

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.04.013

南海转换断层成因机制及对南海扩张的启示

张勇^{1,2,3}, 任治军¹, 葛海明¹, 王广哲⁴, 李三忠^{2,3},
郭玲莉^{2,3}, 王鹏程^{2,3}

(1. 江苏省电力设计院, 南京 211102; 2. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237;

4. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004)

摘要:转换断层是揭示边缘海盆地演化的一把钥匙,但其成因机制一直都是地质科学研究的难点和热点。基于高分辨率海底构造地貌、盆地发育几何学结构、重磁异常、磁条带分布样式、莫霍面埋深、海底热流和南海北部地震剖面等资料对比,并结合区域地质背景、板块重建、动力学来源,重新厘定了南海海盆转换断层和邻区走滑断层的分布,尤其是其走向,统一归结为 NNE 向。另外,从转换断层走向的角度入手,提出了边缘海盆地扩张的新模式,并修正了前人对新生代南海的板块重建方案。南海海盆真正的转换断层方向应该是 NNE 向,并不是传统上认为的 NW 向。NNE 向转换断层及南海的扩张,可能为继承邻区裂解陆缘走滑断层方位的模式。NNE 向转换断层实际上就是在南海陆架中广泛分布的 NNE 向大型右行走滑断层,也是华南地块上一系列 NNE 向右行走滑断裂在海上的自然延伸,进而提出南海转换断层实际上是继承了邻区陆地上大型走滑断层的走向。这种模式并不是类似于正常洋中脊那样的正向扩张,而是一种斜向扩张,转换断层不垂直于扩张中心。

关键词:转换断层;右行走滑断层;板块重建;南海海盆

中图分类号:P736.1

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2017)04-0193-16

转换断层的成因机制是板块构造理论诞生以来一个尚未完全解决的科学问题。随着计算机技术的飞速发展,一些数值模拟手段的应用,近年来一些新的研究开始触及成因机制^[1-3]。然而,这些研究依然集中于讨论洋中脊处的转换断层成因及扩张速率,对边缘海盆地中广泛分布的、复杂的转换断层的形成与演化的认识依然很薄弱和滞后。

转换断层不仅是揭示边缘海盆地演化的一把钥匙,其成因机制一直都是地质科学研究的难点和热点,其走向就是边缘海盆地开始扩张方向,可以揭示边缘海盆地形成的动力学背景,精细复原边缘海扩张历程,有助于深刻理解大陆岩石圈与大洋板块的相互作用。南海海盆转换断层有助于解析西太平洋活动大陆边缘构造演化,恢复新生代以来东亚陆缘与太平洋板块、印度-澳大利亚板块、菲律宾海板块等相互作用过程及构造格局变迁。

基金项目:国家自然科学基金项目(41325009, 41190072, 41502321, 41402172, 41502042, 41502185);山东省泰山学者特聘教授项目;鳌山卓越科学家计划项目(2015ASTP-0S10)

作者简介:张勇(1990—),男,工程师,从事海洋地质及构造地质学研究, E-mail: yongzhy@163.com

通讯作者:李三忠(1968—),男,教授,博导,从事构造地质学及海洋地质学的教学和研究, E-mail: Sanzhong@ouc.edu.cn

收稿日期:2017-05-31; **改回日期:**2017-06-19 周立君编辑

另外,边缘海盆地蕴藏着丰富的石油、天然气水合物和各种多金属矿产。全球石油储量的 80% 和 70% 的天然气均处于大陆边缘附近^[4]。广州海洋地质调查局于 2013 年对南海北部台西南盆地钻取的多类型天然气水合物实物样品中甲烷气体含量超过 99%,并初步估算研究区水合物地质储量相当于约 $1\,250 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的天然气,规模相当于一个特大型常规天然气田^[5]。

弧后盆地概念出现以来^[6,7],边缘海成因机制一直都是地球科学关注的焦点^[8,9]。但是,直到最近几年才有一些研究开始关注转换断层在揭示边缘海形成^[10,11]及洋-陆过渡带^[12]构造演化中的作用。

Liao 和 Gerya^[13]认为大陆裂解作用和海底扩张与转换断层的形成有关,转换断层一种可能的形成机制是沿先存岩石圈薄弱面发育,但没有系统的实例论证分析。Honza^[14]发现,西太平洋多数弧后盆地的转换断层与扩张轴斜交,而不是经典板块构造理论中严格意义上的正交,这一点与正常洋中脊不同,其扩张轴在大环内垂直于转换断层走向。这种现象的普遍性可能表明,边缘海扩张及转换断层的发育可能受到相邻板块构造、大陆边缘动力学及俯冲板块的运动方向的约束^[15,16]。亚丁湾、红海等

陆间海就是这种斜向扩张^[17,18], 这为南海海盆转换断层的研究提供了一个新思路, 说明其形成机制可能类似, 可以进行对比。

针对南海海盆转换断层和扩张过程这一重要科学问题, 本文综合利用现有的资料, 如地震剖面、重磁异常、磁条带、海底地形地貌、莫霍面、海底热流、盆地发育几何学等, 重新厘定南海海盆转换断层的分布, 尤其是走向, 推测其可能的形成机制, 并结合前人重建方案, 从转换断层的角度入手, 恢复新生代以来南海海盆扩张及演化过程。

1 区域地质背景

南海海盆(34~16 Ma)是东亚陆缘最大的边缘

海, 位于欧亚板块、太平洋板块、菲律宾海板块和印度-澳大利亚板块四大板块的夹持之下, 是西太平洋活动大陆边缘的一部分^[16,19](图 1)。从大地构造演化史来看, 南海处于东部太平洋构造域和西部新特提斯构造域的叠加部位, 是现今构造活动最活跃的地区之一。

自新生代以来, 该地区发生了一系列重大的地质过程演化, 如太平洋板块运动方向约于 42 Ma 由先前的 NWW 向转变为 NNW 向, 始新世以来印度-澳大利亚板块俯冲碰撞致使青藏高原多幕次快速隆升, 早渐新世至中中新世南海快速扩张, 中新世菲律宾海板块开始快速向北运移, 5 Ma 以来台湾强烈的造山事件^[20]。这些事件都导致了南海及周缘海-陆格局重大变化, 形成了现今复杂的构造面貌。

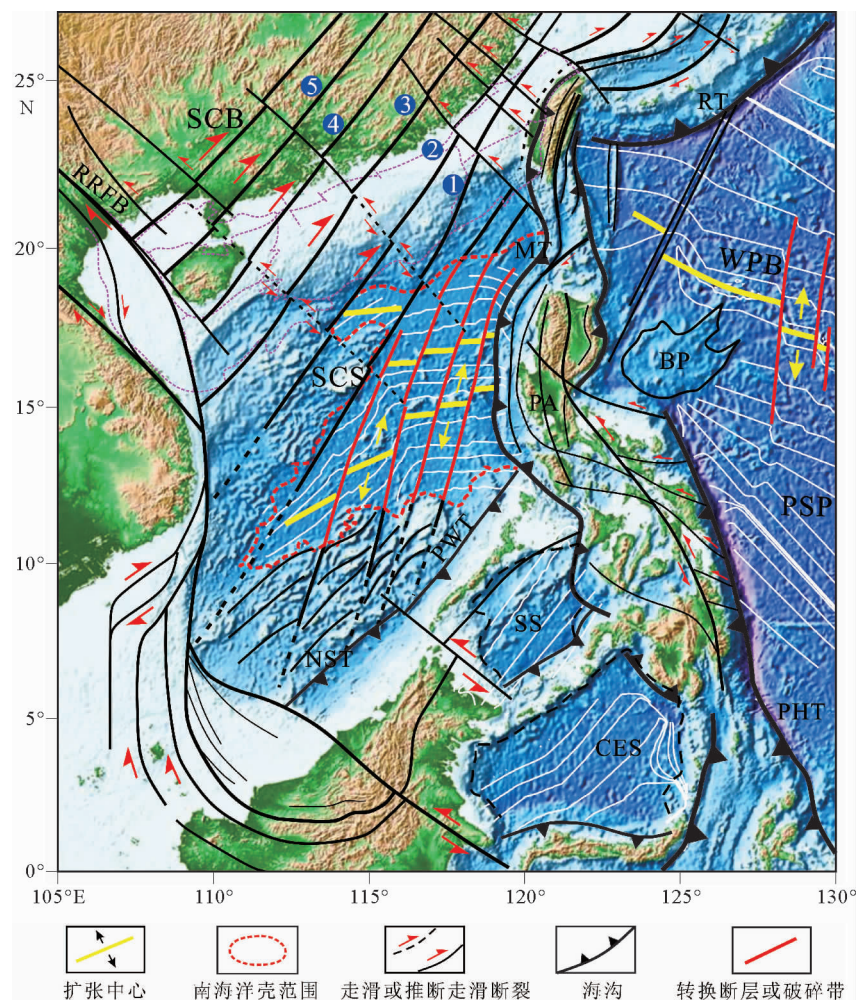


图 1 南海及周缘大地构造单元划分

白色曲线代表洋盆中分布的磁条带, 品红色虚线代表南海北部陆架盆地;

名称缩写: SCB. 华南地块; SCS. 南海; RRFB. 红河断裂带; PWT. 巴拉望海沟; NST. 南沙海沟; SS. 苏禄海; CES. 西里伯斯海; MT. 马尼拉海沟; PA. 菲律宾岛弧; LT. 吕宋海沟; PSP. 菲律宾海板块; BP. 本哈姆海台; PHT. 菲律宾海沟; WPB. 西菲律宾海盆; 断裂名称: 1. 滨海断裂; 2. 长乐-南澳断裂; 3. 政和-大浦断裂; 4. 邵武-阳江断裂; 5. 吴川-四会断裂

Fig. 1 Simplified tectonic map in the South China Sea and adjacent areas

南海位于华南地块的南部,呈 NE—SW 向展布的菱形,由陆架盆地、陆坡盆地和南海海盆组成(图 1),其周缘被 4 个不同类型的大陆边缘所围限。南海海盆处于南海中央位置,据水深、海底地形地貌等特征,可分为 3 个次海盆:中央海盆或东部次海盆、西北次海盆、西南次海盆,大致呈“V”字型。海底分布有一系列近 EW 向的火山链,其中又以 15.5°N 附近南海停止扩张后因板内火山作用而形成的黄岩岛海山链发育规模最大^[15],出现在石化的扩张中心处,被认为是南海的残留扩张中心^[21]。

