

doi: 10.12097/gbc.2022.11.039

北康盆地基底构造特征及其对南海南部构造演化的启示

徐俊杰¹, 佟殿君^{2*}, 高圆圆²

XU Junjie¹, TONG Dianjun^{2*}, GAO Yuanyuan²

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205;

2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074

1. Wuhan Center, China Geological Survey(Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China;

2. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China

摘要:南海南部是研究东南亚地区构造演化的关键场所,以构造相对简单的北康盆地为基础探讨其构造演化过程。为了确定研究区的构造特征,进行了地震综合解释、主控断层的定性、定量分析和盆地之下的岩石圈伸展因子分析。通过构造分析,发现北康盆地 15.5 Ma 界面(MMU)之下发育了多条大规模、低角度的拆离断层,界面之下的原型盆地为裂陷盆地,并且局部可表现为拆离盆地,符合被动大陆边缘细颈化带内的构造特征。对北康盆地构造演化过程进行分析并将其与曾母盆地进行对比,发现 2 个盆地的构造演化特征迥然不同,据此重新将南海南部挤出-逃逸构造区和古南海俯冲-拖曳构造区之间的分界线确定为西巴拉姆线。结合南海南、北部的陆缘盆地基底卷入构造的发育特征发现,南海陆缘岩石圈在发生破裂后,应变的集中主要体现在靠近洋壳的细颈化带和远端带部位,远离洋壳地区的应变受海底扩张的影响较小,这一特征可能与被动陆缘岩石圈的近端和远端在拉伸过程中的解耦相关。

关键词:北康盆地;构造特征;南海南部;构造演化;拉伸应变;动力变形分区

中图分类号: P71; P722.7; P736.15 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)09-1607-13

Xu J J, Tong D J, Gao Y Y. Features of the basement-involved structure in the Beikang Basin and their implication for the tectonic evolution of the southern South China Sea. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(9): 1607–1619

Abstract: Southern South China Sea, where abundant geological information and hydrocarbon preserved, is the key to figure out the tectonic evolution of Southeast Asia. The southern South China Sea has been attracting attentions because of that. However, tectonic framework of southern South China Sea is complex, which hinders the researches on it. The Beikang Basin locates in the southern South China Sea. The basement-involved structures in the Beikang Basin are relatively simple, which can be a key to the evolution of the southern South China Sea. Seismic interpretation, qualitative and quantitative analysis of faults and the extensional factor analysis of lithosphere are used to analyze the structural characteristics of the basin. Analysis suggests that the prototype of the lower Beikang Basin is rift basin, locally detachment basin, bounded by the Saba Orogeny unconformity. The prototype basin of this section is rifted basin. The basin locates in the thinning zone of the passive continental margin. The formation of the rift basin is mainly related to the pull of the subducted proto-South China Sea. The entirely different evolutionary histories of the Zengmu Basin and Beikang Basin testify the existent of the West Baram Line and suggest new division of geodynamic provinces for the South China Sea. The area was divided by the West Baram Line into collision-extrusion basin group and proto-South China Sea slab pull basin group. The strike-slip of the line began at Late Eocene and ended at latest Early Miocene. Comparisons between basement-involved structures in the southern

收稿日期: 2022-11-28; 修订日期: 2023-03-30

资助项目: 国家自然科学基金面上项目《南海南部陆缘中新世不整合地质属性研究——对南海扩张停止机制的约束》(批准号: 42172125)

作者简介: 徐俊杰(1988-), 男, 博士, 工程师, 从事沉积盆地动力学、海洋地质和地球物理的研究工作。E-mail: m13554408248@163.com

* 通信作者: 佟殿君(1979-), 男, 博士, 副教授, 从事大陆边缘盆地动力学方面的研究工作。E-mail: tdj7901@126.com

and northern South China Sea reveal that deformation concentration towards the oceanic crust can only be found in necking zone and distal zone of the South China Sea margin, while deformations away from the ocean are rarely affected by seafloor spreading. The variety of extensional tectonics perpendicular to the passive margin may be associated with the decoupling between the proximal and distal margin before seafloor spreading.

