAN Ling, WU Nengyou, ZENG Weijun, et al. Crustal structure in Nansha and its adjacent area [C]. *Geological Research of South China Sea*, 2004: 1-9.]
- [38] 张训华,扬金玉. 南海海盆形成机制与演化[C]//1999年中国地球物理学会年刊——中国地球物理学会第十五届年会论文集[C]//中国地球物理学会, 1999. [ZHANG Xunhua, YANG Jinyu. Mechanism of the formation and evolution of the South China Sea basin[C]//Annual General Assembly of the Chinese Geophysical Society. Chinese Geophysical Society, 1999.]
- [39] 姚伯初,万玲. 南海岩石圈厚度变化特征及其构造意义[J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 888-899. [YAO Bochu, WAN Ling. Variation of the lithospheric thickness in the South China Sea area and its tectonic significance[J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 888-899.]
- [40] 徐行,姚永坚,王立非. 南海南部海域南薇西盆地新生代沉积特征[J]. *中国海上油气(地质)*, 2003, 17(3): 170-175. [XU Xing, YAO Yongjian, WANG Lifei. Cenozoic sedimentation of Nanweixi basin, the southern South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas(Geology)*, 2003, 17(3): 170-175.]
- [41] 王嘹亮,吴能友,周祖翼,等. 南海西南部北康盆地新生代沉积演化史[J]. *中国地质*, 2002, 29(1): 96-102. [WANG Liaoliang, WU Nengyou, ZHOU Zuyi, et al. History of Cenozoic sedimentary evolution of the Beikang Basin, southwestern South China Sea[J]. *Geology in China*, 2002, 29(1): 96-102.]
- [42] 孙龙涛,孙珍,周蒂,等. 南沙海区礼乐盆地沉积地层与构造特征分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2008, 32(2): 151-158. [SUN Longtao, SUN Zhen, ZHOU Di, et al. Stratigraphic and structural characteristics of Liyue basin in Nanshaarea [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2008, 32(2): 151-158.]
- [43] 谢晓军,张功成,刘世翔,等. 礼乐盆地漂移前的位置探讨 [J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(2): 8-13. [XIE Xiaojun,

- ZHANG Gongcheng, LIU Shixiang, et al. Discussion of pre-drifting position of the Liyue Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(2):8-13. ]
- [44] 郝天珧,徐亚,孙福利,等. 南海共轭大陆边缘构造属性的综合地球物理研究[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3098-3116. [HAO Tianyao, XU Ya, SUN Fuli, et al. Integrated geophysical research on the tectonic attribute of conjugate continental margin of South China Sea[J]. *Chinese J Geophys.* 2011, 54(12):3098-3116. ]
- [45] 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. [LI Jiabiao. Dynamics of the continental margins of South China Sea: scientific experiments and research progresses[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 2993-3003. ]
- [46] 孙珍,孙龙涛,周蒂,等. 南海岩石圈破裂方式与扩张过程的三维物理模拟[J]. *地球科学*, 2009, 34(3): 435-447. [SUN Zhen, SUN Longtao, ZHOU Di, et al. Discussion on the South China Sea evolution and lithospheric breakup through 3D analogue Modeling[J]. *Earth Science*, 2009, 34(3): 435-447. ]
- [47] 赵美松,刘海龄,吴朝华. 南海南北陆缘中生代地层—构造特征及碰撞造山[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(4): 1454-1464. [ZHAO Meisong, LIU Hailing, WU Chaohua. Mesozoic stratigraphic and structural features and collisional orogeny between the northern and southern continental margins of South China Sea[J]. *Progress in Geophys*, 2012, 27(4): 1454-1464. ]
- [48] 周洋,刘海龄,朱荣伟,等. 南海北部陆缘古双峰-笔架碰撞造山带空间展布特征初探[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(4):77-84. [ZHOU Yang, LIU Hailing, ZHU Rongwei, et al. Spatial distribution of ancient Shuangfeng-Bijia orogen on northern continental margin of South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2016, 36(4): 77-84. ]
- [49] 沈宝云,周洋,朱荣伟. 南海北缘琼南缝合带的锆石 U-Pb 年龄制约[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(4): 103-110. [SHEN Baoyun, ZHOU Yang, ZHU Rongwei. Zircon U-Pb age constraints to Qiongnan suture zone on the northern margin of South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2016, 36(4): 103-110. ]
- [50] 沈宝云,刘兵,刘海龄,等. 海南岛小妹韧性剪切带的纳米尺度研究[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2016, 41(9): 1489-1498. [SHEN Baoyun, LIU Bing, LIU Hailing, et al. The research of Xiaomei ductile shear zone on Hainan island in a nanoscale perspective[J]. *Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2016, 41(9): 1489-1498. ]
- [51] 刘海龄,周洋,沈宝云. 南海北部大陆边缘区域大地构造研究最新进展[J]. *中国科技成果*, 2015, 16(1): 13-15. [LIU Hailing, ZHOU Yang, SHEN Baoyun. New developments of the southern margin of South China Sea regional tectonic research [J]. *China Science and Technology Achievements*, 2015, 16(1): 13-15. ]
- [52] 杜云空,刘海龄,谈晓冬,等. 海南岛晚古生代—中生代古地磁新结果及其对南海北缘大地构造的意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(6): 93-103. [DU Yunkong, LIU Hailing, TAN Xiaodong, et al. Late Paleozoic to Mesozoic paleomagnetic results from Hainan island and its tectonic implications for the northern margin of the South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2013, 33(6): 93-103. ]
- [53] 吴朝华,赵美松,刘海龄. 南沙中部海域沉积地层特征及构造成因[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2011, 36(5): 851-860. [WU Chaohua, ZHAO Meisong, LIU Hailing. Characteristics of sedimentary strata in central Nansha sea area and its tectonic origin[J]. *Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(5): 851-860. ]
- [54] Zhou D, Ru K, Chen H Z, et al. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251:161-177.
- [55] Clift P, Lin J. Preferential mantle lithospheric extension under the South China margin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18: 929-945.
- [56] Hutchison C S. The 'Rajang accretionary prism' and 'Lupar Line' problem of Borneo[J]. *Geol Soc*, 1996,106: 247-261.
- [57] 吴世敏,周蒂,刘海龄. 南沙地块构造格局及其演化特征[J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(1): 23-28. [WU Shimin, ZHOU Di, LIU Hailing. Tectonic framework and evolutionary characteristics of Nansha Block, South China Sea[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2004, 28(1): 23-28. ]
- [58] Hamilton W. Tectonics of the Indonesian Region[M]. *US Geol Surv, Prof Paper* 345. 1979: 1078-1079.
- [59] Williams P R, Johnston C R, Almond R A, et al. Late Cretaceous to Early Tertiary structural elements of West Kalimantan[J]. *Tectonophysics*, 1988, 148: 279-297.
- [60] 董冬冬,吴时国,李家彪,等. 南海共轭大陆边缘的构造对比及差异伸展模式[J]. *中国科学:地球科学*, 2014, 44(5): 1059-1070. [DONG Dongdong, WU Shiguo, LI Jiabiao, et al. Tectonic contrast between the conjugate margins of the South China Sea and the implication for the differential extensional model[J]. *Science China: Earth Science*, 2014, 44(5): 1059-1070. ]
- [61] 雷超,任建业,张静. 南海构造变形分区及成盆过程[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2015, 40(4): 744-762. [LEI Chao, REN Jianye, ZHANG Jing. Tectonic province divisions in the South China Sea; Implications for basin geodynamics[J]. *Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2015, 40(4): 744-762. ]
- [62] 解习农,任建业,王振峰,等. 南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 77-87. [XIE Xinong, REN Jianye, WANG Zhenfeng, et al. Difference of the tectonic evolution of continental marginal basins of South China Sea and relationship with SCS spreading[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 77-87. ]
- [63] 姚伯初. 南海海盆新生代的构造演化史[J]. *海洋地质与第四*