南海北部陆缘呈 NEE 向,自西向东依次分布有北部湾、琼东南、珠江口和台西南等新生代陆架盆地,衔接华南地块和南海海盆,经纬度大致界于 18°~22°N 与 108°~120°E^[22]。南海北部自新生代以来经历了大陆张裂,礼乐滩、东巴拉望和西南民都洛等微陆块裂离,海底扩张,直至中中新世表现为拗陷沉降,沉积了一套海相地层,仅局部起始于渐新世,变形微弱^[16],且地壳稳定性较强,大震、强震较少,此后通常被认为是被动大陆边缘体系。然而,大量地震剖面揭示,南海北部陆缘陆架盆地的主断裂向陆倾,这与典型的被动陆缘主控断裂向海倾明显不同^[23]。此外,新近纪及其后,南海北缘依然具有较强的岩浆活动^[24,25]。因此,部分学者多认为南海北缘可能是“非典型”的被动大陆边缘。断裂构造在北部陆缘十分发育,按断裂走向大致可分为 NE—NNE 向、NW 向、近 EW 或 NEE 向三组^[16,22,23]。NE—NNE 向断裂占据主导,断裂切割深至岩石圈,且多表现为张扭性;NW 向断裂为基底断裂,以剪性断裂为主;近 EW 或 NEE 向断裂规模小,但数量众多,为盖层断裂,多表现为张性正断层^[23]。地震剖面上断裂交切关系揭示,近 EW 或 NEE 向、NW 向两组断裂切割 NE—NNE 向断裂,NW 向断裂形成最晚,空间分布整体呈棋盘状交错排列,使得南海北部陆缘形成了“南北分带、东西分块”的构造格局。

南海南部陆架包括巽他陆架北部和加里曼丹北部陆架,与南海北部陆架同为 NE—SW 向展布。对比礼乐-巴拉望块体与华南地块东南部岩性及不整合面的特点,发现渐新世之前二者具有相同的区域性规律,渐新世以后开始出现明显的差别^[26]。钻井资料发现,礼乐滩南部桑帕吉塔 1 井(Sampaguita-1)钻遇 600 m 厚的海相砂岩和页岩,与来自华南大陆中生代沉积物一致^[27]。构造与沉积的证据都表明,在南海扩张前礼乐-巴拉望地块曾是华南大陆的一部分。沙巴北部 NW 向逆冲断层较为发育,蛇纹石化橄榄岩、角砾状玄武岩中也发育强烈的逆冲推

覆构造^[28]。因此,南海南缘早期为裂解型陆缘,与北部大陆边缘相对应,后期转变为以挤压作用为主,由沿南沙海槽发育的俯冲-碰撞构造带所致。

南海西界被公认为是一条走滑剪切型断裂带,自北向南发育有莺歌海、中建南、万安等一系列新生代盆地(图 1),控盆断裂主要有 NNW 向和近 SN 向两组,以红河-哀牢山断裂系和越东滨海断裂带为代表,走滑性质多次发生变化,早期为左行,后期转变为右行^[16,29]。

南海东缘是现今仍在活动的马尼拉海沟,是一个俯冲挤压带和强烈的地震-火山活动带。南海洋壳向东俯冲消减于吕宋岛弧之下,并发育了一系列的火山链。沉积的最老记录揭示马尼拉海沟出现于 17 Ma,菲律宾海板块中中新世快速向北运移并顺时针旋转,吕宋海沟约于 6 Ma 形成,向西俯冲,使得南海成为半封闭海盆,并由单向俯冲演变为双向俯冲^[9]。但俯冲极性以吕宋岛弧中部为界线,北侧依然保留马尼拉海沟向东的单向俯冲,南侧为菲律宾海沟向西和内格罗斯、哥打巴托海沟向东的双向俯冲^[16]。南海东缘构造演化复杂,动力学机制多样。除马尼拉海沟的俯冲增生与俯冲消减和沿台湾造山带的碰撞与楔入,还可能有南海洋中脊俯冲产生的“板片窗”效应^[30]。

总之,南海周缘包含了 4 种大陆边缘类型:北侧张裂型边缘、南部挤压型边缘、西部剪切型边缘和东侧俯冲型边缘^[22]。

2 南海海盆 NNE 向转换断层证据

边缘海转换断层的走向可以直观地反映板块运动的方向,对于揭示边缘海盆形成与演化具有十分重要的指导意义。因此,要认识边缘海打开过程,首先要对转换断层进行重新厘定。南海洋盆转换断层切割至莫霍面,且受到后期强烈的板内火山作用和 NW 向大型走滑断裂系的改造,同时缺少横跨南海海盆的地震剖面,因此本文主要利用海底三维精细构造地形地貌分析、重磁异常、磁条带、莫霍面、海底热流等对南海洋盆转换断层进行重新厘定。

2.1 南海海底三维精细构造地貌分析

海底地貌是构造活动最直接的外在表现形式和最准确的形态标志。断裂可形成断层崖、断裂谷和断块山等地貌,火山作用可形成海山和海丘。

构造地貌分析方法是研究年轻海底构造的一个重要手段和切入点,通过与重磁异常、莫霍面等信息

的对比,是探讨洋中脊扩张方式的一种行之有效的办法。自 20 世纪 90 年代以来,高分辨率多波束海底地形地貌探测技术就已经广泛应用于海底扩张的研究。梁裕扬等^[31]根据西南印度洋脊 $49^{\circ}\sim 51^{\circ}\text{E}$ 区段高分辨率多波束水深地形资料,应用构造地貌分析方法,明确了 10 Ma 以来 Indomed-Gallieni 洋段的演化史。李三忠等^[32]根据不同的构造地貌分析,探讨了西南印度洋洋中脊勘探区的断裂组合规律。

高分辨率多波束地形地貌识别出大量的断崖、断壁等线性构造带,位于黄岩海山链南北两侧,优势方位为 $\text{NEE}67^{\circ}$,与基底断块中 $\text{NE}-\text{NEE}$ 向断裂有良好的对应关系,是扩张时基底断裂在地表的反映^[21,33]。然而,珍珠-黄岩海山链^[34,35]显示东部次海盆扩张轴近东西向(图 2),这表明 NE 或 NEE 向线性构造带可能并不是导致近东西向扩张脊的同裂谷控盆大断裂带。 NE 或 NEE 向断裂走向上不连

续,成群成带分布,且这些数量众多的次级小断裂受 NNE 向右行走滑大断裂控制。

海底火山是地幔物质部分熔融形成的熔体经由断裂构造向上运移至海底,进而喷发固结而成的,是洋壳构造演化的直接地质记录,因此海底火山岩通常被认为是阐明洋底动力过程的“探针”,有助于正确理解区域构造演化^[15]。南海扩张之前($>34\text{ Ma}$),岩浆活动主要发育于北部陆缘的珠江口盆地和北部湾盆地,具有双峰式特点^[37,38];南海扩张期($34\sim 15.5\text{ Ma}$),岩浆多位于扩张中心处^[39];停止扩张后(15.5 Ma 以来),岩浆活动分布广泛,多处于中南半岛南部和加里曼丹岛中—北部^[40](图 3)。

图 3 可见,岩浆岩呈 NEE 向条带状分布于南海北部陆缘,明显受到 $\text{NE}-\text{NNE}$ 向右行走滑断裂的控制。南海洋盆中, NNE 向线性构造带沿线可见有很多孤立的海底火山,这些火山可能就是南海停止扩张后沿着转换断层的走向发生板内火山作用而形

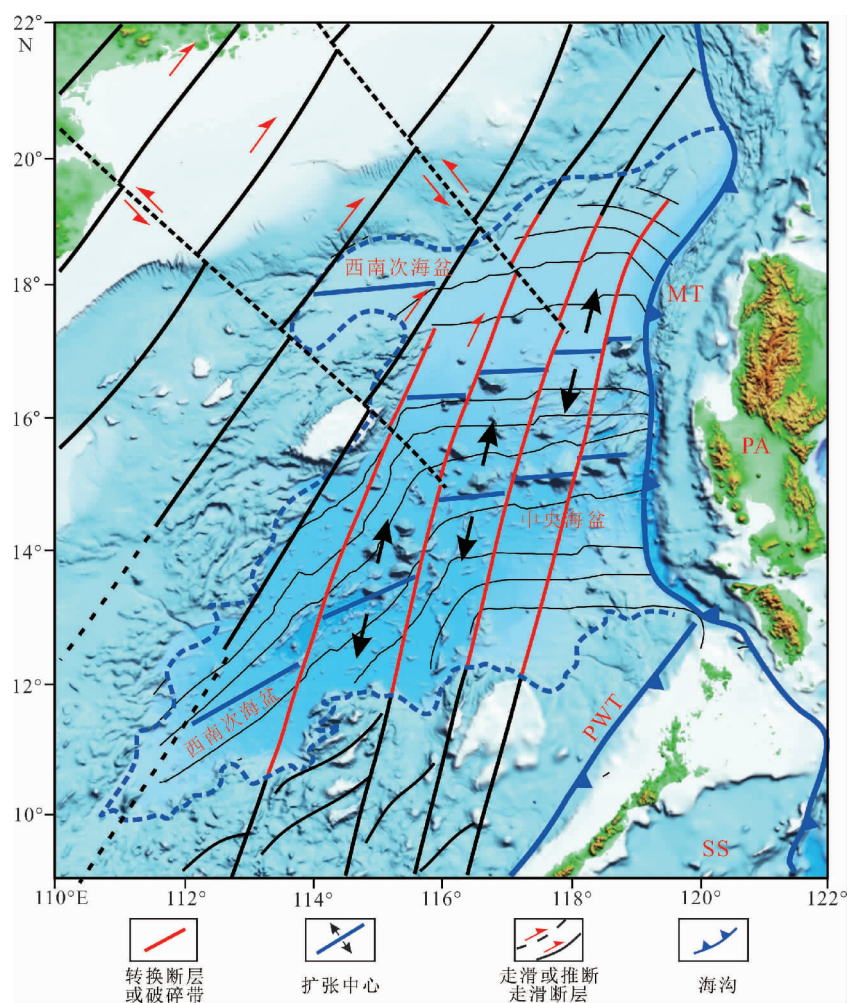


图 2 南海三维精细海底地貌及断裂分布(据文献[36]修改)

蓝色粗虚线代表南海洋盆边界,南海洋盆中黑色细曲线代表磁条带。简称见图 1

Fig. 2 Precise submarine geomorphology and fault pattern in the South China Sea (revised from reference[36])

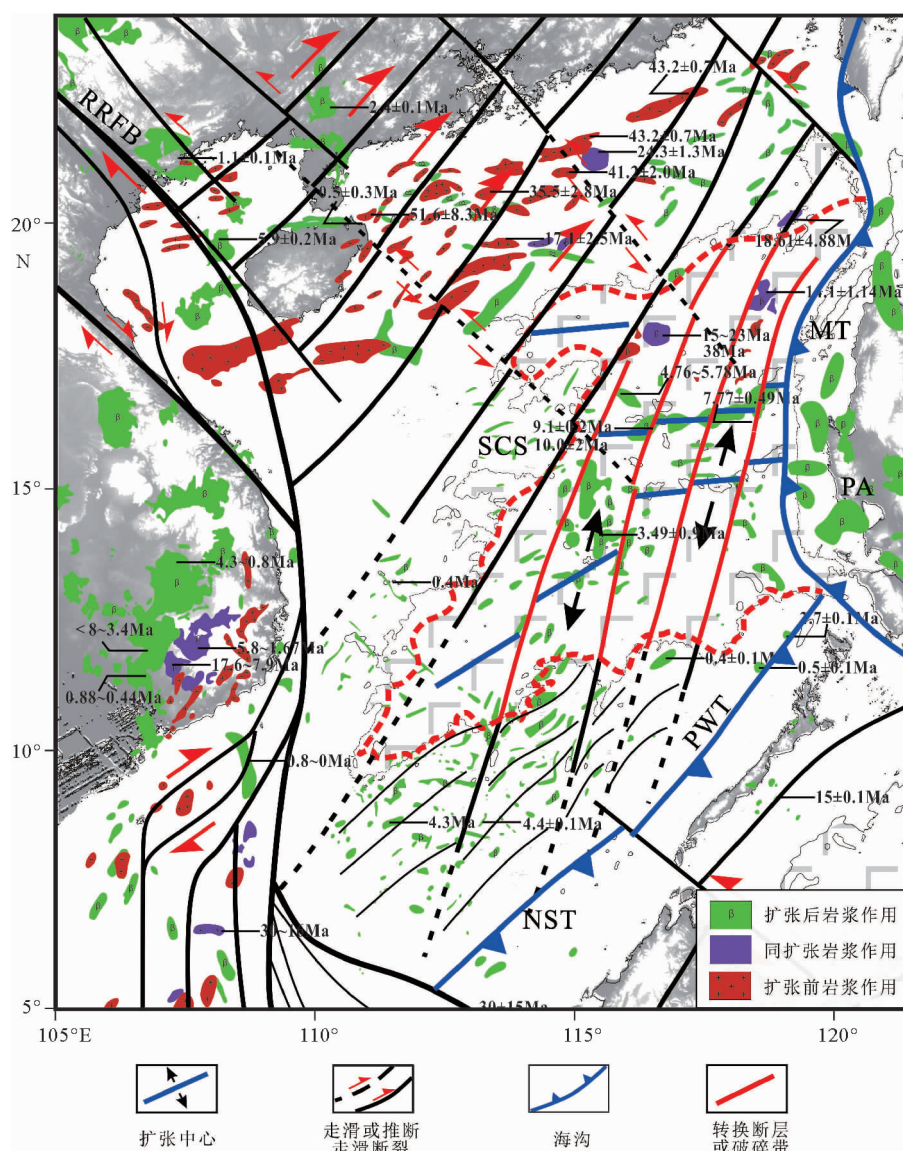


图 3 南海海盆及周围火山岩分布与断裂构造关系(据文献[37]修改)

Fig. 3 The relationship between volcanism and fracture structure in the South China Sea and adjacent areas
(revised from reference [37])

成的^[15](图 2 和 3)。同样,在南海南部,火山作用形成了约有 200 多个海山和海丘,多位于海盆和南沙海域中北部岛礁区,其中岛礁区的岩体主要沿 NE—NNE 向张性断裂带分布^[41]。地幔物质上涌,沿先存张性断裂带岩浆作用频繁,熔蚀地壳并使之减薄。岩浆喷发形成的海山、海丘呈线状或链状分布,排列规律。

上述构造地貌特征均指示了 NNE 向断裂为南海海盆的转换断层。

2.2 重磁异常

重磁异常可以清楚地反映基底断裂、岩石圈断

裂的性质,是研究海域中深大断裂的一种行之有效的手段。

华南地块发育了一系列 NE—NNE 向走滑断裂,一直延伸到南海北部陆缘,成为南海北部陆架盆地的控盆断裂或者分隔盆地内部的次级凹陷^[22,42]。这些断裂部分沿串珠状重力高异常,部分沿等轴状重力高异常,还有部分为正、负重力异常的分界;多数分隔长轴状磁力高异常,也有部分位于正、负磁力异常边界区(图 4 和 5)。由西向东,正、负重力异常相间分布,这与南海北部隆起与坳陷相间排列的构造特征一致^[16]。

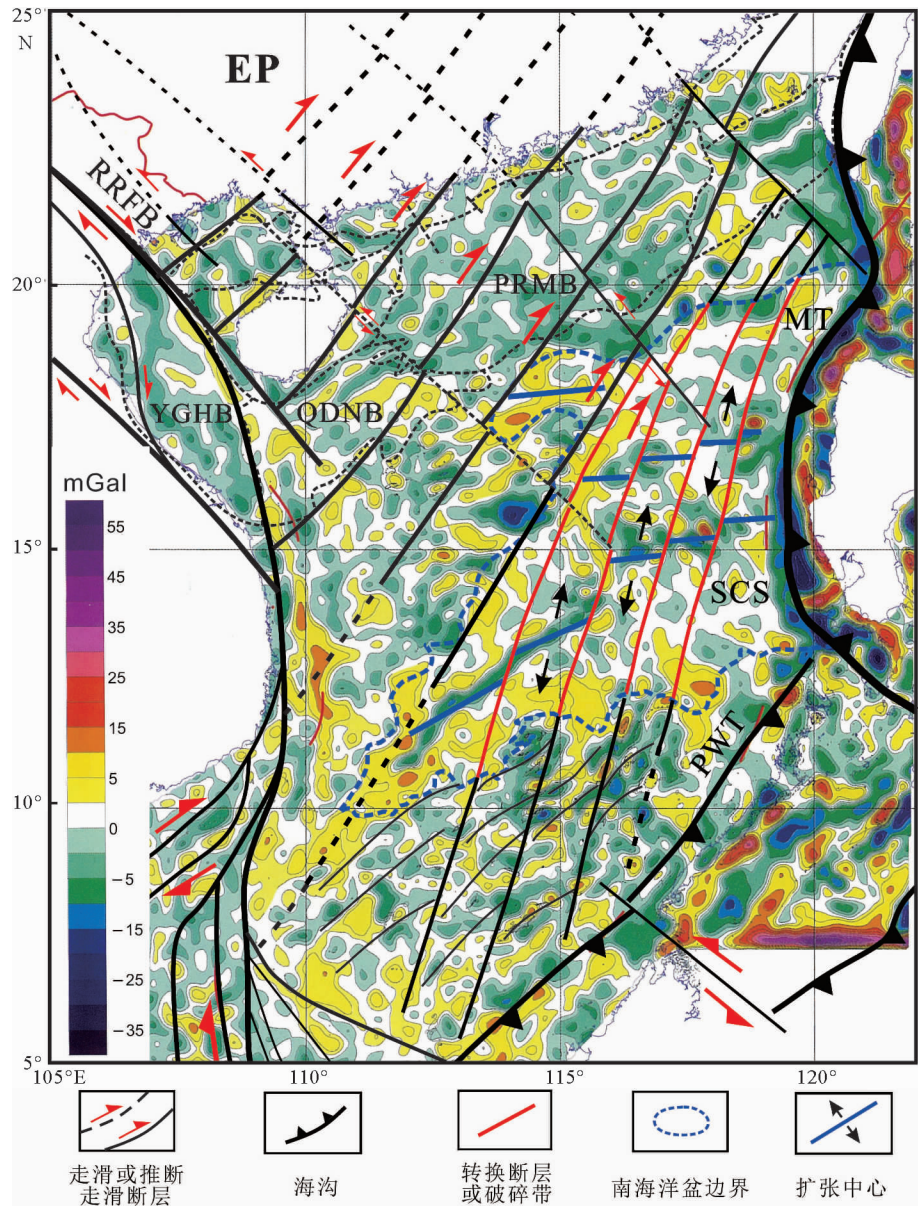


图 4 南海准完全布格重力异常小波分解 3 阶细节与断裂分布关系(重力资料来自文献[36])
简称缩写:PRMB.珠江口盆地;QDNB.琼东南盆地;YGHB.莺歌海盆地;其他简称见图 1

Fig. 4 Third-order details of Bouguer anomalies by the wavelets and the fault distribution in the South China Sea
(gravity data from reference [36])

在南海海盆中,NE—NNE 向断裂多穿过等轴状重力高异常(图 4)。正值磁异常分布尤为明显,多呈长轴状,近平行于南海海盆的扩张中心,被 NE—NNE 向断裂错段,且错段特征指示断裂具有右行特征(图 5)。

在南海南部海域,正值重力异常呈串珠状分布,呈 NNE 向排列,指示 NNE 向断裂发育,幅值最高可达 20 mGal,与该区整体上重力呈负异常明显不同(图 4)。磁力异常相对紊乱,波动较大,可能与南海停止扩张之后该海域板内火山作用活动强烈,岩浆多沿先存断裂喷发至海底有关^[37](图 5)。因此,

分布于华南大陆的 NE—NNE 向走滑断裂向南自然延伸至南部北部陆坡,并穿过南海海盆,进一步在南海南部陆缘发育。NE—NNE 向断裂与重磁异常有良好的对应关系。

2.3 磁条带

南海海盆分布大量的磁条带(图 1,图 2)。本文所用磁条带来自澳大利亚悉尼大学 Earth Byte 团队(<http://www.earthbyte.org/>)。东部次海盆磁条带近 EW 向,近似平行于扩张中心;西部次海盆磁条带呈 NE—SW 向,与扩张中心有一定的交角。