- 纪地质, 1996, 16(2): 1-13. [YAO Bochu. Tectonic evolution of the South China Sea in Cenozoic[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1996, 16(2): 1-13.]
- [64] 周蒂, 吴世敏, 陈汉宗, 等. 南沙海区及邻区构造演化动力学的若干问题[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(3): 339-345. [ZHOU Di, WU Shimin, CHEN Hanzong, et al. Some remarks on the tectonic evolution of Nansha and its adjacent regions in southern South China Sea[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2005, 29(3): 339-345.]
- [65] LI Jiabiao, DING Weiwei, WU Ziyin, et al. The propagation of seafloor spreading in the southwestern subbasin, South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin 2012, 57(20): 1896-1905.

## EXTENSION OF THE ZHONGNAN-SILING FAULT ZONE IN SOUTH CHINA SEA AND ITS BEARING ON SEAFLOOR SPREADING

LI Yuhan<sup>1,2</sup>, LIU Hailing<sup>1</sup>, ZHU Rongwei<sup>1,2</sup>, WANG Yin<sup>1,2</sup>, ZHOU Yang<sup>1,2</sup>, XU Ziyang<sup>3</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075)

**Abstract:** In order to detect the extension pattern of the Zhongnan-Siling fault zone in the oceanic basin, to define the southern margin of South China Sea, and to explore its relationship with the evolutionary history of seafloor spreading of the South China Sea, comprehensive geological and geophysical studies are made by the authors based on the data of gravity and magnetic anomalies, seismic profiles, depth of Moho, seismic P-wave velocity, drilling and dredging samples. The Zhongnan-Siling fault zone, which cuts down to the Moho-boundary, extends in N-S trend between the Eastern Sub-basin and Northwest Sub-basin along the southern margin of the South China Sea, and can be traced to the southern continental margin of the South China Sea. According to the variation in the trend of the magnetic anomaly belt in the oceanic basin of the South China Sea and the mutual relationship of the magnetic anomaly belt with the strike-slip or transform fault and the seafloor spreading direction, combined with previous research results on the “scissors-like” collision, seafloor spreading evolution and the tectonic stress of the South China Sea, the authors proposed in this paper that in the period of 32Ma to 25Ma, the South China Sea basin and the Nansha block had experienced a clockwise rotation along with the spreading of the Eastern Sub-basin in NNW trend, which caused the change in the direction of the Zhongnan-Siling fault from NNW in the early stage to N-S later on. After 23.5Ma, the clockwise rotation was stopped, while the Eastern Sub-basin continued to spread in NNW trend, the southwestern Sub-basin began spreading in a NW-SE trend with SW-ward propagation. The three crust-cutting deep faults, the Zhongnan-Siling fault, together with the other two regional crust-cutting deep faults, the Red River-East Vietnam fault and the Manila trench fault, formed a regional “slip line field”, which constrained the seafloor spreading of the South China Sea and the southward drifting of the Nansha block.

**Key words:** seafloor spreading of the South China Sea; slip line field; ancient Shuangfeng-Bijia collision orogenic belt; Cenozoic; Zhongnan-Siling fault zone