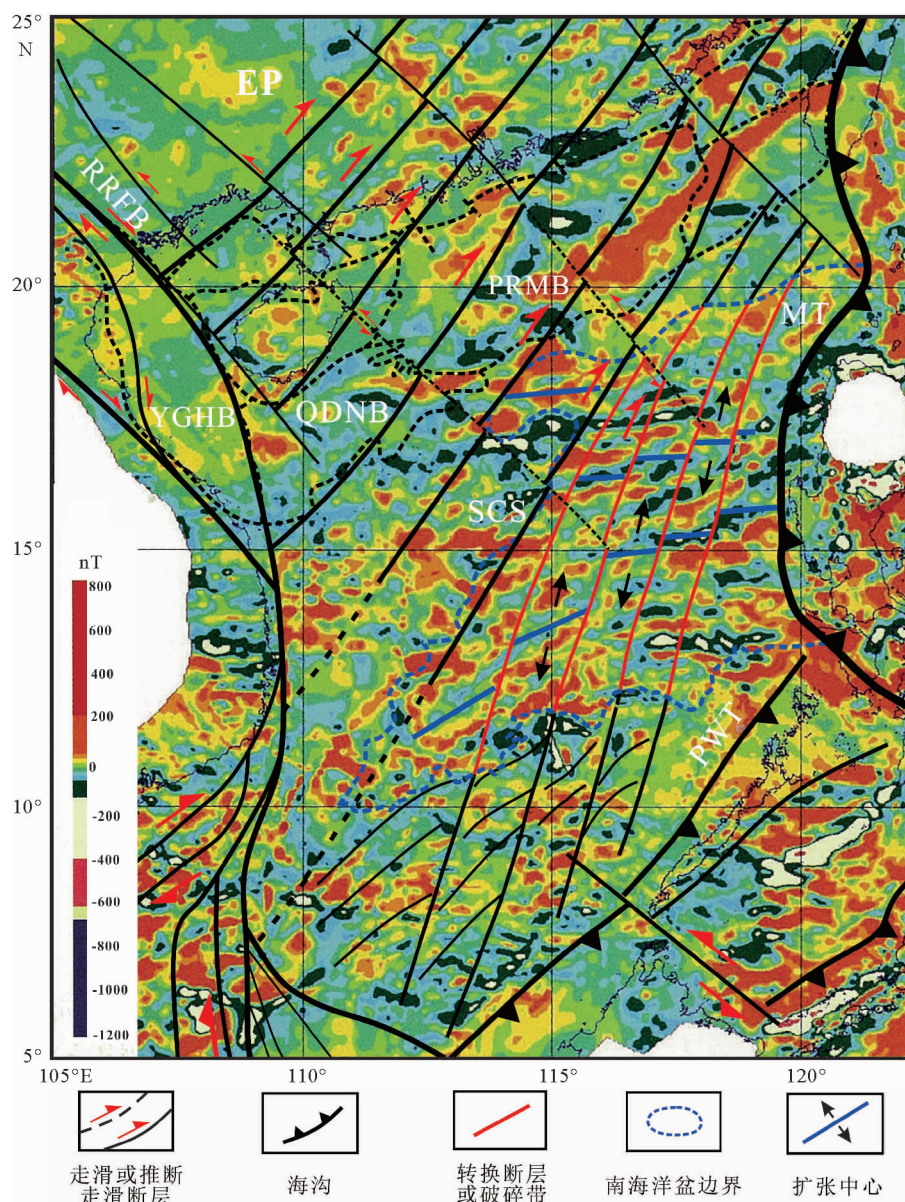


图 5 南海磁异常与断裂分布关系(磁力资料来自文献[43],简称缩写见图 4)

Fig. 5 Magnetic anomaly and fault distribution in the South China Sea (magnetic data from reference[43])

由于转换断层的存在,磁条带被整体错开,走向上不连续,沿走向每隔一段距离在其与转换断层的交点处会出现走向被截断或急剧的变化。相邻磁条带上距离最小的节点的连线的方位代表转换断层的方向,为 NNE 向(图 1 和 2),即南海海盆的扩张方向,也就是南海海盆转换断层的方向。NNE 向走滑断裂可能是这些转换断层前身,具有明显的右行平移的特点^[38]。

2.4 莫霍面埋深

深部地壳结构是探讨边缘海形成演化的“骨

架”,蕴含着南海海盆形成与演化的重要信息^[44]。南海莫霍面埋深主要是根据空间、布格重力异常数据反演,并结合地震测深结果约束计算得出的。

图 6 中可见,洋-陆转换带主要分布于莫霍面急剧变化的梯度带上,南海海盆是地壳厚度最薄的区域,南海西缘断裂穿过莫霍面的串珠状低值等厚线;同样,在南部北侧长轴状莫霍面等值线与 NNE 向断裂也具有良好的对应关系。洋盆中的海山,莫霍面埋深 10~12 km,多数沿着扩张中心或岩石圈断裂等构造薄弱带分布^[44],并在 NNE 向的岩石圈断裂两侧的莫霍面埋深多数存在至少 2 km 的落差。

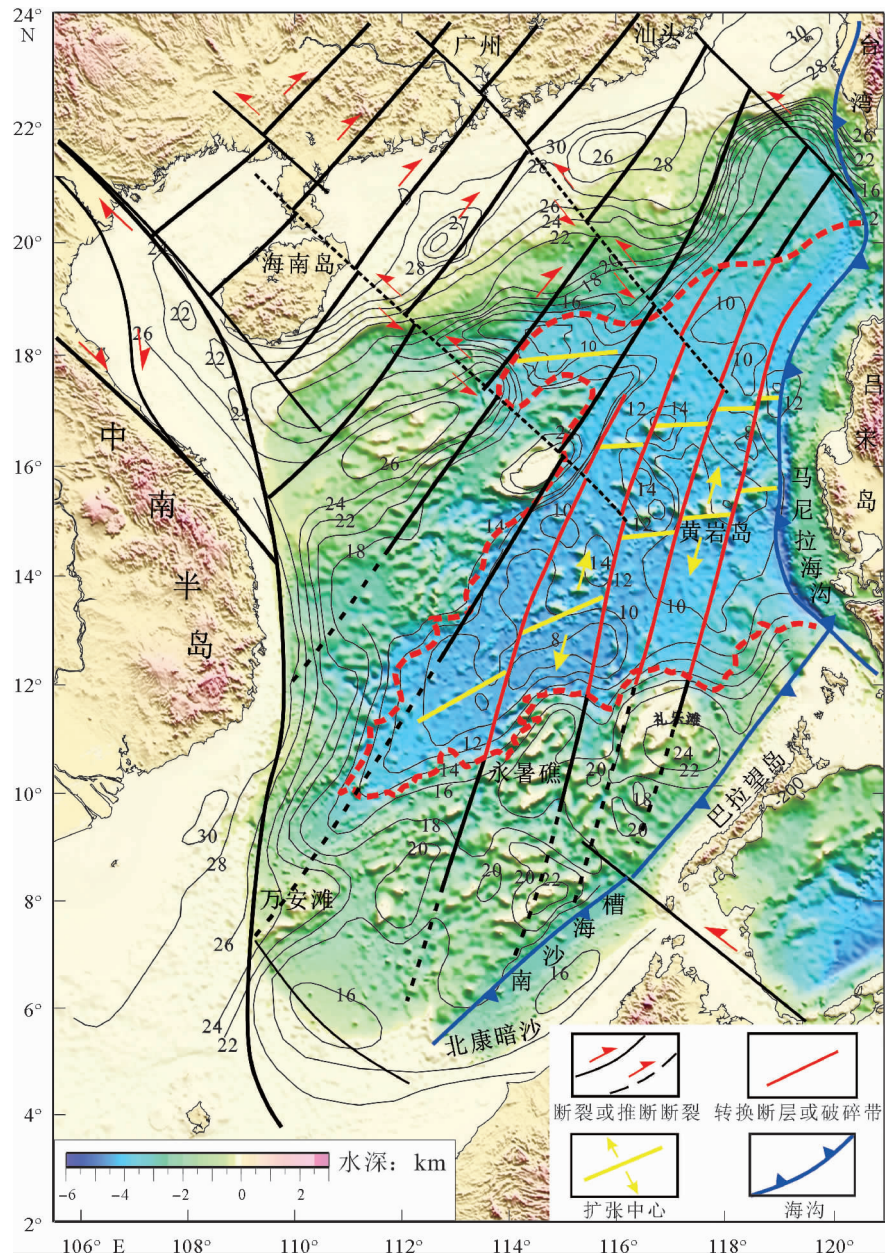


图 6 南海莫霍面埋深与断裂分布关系(据文献[44]修改,红虚线为南海海盆边界)

Fig. 6 The buried depth of Moho discontinuity and fault distribution in the South China Sea (revised from reference [44])

2.5 海底热流

海底热流与地球内部的热活动有关,也是揭示海底构造活动的一个重要指标。与海底热流自身特点相比,热流异常才是更为值得关注的重点,更能揭示构造活动特征。局部热流异常区在构造活动成因上的解释往往与断裂作用、岩浆活动等有关^[45],并且年青、活动的构造多为高热流异常。

从图 7 中可知,南部北部的热流呈 NNE 向带状分布,明显的受到 NNE 向断裂的控制,此外,多

数的似圆状高热流异常区被 NNE 向断裂穿过。在南海海盆区,热流值普遍偏高,总体也呈 NNE 向带状,与断裂的关系密切。海沟处则以低热流为特征。在南海其他区域,热流异常也多与张扭或剪切性质的断裂有关^[45,46]。

综上,NE 向线性构造带、NNE 向火山链、NNE 向重磁异常梯度带和串珠状异常、磁条带错段特征、莫霍面断差、NNE 向带状海底热流异常均表明南海海盆转换断层真正的方向为 NE—NNE 向。

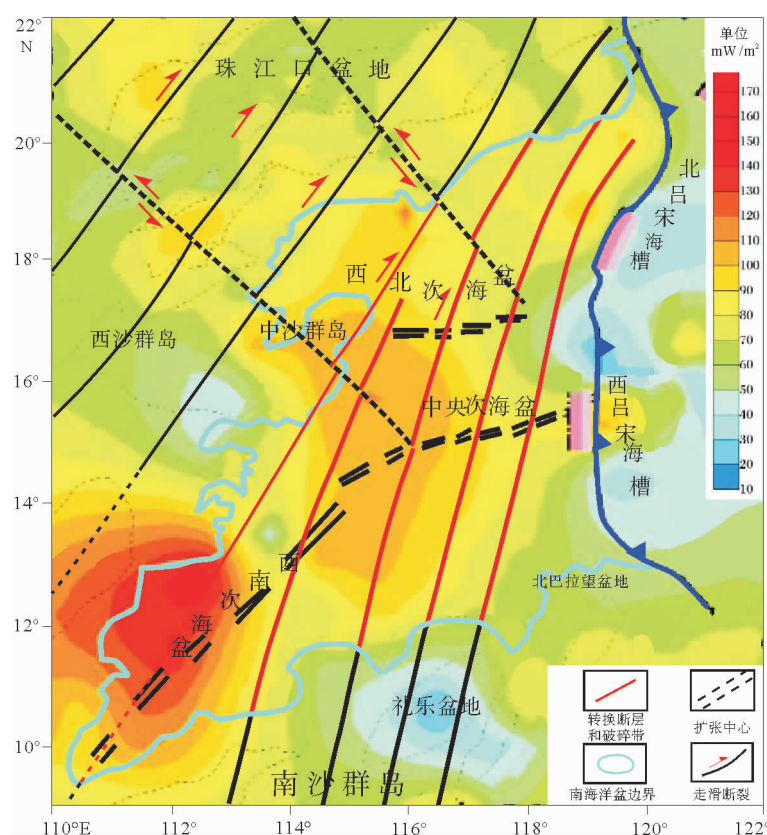


图 7 南海海底热流与断裂分布关系(据文献[45]修改)

Fig. 7 Submarine heat flow in the South China Sea and its relation with fault distribution (revised from reference[45])

3 南海海盆转换断层成因机制

3.1 南海扩张的两种主流模式

关于南海的扩张,重建方案多,且争议较大,现今有两种主流模式。

俯冲模式^[9,26]:古南海平板俯冲,拖曳作用导致南海扩张。古南海的存在,合理地解释了 Rajang-Crocker 增生杂岩的形成,并可以为南海打开提供空间。但这种模式也存在一些致命的问题,不能有效解释南海中央海盆近 E—W 向分布的磁条带(图 2),且古南海洋盆分布面积很小,其较小的俯冲量并不能使南海海盆打开^[47],不能解释与南海毗邻的东海陆架盆地同期发生的裂解^[48],不支持现今西太平洋广泛分布的边缘海可能具有统一的动力学机制。

碰撞-挤出模式^[35,49]:印度板块与欧亚板块碰撞,使走滑断裂带两侧的断块挤出-逃逸,左行走滑拉分作用促使南海扩张。但这种模式存在巨大的争议,物理模型和基本的理论依据都与事实不符。南海海盆是一个开口朝东的“V”字型,并不符合沿 NW 向红河断裂带左行拉分的机制^[48]。根据

⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年, Wang 等^[50]认为哀牢山-红河断裂带左行走滑发生于 27.15 Ma, 晚于南海打开的时间, 表明印支地块的挤出作用不可能是南海打开的真正原因。Dewey 等^[51]指出, 印度板块向欧亚板块楔入的效应主要以青藏高原的隆升而消耗巨大能量, 印支地块只有较短距离的走滑。

综上,这两种模式都不能合理地解释南海的打开与扩张过程。

3.2 南海 NNE 向断裂右行走滑拉分机制

23.5~16.5 Ma 期间,西南次海盆具有北东向磁条带,为 NW—SE 向扩张;东部次海盆具有近东西向的磁条带,为近 NS 向扩张。然而,南海海盆在同一个时间阶段、相似的动力学背景下如何能同时存在不同方向的两种应力场,即不可能是东部次海盆近 NS 向扩张的同时西南次海盆在 NW—SE 向扩张。另外,如果西南次海盆转换断层为 NW 向,那么洋中脊渐进式拓展如何突破 NW 向转换断层的约束而向 SW 方向生长,尚没有一个合理的解释^[38]。最近, Sibuet 等^[52]提出修正模式,认为还是存在两期扩张,扩张方向是变化的,早期扩张为 NNE 向;但后期扩张方向在中央、西南次海盆都统

一为 NW 向。

边缘海的几何形状不仅受到海盆内部小型断裂的约束,更由分布在海盆边缘处的大型断裂控制。南海呈 NE-SW 向展布的菱形(图 2),从简单的几何学和运动学角度,就很容易知道南海打开明显受到了 NNE 向断裂右行右阶走滑拉分作用的制约^[16],在成因机制上与日本海类似^[53]。右行走滑拉分作用具有东强西弱、东早西晚或北早南晚的趋势,剪切程度不同^[54]。那么,同一时期不同构造部位的这种差异性剪切就可以解释不同转换断层之间的磁条带走向的不一致性,同时也可以合理解释同一洋中脊段不同扩张时期磁条带走向的不一致性。这种右行走滑的拉分机制与南海北部陆架盆地华南地块晚白垩世盆地、以及东海陆架盆地的形成机制是一致的^[38]。

Jolivet 等^[55]研究发现,在日本海边缘的东缘和西南侧各存在一条巨型的右行走滑剪切带,走滑位移分别可达 400、200 km,东缘剪切强度远大于西南侧。两条走滑断裂带的活动时间为晚渐新世到中中新世,与日本海活动时间一致,且日本海盆就发育在东缘巨型走滑剪切作用而形成的一个引张区内。在日本海盆东缘剪切带和伸展区的交会点上,剪切应变速率可使岩石圈完全破裂而形成新的洋壳;其后,伸展区的大部分位移被洋壳的扩张所吸收^[56]。Tamaki^[57]据此总结认为,这种岩石圈被附近的巨型走滑剪切带强烈作用而撕裂,并进一步触发海底扩张的过程可能是边缘海盆地形成的一个普遍机制。

边缘海盆有着一套独立的扩张系统,与正常洋中脊类似,位于大洋与大陆之间,位置独特,构造背景复杂,容易受到俯冲大洋板块和大陆边缘整体构造格局的影响。事实上,正是由于受到周边板块构造格局的约束,南海海盆才不是正常洋中脊那样的正交扩张,而是类似于在红海、亚丁湾等处的斜向扩张,其真正的转换断层应该是 NNE 向,是华南地块上广泛分布的 NNE 向右行走滑大断裂在南海海盆的自然延伸。

东亚陆缘广泛分布有一系列的 NE—NNE 向走滑断裂,且在晚侏罗世—晚白垩世期间沿该断裂系发育了一个规模宏大、活动强烈的 NE—NNE 向安第斯型大陆岩浆弧,从鄂霍次克海到南海西北缘都发育了一套火山建造^[38,58]。印度-澳大利亚板块与欧亚板块的碰撞发生在该断裂带形成之后,故该断裂带形成的动力学可能起源于古太平洋板块向欧亚板块的 NW 或 NNW 向的强烈俯冲。NE—NNE 向走滑断裂在华南地块分布更为广泛,延伸可达几

百公里,属于岩石圈断裂,由东向西主要有 5 条主干断裂,分别是滨海断裂、长乐-南澳断裂、政和-大浦断裂、邵武-河源-阳江断裂和吴川-四会断裂(图 1)。因古太平洋板块早白垩世 NNW 或 NW 向俯冲,NE—NNE 向断裂系呈现出左行压扭的断裂性质^[59]。约 60 Ma,古太平洋板块完全俯冲消减于欧亚板块之下,同时太平洋板块启动向西的俯冲和随后俯冲后撤,同时印度板块北向楔入欧亚板块,其联合效应导致中国东部整体处于右行走滑拉分机制下,NE—NNE 向断裂性质由压扭变为张扭^[59-61]。至古近纪初,NNE 向走滑断裂带才表现出明显的张扭性,在东亚陆缘形成了一系列拉分盆地。

根据前文,南海北部、南海海盆、南海南部都广泛分布一系列延伸较长且平直的 NE—NNE 向右行走滑断层。王霄飞等^[22]发现华南地块 NE—NNE 向走滑断裂与南海北缘的 NE—NNE 向断裂走向一致,且断裂的地震震源机制解和构造地貌特征类似,可对比。Karig^[62]认为,在华南地块上分布的吴川-四会等深大断裂可以向南延伸至南海北缘。林长松等^[63]研究表明,在海南岛出露的 NE 向的花岗岩隆起是华南构造-岩浆作用在南海北部的体现,东沙隆起、中沙隆起和西沙隆起同样也是由 NE 向的断裂系所控制。程世秀等^[23]认为,滨海断裂带在走向上没有发生变化,延伸到南海北部变成了珠江口盆地和台西南盆地的边界断裂。地震剖面是进行断裂特征对比的最直观的工具。由分布在南海北缘陆架上的地震剖面可见(图 8),NE—NNE 向断裂系在断裂组合上呈负花状,指示张扭性的断裂性质,且向下切割中生代基底(T_7 界面),向上可延伸至第四系地层(T_1 界面以上)。这些特征与华南地块上的邵武-河源-阳江断裂带、长乐-南澳断裂带具有一致性,显示了它们在成因上的关联性^[22]。因此,NE—NNE 向断裂系是在统一的区域构造背景和动力学机制下发育的,南海北缘 NE—NNE 向断裂带是华南地块 NE—NNE 向走滑断裂系在海上的自然延伸。

渐新世之前,南海南部也位于华南大陆边缘,与南海北部的控盆断裂具有一致性。南海南部陆缘 NE—NNE 向走滑断裂在重磁异常特征上非常清晰,在地震剖面上揭示断裂切割至晚白垩世地层,与华南地块 NE—NNE 向断裂带具有一致性,是燕山期的 NE 向构造线的继承与发展^[27]。前述重磁异常(图 4 和 5),也揭示位于华南地块上的 NE—NNE 向断裂带自然延伸至南海北部陆坡,并穿过南海海

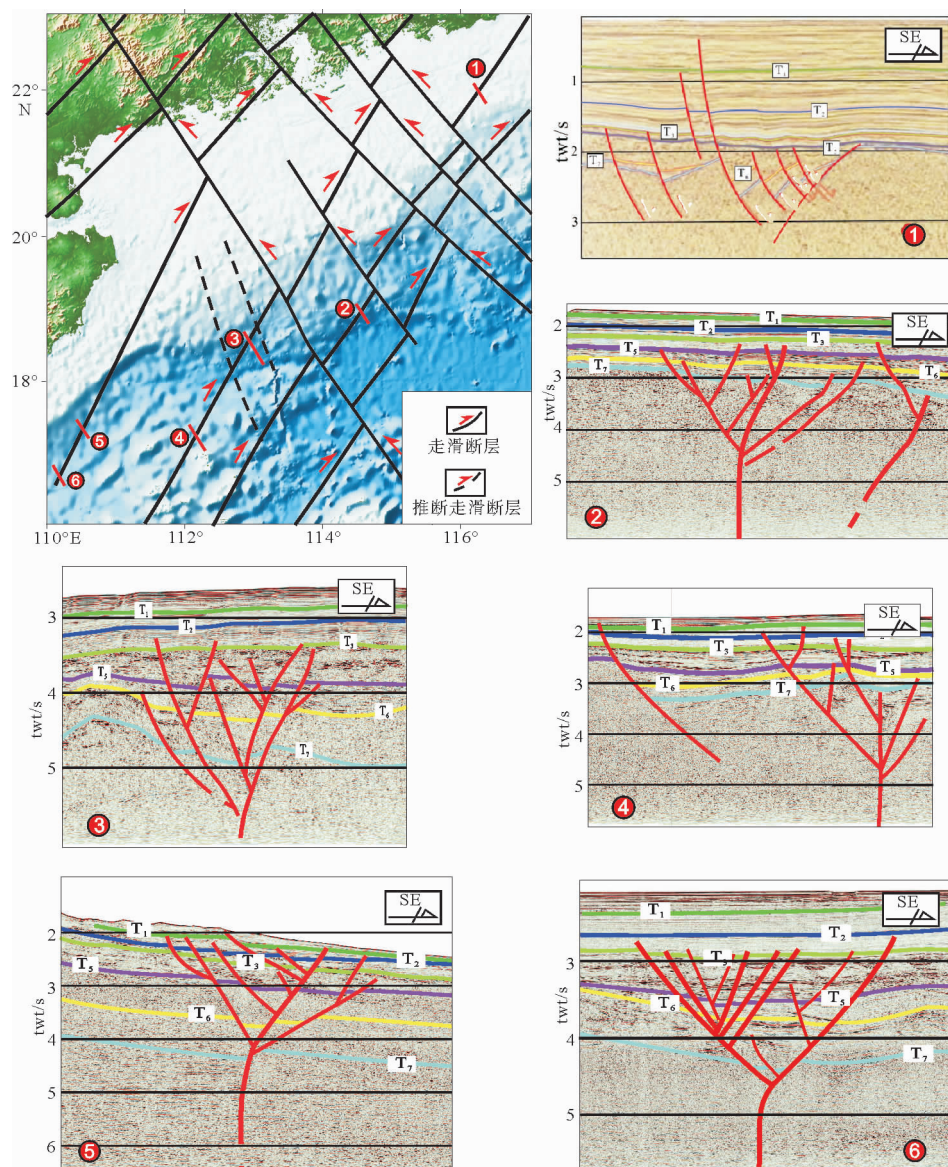


图 8 南海北部陆缘控盆走滑断裂及地震剖面(据文献[22]修改)

Fig. 8 Basin-controlling strike-slip faults on the northern continental margin of the South China Sea and seismic profiles (modified from reference[22])

盆,进一步延至南海南部。因此,分布范围广、延伸距离长、切割至莫霍面的 NE—NNE 向走滑断裂带可能控制了南海打开的过程,也就是南海海盆同扩张的转换断层。

边缘海盆扩张之前会经历长时间的裂解。早始新世,印度-澳大利亚板块与欧亚板块碰撞强烈;约 42 Ma,太平洋板块俯冲方向由 NNW 向转变为 NWW 向。这些因素都促使 NE—NNE 向断裂右行走滑作用的加强,导致岩石圈发生拉伸减薄以致裂解,南沙地块、中沙地块依次从华南地块裂离,并于早渐新世开启了南海扩张,直至中中新世转变为典型的被动陆缘特征。

与日本海相比,用右行走滑陆缘裂解模式来解

释南海打开的主要困难,在于其近南北向的东缘现今并没有出露大型右行走滑断裂带,而是马尼拉海沟^[48]。古地磁及板块重建表明,菲律宾群岛是沿走滑断裂从低纬度运移到现今位置的^[9],南海东缘的走滑断裂可能被后期菲律宾群岛仰冲而被破坏,或者随菲律宾海板块的向北迁移而俯冲消减于琉球海沟之下^[48]。Xu 等^[47]也同样指出在南海东缘曾经存在一个大型的右行走滑断裂。

本区另一组比较明显的断裂是 NW—NNW 向左行走滑断裂^[64],多数切割早期 NE—NNE 向断裂带,形成时间较晚,保存连续且容易识别,一般被认为是与后期菲律宾弧与华南大陆斜向碰撞、太平洋板块与欧亚板块交接转换区的巨型 NW 向走滑调

整有关,很容易被误认为是南海的转换断层。

综上,南海海盆转换断层实际上是 NNE 向,是南海中广泛分布的 NE—NNE 向右行走滑断层的一部分,也是华南大陆 NE—NNE 向走滑断裂带在海上的自然延续。印度板块与欧亚板块碰撞,重新启动和活化了先存的 NE—NNE 向右行走滑断层带,导致了南海的打开,并控制了南海海盆扩张过程,新生洋壳持续不断地沿着 NNE 向走滑断裂带生长,这些断层也就变成了南海海盆的转换断层。

4 板块重建:南海海盆转换断层成因的大地构造背景

根据上述初步的成果与认识,本文对前人的板块重建方案^[9,65]做出了修正。

早始新世是印度板块与欧亚板块相互作用最强烈的时期。西菲律宾海盆也约在此时开始其第一个阶段(50~40Ma)的快速扩张,并顺时针旋转约 50°^[9,66](图 9A)。约 45 Ma,古南海开始向南俯冲,并形成了一个从沙巴州、苏禄岛弧到吕宋岛弧的重要的活动大陆边缘。约 42 Ma,太平洋板块运动方

向由 NNW 向转变为 NWW 向^[61,67]。印度板块向北楔入欧亚板块在东亚陆缘产生的右旋应力场,太平洋板块始新世晚期开始向东俯冲后撤,欧亚板块东南缘在这种动力学背景下右行张扭应力场进一步发育,导致陆壳强烈裂解。此时南海北缘裂陷活动达到高峰,裂陷中心自西向东扩展^[67]。

渐新世时,礼乐-东北巴拉望地块开始从华南地块东南缘裂离,随后向南漂移^[68]。约 34 Ma,南海初始扩张(图 9B)。西菲律宾海盆约 33 Ma 停止扩张,洋中脊死亡,形成统一的菲律宾海板块^[65],随后快速向欧亚板块 NW 向运动。

早中新世是东亚陆缘构造格局发生最大转变时期^[69-71]。菲律宾海板块约于 25 Ma 开始第 2 个阶段的顺时针旋转。南海洋中脊在 25~23 Ma 期间跃迁,扩张中心从先前的 18°N 跃迁至现今的 15.5°N,开始西南次海盆的扩张^[38]。17 Ma 左右,古南海基本消亡^[54]。随后婆罗洲地块与南沙地块发生陆-陆碰撞,导致南海海盆约 16 Ma 突然停止扩张^[54,72],更大尺度上的原因可能是中中新世澳大利亚板块快速向北推移,与印度尼西亚火山岛弧俯冲-碰撞^[37,73]。随后南海海盆向东俯冲消减于吕宋岛

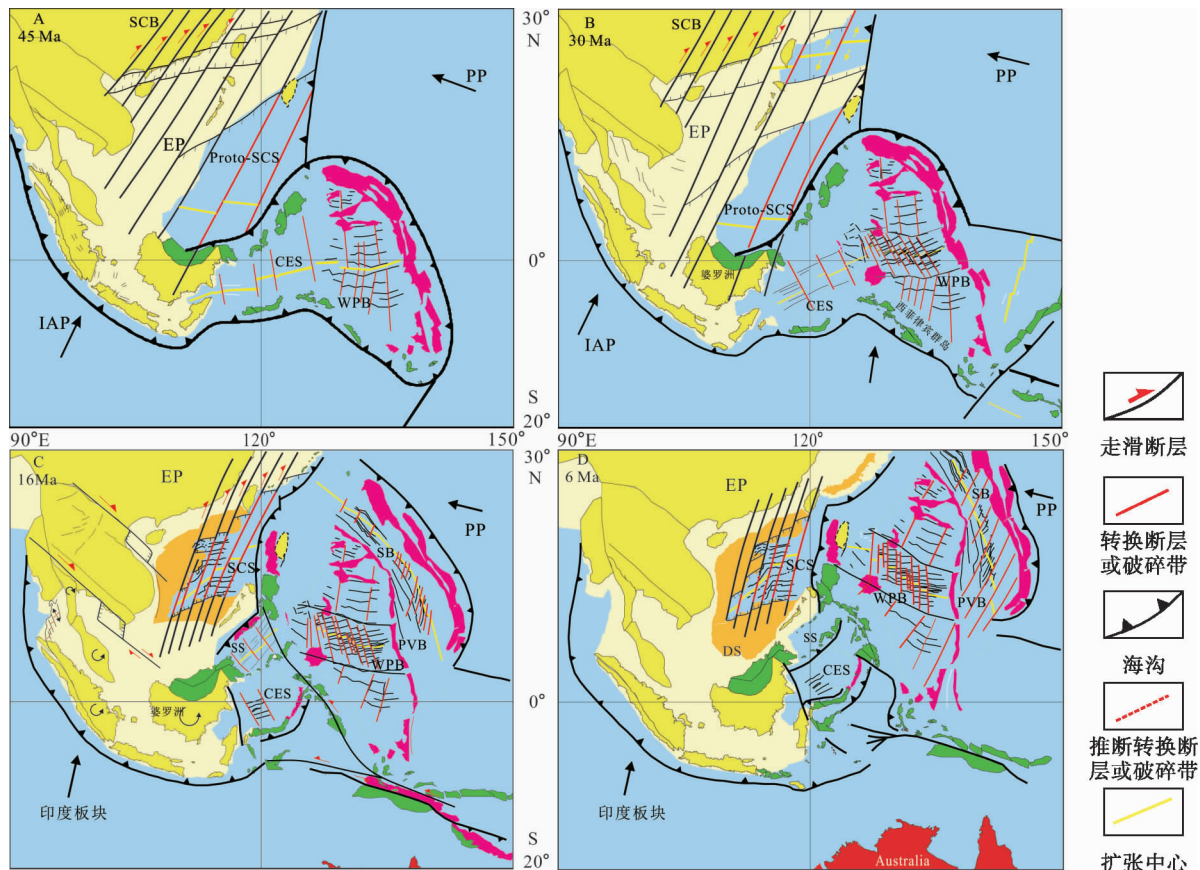


图 9 南海及周缘地区板块重建(据文献^[9, 15, 66]修改)

简称:PP, 太平洋板块;IAP, 印度-澳大利亚板块;Proto-SCS, 古南海;DS, 南沙地块,其他简称见图 1

Fig. 9 Plate reconstruction of the South China Sea and adjacent areas (revised from references^[9,15,66])

弧之下(图9C),形成了马尼拉海沟。

中新世末期或早上新世(图9D),菲律宾海板块相对于亚洲大陆边缘NNW向运动,西侧俯冲于菲律宾群岛之下,形成了菲律宾海沟^[65,70]。吕宋岛弧北端与欧亚大陆东南缘发生强烈的弧-陆碰撞,形成了现今的台湾岛^[74]。吕宋岛弧沿着台湾纵谷断裂NNW向与欧亚大陆平移拼贴,在台湾地区形成了NNE向展布的中部造山带^[30]。冲绳海槽于2 Ma弧后扩张^[10],形成现今的板块构造格局。

5 结论

基于高分辨率海底构造地貌、重磁异常、磁条带分布样式、海底热流、莫霍面等资料对比,并结合区域地质背景、动力学来源,本文重新厘定了南海海盆的转换断层分布,从其走向的角度入手,提出了边缘海扩张的新模式,并修正了前人对东亚陆缘新生代的板块重建方案。南海扩张,可能为继承邻区裂解陆缘走滑断层方位的模式。南海海盆真正的转换断层方向应该是NNE向,并不是NW向。NNE向转换断层实际上是继承了在南海北部陆架上广泛发育的NNE向大型右行走滑断裂,同时也是华南地块上一系列NNE向的右行走滑断裂在海上的自然延伸。该模式下,转换断层可以不垂直于扩张中心,边缘海发生斜向扩张。

参考文献(References)

- [1] Püthe C, Gerya T. Dependence of mid-ocean ridge morphology on spreading rate in numerical 3-D models[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 270-283.
- [2] Gerya T. Origin and models of oceanic transform faults[J]. *Tectonophysics*, 2012, 522-523: 34-54.
- [3] Gerya T. Dynamical instability produces transform faults at mid-ocean ridges[J]. *Science*, 2010, 329(5995): 1047-1050.
- [4] 蔡乾忠. 特提斯与海相油气——开拓我国海域油气新领域[J]. *海洋地质前沿*, 1999(7): 1-4, 7. [CAI Qianzhong. Tethys and marine hydrocarbon: To develop new offshore oil and gas in China[J]. *Frontiers of Marine Geology*, 1999(7): 1-4, 7.]
- [5] 张光学, 梁金强, 陆敬安, 等. 南海东北部陆坡天然气水合物藏特征[J]. *天然气工业*, 2014, 34(11): 1-10. [ZHANG Guangxue, LIANG Jinqiang, LU Jing'an, et al. Characteristics of natural gas hydrate reservoirs on the northeastern slope of the South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(11): 1-10.]
- [6] Packham G H, Falvey D A. An hypothesis for the formation of marginal sea in the Western Pacific[J]. *Tectonophysics*, 1971, 11(2): 79-109.
- [7] Sleep N, Toks? z M N. Evolution of marginal basins[J]. *Nature*, 1971, 233(5321): 548-550.
- [8] Deschamps A, Lallemand S. The West Philippine Basin: An Eocene to early Oligocene back arc basin opened between two opposed subduction zones[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B12): EPM 1-1-EPM 1-24.
- [9] 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 Sciences*, 2002, 20(4): 353-431.
- [10] Liu B, Li S Z, Suo Y H, et al. The geological nature and geodynamics of the Okinawa Trough, Western Pacific[J]. *Geological Journal*, 2016, 51(S1): 416-428.
- [11] Zhang Y, Li S Z, Suo Y H, et al. Origin of transform faults in back-arc basins: Examples from Western Pacific marginal seas[J]. *Geological Journal*, 2016, 51(S1): 490-512.
- [12] 李三忠, 赵淑娟, 刘鑫, 等. 洋-陆转换与耦合过程[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2014, 44(10): 113-133, 160. [LI Sanzhong, ZHAO Shujuan, LIU Xin, et al. Processes of ocean-continent transition and coupling [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(10): 113-133, 160.]
- [13] Liao J, Gerya T. From continental rifting to seafloor spreading: Insight from 3D thermo-mechanical modeling [J]. *Gondwana Research*, 2015, 28(4): 1329-1343.
- [14] Honza E. Spreading mode of backarc basins in the western Pacific[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1-4): 139-152.
- [15] 石学法, 鄢全树. 西太平洋典型边缘海盆的岩浆活动[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(7): 737-750. [SHI Xuefa, YAN Quanshu. Magmatism of typical marginal basins (or Back-Arc Basins) in the West Pacific[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(7): 737-750.]
- [16] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的盆地群与盆地动力学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 55-78. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, LIU Xin, et al. Basin dynamics and basin groups of the South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 55-78.]
- [17] Arrajehi A, McClusky S, Reilinger R, et al. Geodetic constraints on present-day motion of the Arabian Plate: Implications for Red Sea and Gulf of Aden rifting[J]. *Tectonics*, 2010, 29(3): TC3011.
- [18] Bellahsen N, Faccenna C, Funicello F, et al. Why did Arabia separate from Africa? Insights from 3-D laboratory experiments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 216(3): 365-381.
- [19] Niu Y L, Liu Y, Xue Q Q, et al. Exotic origin of the Chinese continental shelf: New insights into the tectonic evolution of the western Pacific and eastern China since the Mesozoic[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(18): 1598-1616.
- [20] 王洪才, 李三忠, 刘鑫, 等. 南海北部陆缘盆地群新生代构造过程与油气运聚规律[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(1): 73-82. [WANG Hongcai, LI Sanzhong, LIU Xin, et al. Cenozoic geological processes and their bearing on hydro-

- carbon migration and accumulation in the continental marginal basin group of the northern South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2013, 33(1): 73-82.]
- [21] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea Basin[M]//Hayes D E. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands; Part 2*. Washington DC: American Geophysical Union, 1983: 23-56.
- [22] 王霄飞, 李三忠, 龚跃华, 等. 南海北部活动构造及其对天然气水合物的影响[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2014, 44(2): 419-431. [WANG Xiaofei, LI Sanzhong, GONG Yuehua, et al. Active tectonics and its effects on gas-hydrates in northern South China Sea[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(2): 419-431.]
- [23] 程世秀, 李三忠, 索艳慧, 等. 南海北部新生代盆地群构造特征及其成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 79-93. [CHENG Shixiu, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Cenozoic tectonics and dynamics of basin groups of the Northern South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 79-93.]
- [24] 龚再升, 李思田. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 326-328. [GONG Zaisheng, LI Sitian. *Dynamic Research of Oil and Gas Accumulation in Northern Marginal Basins of South China Sea*[M]. Beijing: Science Press, 2004: 326-328.]
- [25] 张丙坤, 李三忠, 夏真, 等. 南海北部深水新生代岩浆岩分布规律及其与海底地质灾害的相关性[J]. *海洋学报*, 2014, 36(11): 90-100. [ZHANG Bingkun, LI Sanzhong, XIA Zhen, et al. Distribution of Cenozoic igneous rocks and its relation to submarine geological hazards in the deepwater area of the northern South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(11): 90-100.]
- [26] Holloway N H. North Palawan block, Philippines; its relation to Asian mainland and role in evolution of South China Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66(9): 1355-1383.
- [27] 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]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 113-127.]
- [28] 王学斌. 古南海与南海海盆的构造演化关系[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2015: 45-50. [WANG Xuebin. *The relationship of tectonic evolution between the Proto-South China Sea and the South China Sea Basin*[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2015: 45-50.]
- [29] 安慧婷, 李三忠, 索艳慧, 等. 南海西部新生代控盆断裂及盆地群成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 95-111. [AN Huiting, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Basin-controlling faults and formation mechanism of the Cenozoic basin groups in the western South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 95-111.]
- [30] 薛友辰, 李三忠, 刘鑫, 等. 南海东部俯冲系统分段性及相关盆地群成盆动力学机制[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 129-147. [XUE Youchen, LI Sanzhong, LIU Xin, et al. Segmentation of subduction system in the Eastern South China Sea and dynamics of related basin groups[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 129-147.]
- [31] 梁裕扬, 李家彪, 李守军, 等. 西南印度洋脊中段 Indomed-Gallieni 洋中脊岩浆-构造动力模式[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(9): 2993-3005. [LIANG Yuyang, LI Jiabiao, LI Shoujun, et al. The Magmato-tectonic dynamic model for the Indomed-Gallieni segment of the central southwest Indian ridge[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(9): 2993-3005.]
- [32] 李三忠, 索艳慧, 余珊, 等. 西南印度洋构造地貌与构造过程[J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39(1): 15-29. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, YU Shan, et al. Morphotectonics and tectonic processes of the Southwest Indian Ocean[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2015, 39(1): 15-29.]
- [33] 李家彪, 金翔龙, 高金耀. 南海东部海盆晚期扩张的构造地貌研究[J]. *中国科学 D 辑*, 2002, 32(3): 239-248. [LI Jiabiao, JIN Xianglong, GAO Jinyao. Morpho-tectonic study on late-stage spreading of the Eastern Subbasin of South China Sea[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, 45(11): 978-989.]
- [34] 李春峰, 宋陶然. 南海新生代洋壳扩张与深部演化的磁异常记录[J]. *科学通报*, 2012, 57(20): 1879-1895. [LI Chunfeng, SONG Taoran. Magnetic recording of the Cenozoic oceanic crustal accretion and evolution of the South China Sea basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(24): 3165-3181.]
- [35] 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]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(B4): 6299-6328.
- [36] 陈洁, 温宁. 南海地球物理图集[M]. 北京: 科学出版社, 2010. [CHEN Jie, WEN Ning. *The South China Sea Geophysical Atlas*[M]. Beijing: Science Press, 2010.]
- [37] Hui G G, Li S Z, Guo L L, et al. Source and accumulation of gas hydrate in the northern margin of the South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 69: 127-145.
- [38] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的基本构造特征与成因模型: 问题与进展及论争[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 35-53. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, LIU Xin, et al. Basic structural pattern and tectonic models of the South China Sea: Problems, advances and controversies[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 35-53.]
- [39] Franke D, Savva D, Pubellier M, et al. The final rifting evolution in the South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 704-720.
- [40] Hui G G, Li S Z, Li X Y, et al. Temporal and spatial distribution of Cenozoic igneous rocks in the South China Sea and its adjacent regions; Implications for tectono-magmatic evolution[J]. *Geological Journal*, 2016, 51(S1): 429-447.

- [41] 张汉泉, 吴庐山. 南海南部海域构造地貌[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(1): 63-70. [ZHANG Hanquan, WU Lushan. Tectonic landform in the south of the South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2005, 25(1): 63-70.]
- [42] 马云, 李三忠, 刘鑫, 等. 华南北部湾盆地的形成机制[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(6): 1727-1736. [MA Yun, LI Sanzhong, LIU Xin, et al. Formation mechanism of the Beibuwan Basin, South China Sea[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2014, 44(6): 1727-1736.]
- [43] 朱伟林, 米立军, 张厚和, 等. 中国海域含油气盆地图集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010. [ZHU Weilin, MI Lijun, ZHANG Houhe, et al. Atlas of Oil and Gas Basin, China Sea[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.]
- [44] 赵明辉, 丘学林, 徐辉龙, 等. 南海南部深地震探测及南北共轭陆缘对比[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2011, 36(5): 823-830. [ZHAO Minghui, QIU Xuelin, XU Huilong, et al. Deep seismic surveys in the southern South China Sea and contrast on its conjugate margins[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(5): 823-830.]
- [45] 张功成, 朱伟林, 米立军, 等. “源热共控论”: 来自南海海域油气田“外油内气”环带有序分布的新认识[J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 987-1005. [ZHANG Gongcheng, ZHU Weilin, MI Lijun, et al. The theory of hydrocarbon generation controlled by source rock and heat from circle distribution of outside-oil fields and inside-gas fields in South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 987-1005.]
- [46] 施小斌, 丘学林, 夏献原, 等. 南海热流特征及其构造意义[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(2): 63-73. [SHI Xiaobin, QIU Xuelin, XIA Kanyuan, et al. Heat flow characteristics and its tectonic significance of South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(2): 63-73.]
- [47] Xu J Y, Ben-Avraham Z, Kelty T, et al. Origin of marginal basins of the NW Pacific and their plate tectonic reconstructions[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 130: 154-196.
- [48] 周蒂, 陈汉宗, 吴世敏, 等. 南海的右行陆缘裂解成因[J]. 地质学报, 2002, 76(2): 180-190. [ZHOU Di, CHEN Hanzong, WU Shimin, et al. Opening of the South China Sea by dextral splitting of the East Asian continental margin[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(2): 180-190.]
- [49] Zou H B, Zindler A, Xu X S, et al. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: Mantle sources, regional variations, and tectonic significance[J]. Chemical Geology, 2000, 171(1-2): 33-47.
- [50] Wang P L, Lo C H, Chung S L, et al. Onset timing of left-lateral movement along the Ailao Shan—Red River Shear Zone: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating constraint from the Nam Dinh Area, northeastern Vietnam[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18(3): 281-292.
- [51] Dewey J F, Cande S, Pitman W C. Tectonic evolution of the India Eurasia collision zone[J]. Eclogae Geologicae Helvetiae, 1989, 82(3): 717-734.
- [52] Sibuet J C, Yeh Y C, Lee C S. Geodynamics of the South China Sea[J]. Tectonophysics, 2016, 692: 98-119.
- [53] Yin A. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis[J]. Tectonophysics, 2010, 488(1-4): 293-325.
- [54] 王鹏程, 李三忠, 郭玲莉, 等. 南海打开模式: 右行走滑拉分与古南海俯冲拖曳[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 294-319. [WANG Pengcheng, LI Sanzhong, GUO Lingli, et al. Opening of the South China Sea(SCS): A joint effect of dextral strike-slip pull-apart and proto-SCS slab pull[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 294-319.]
- [55] Jolivet L, Tamaki K, Fournier M. Japan Sea, opening history and mechanism: A synthesis[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(B11): 22237-22259.
- [56] 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[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 203-213. [REN Jianye, LI Sitian. Spreading and dynamic setting of marginal basins of the western Pacific[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 203-213.]
- [57] Tamaki K. Opening Tectonics of the Japan Sea[M]//Taylor B. Backarc Basins. Boston, MA: Springer, 1995: 407-420.
- [58] 李三忠, 张勇, 郭玲莉, 等. 那丹哈达地体及周缘中生代变形与增生造山过程[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 200-212. [LI Sanzhong, ZHANG Yong, GUO Lingli, et al. Mesozoic deformation and accretionary orogenic processes around the Nandanhada Terrane[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 200-212.]
- [59] 索艳慧, 李三忠, 曹现志, 等. 中国东部中生代反转构造及其记录的大洋板块俯冲过程[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 249-267. [SUO Yanhui, LI Sanzhong, CAO Xianzhi, et al. Mesozoic-Cenozoic inversion tectonics of East China and its implications for the subduction process of the oceanic plate[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 249-267.]
- [60] Maruyama S, Hasegawa A, Santosh M, et al. The dynamics of big mantle wedge, magma factory, and metamorphic-metasomatic factory in subduction zones[J]. Gondwana Research, 2009, 16(3-4): 414-430.
- [61] 索艳慧, 李三忠, 戴黎明, 等. 东亚及其大陆边缘新生代构造迁移与盆地演化[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2602-2618. [SUO Yanhui, LI Sanzhong, DAI Liming, et al. Cenozoic tectonic migration and basin evolution in East Asia and its continental margins[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2602-2618.]
- [62] Karig D E. Origin and development of marginal basins in the western Pacific[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76(11): 2542-2561.
- [63] 林长松, 虞夏军, 何拥华, 等. 南海海盆扩张成因质疑[J]. 海洋学报, 2006, 28(1): 67-76. [LIN Changsong, YU Xiajun, HE Yonghua, et al. Question on the spreading of the South China Sea Basin[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(1): 67-76.]
- [64] Yeh Y C, Sibuet J C, Hsu S K, et al. Tectonic evolution of the Northeastern South China Sea from seismic interpretation[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(B6):

- B06103.
- [65] Honza E, Fujioka K. Formation of arcs and backarc basins inferred from the tectonic evolution of Southeast Asia since the Late Cretaceous[J]. *Tectonophysics*, 2004, 384(1-4): 23-53.
- [66] Hall R. Reconstructing Cenozoic SE Asia[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1996, 106(1): 153-184.
- [67] 李三忠, 余珊, 赵淑娟, 等. 东亚大陆边缘的板块重建与构造转换[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(3): 65-94. [LI Sanzhong, YU Shan, ZHAO Shujuan, et al. Tectonic transition and plate reconstructions of the East Asian continental margin[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2013, 33(3): 65-94.]
- [68] 姚伯初, 万玲, 吴能友. 大南海地区新生代板块构造活动[J]. *中国地质*, 2004, 31(2): 113-122. [YAO Bochu, WAN Ling, WU Nengyou. Cenozoic plate tectonic activities in the Great South China Sea area[J]. *Geology in China*, 2004, 31(2): 113-122.]
- [69] Sdrolias M, Roest W R, Müller R D. An expression of Philippine Sea plate rotation: the Parece Vela and Shikoku Basins[J]. *Tectonophysics*, 2004, 394(1-2): 69-86.
- [70] Hall R, Ali J R, Anderson C D, et al. Origin and motion history of the Philippine Sea Plate[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1-4): 229-250.
- [71] Hall R, Ali J R, Anderson C D. Cenozoic motion of the Philippine Sea Plate: Palaeomagnetic evidence from eastern Indonesia[J]. *Tectonics*, 1995, 14(5): 1117-1132.
- [72] 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——中国地质大学学报*, 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——Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(3): 435-447.]
- [73] 黄奇瑜, 闫义, 赵泉鸿, 等. 台湾新生代层序: 反映南海张裂, 层序和古海洋变化机制[J]. *科学通报*, 2012, 57(20): 1842-1862. [HUANG Qiyu, YAN Yi, ZHAO Quanhong, et al. Cenozoic stratigraphy of Taiwan: Window into rifting, stratigraphy and paleoceanography of South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(24): 3130-3149.]
- [74] Sibuet J C, Hsu S K, Le Pichon X, et al. East Asia plate tectonics since 15 Ma: Constraints from the Taiwan region[J]. *Tectonophysics*, 2002, 344(1-2): 103-134.

ORIGIN OF TRANSFORM FAULTS IN SOUTH CHINA SEA AND ITS IMPLICATIONS FOR SOUTH CHINA SEA SPREADING

ZHANG Yong^{1,2,3}, REN Zhijun¹, GE Haiming¹, WANG Guangzhe⁴,
LI Sanzhong^{2,3}, GUO Lingli^{2,3}, WANG Pengcheng^{2,3}

(1. Jiangsu Province Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China;

2. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, College of Marine Geosciences,
Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;

4. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: Transform faults are the keys to reveal the evolution of marginal seas. However, the mechanism of their formation remains a puzzle and hotspot in geosciences. Based on high-resolution tectonomorphology, basin geometry, gravity and magnetic anomalies, magnetic lineation pattern, Moho contours, submarine heat flow, and seismic profiles in the Northern South China Sea, together with studies of regional geological settings, plate reconstruction and geodynamic analysis, this paper tries to redefine the spatial distribution pattern of transform faults in the SCS and strike-slip faults in adjacent areas. Our data suggests that transform faults and strike-slip faults are in general in NNE-trending in the SCS. Therefore, a new model of marginal sea spreading is proposed against the previous Cenozoic plate movement models concerning the East Asian Continental Margin and SCS, which believed that the strike of transform faults was NW. The NNE-trending transform faults in the SCS may be the ones inherited from the strike-slip faults at the rifting continental margin. They are actually part of the large-scale NNE-trending dextral strike-slip faults distributed in the continental shelf of the SCS. Therefore, they could be treated as the natural extension of the NNE-trending strike-slip faults in the South China Block. They are not analogous to the positive expansion of the normal mid-ocean ridge, but a kind of oblique spreading. They are not perpendicular to the spreading axis.

Key words: transform fault; dextral strike-slip fault; plate reconstruction; South China Sea