Key words: Beikang Basin; tectonic characteristics; southern South China Sea; tectonic evolution; extensional deformation; tectonic province division

南海南部陆缘保留了包括印支地块向南挤出(Liu et al., 2015)、澳大利亚向北楔入(Zahirovic et al., 2016)、南海共轭大陆边缘张裂到洋盆扩张(Li et al., 2015; 梁光河等, 2024)、古南海俯冲(Hall et al., 2017)、沙捞越造山(赵帅等, 2019), 以及沙巴造山(Menier et al., 2017)等在内的关键地质信息, 对南海乃至整个东南亚地区的构造演化研究都有重要意义。南海南部被廷贾线、西巴拉姆线、卢帕尔线等多条动力边界分割为巽它地块、曾母地块、南沙地块、婆罗洲地块等多个地块(Metcalf, 2011; Zahirovic et al., 2014; Hall et al., 2015), 并经历了多次重要构造运动, 导致南海南部的盆地群构造演化过程十分复杂(Wang et al., 2016)。本文以结构相对简单的北康盆地构造为切入点, 在其盆地动力学分析的基础上, 探索南海南部被动陆缘的构造演化过程。

自 20 世纪 80 年代 ODP103 航次在大西洋的伊比利亚被动陆缘钻遇剥露地幔岩石后, 洋陆转换带(ocean-continent transition, 缩写为 OCT)相继在世界各地被发现, 包括与伊比利亚共轭的纽芬兰被动陆缘(Sandoval et al., 2019)、南大西洋(Bruno et al., 2017)、澳大利亚大陆边缘(Williams et al., 2018)和南海南部(Zhang et al., 2020)、北部的被动大陆边缘(Ye et al., 2020)等。南海南部陆缘是南海的上盘边缘(任建业等, 2015a; Bai et al., 2020), 北康盆地位于该陆缘的加里曼丹岛以西(图 1)。关于该盆地的形成, Savva et al. (2014)基于地震剖面解释发现南海南部的东纳土纳盆地(包含北康盆地和部分曾母盆地)之下的地壳厚度介于 7~23 km 之间, 基于此, 将其划分到“强烈减薄带”, 并认为其是拆离盆地, 受控于古南海俯冲拖曳。然而, 许多研究(段亮等, 2018; 唐武, 2018; 雷振宇等, 2020)表明, 北康盆地更符合被动陆缘近端带的普通伸展盆地的构造特征。Madon et al. (2013)将曾母盆地和北康盆地作为一个整体进行研究, 提出北康盆地“下部深水复理石沉积, 上部浅水磨拉石沉积”的二元结构特征, 并认为北康盆地自始

新世古南海向南俯冲开始便一直属于前陆盆地类型, 其形成始终受控于古南海俯冲和沙捞越造山和沙巴造山。

1 主控断层的几何学特征

北康盆地发育 NW、NE 及 NS 三种走向的主干断层, 其中 NE 向的断层最发育, 控制了北康盆地的主体结构。为了便于分析, 本文将北康盆地主要断层编号 1~6 号。在平面上, 盆地基底内的断层规模通常较大, 其中 3 号断层和 4 号断层规模最大, 3 号断层的延伸长度最大可达 350 km 以上。3 号断层和 4 号断层可以分为 NE 走向和近 EW 走向的 2 段, 其中, 多条 NE 走向的大断层和次级断层的南西段向南汇入到 3 号断层的西段, 3 号断层的西侧也有次级断层汇入(图 2)。盆地基底内的其他主干断层和次级断层主要表现为 NE 走向, 规模相对 3 号和 4 号断层较小(图 2)。这些断层总体体现了 NNW—SSE 方向的拉伸应力作用, 这与南海同一时期的主应力场方向一致。

本文使用的数据来自广州海洋地质调查局 2010 年处理的地震剖面。根据地震剖面上的截止反射特征、钻井资料标定, 以及与大量国外钻井标定的曾母盆地地震剖面进行地层对比, 在北康盆地新生代地层内共划分了 2.6 Ma、5.5 Ma、10.5 Ma、15.5 Ma、23 Ma、32 Ma、43 Ma 等多个地层界面(图 3)。15.5 Ma 界面是沙巴造山运动的响应界面, 其在南海海域部分为中中新世不整合界面, 即 MMU。该界面出现在整个南海南部和西部, 界面上下表现出明显的构造变革特征: 在地震剖面上, 大部分基底卷入断层向上终止于该界面, 界面下部出现削截反射, 上部出现上超反射特征, 界面上下不整合特征明显。

在地震剖面上, 这些断层主要呈上陡下缓的铲式, 断层倾角普遍较小, 它们的上部倾角通常不大于 70°, 下部倾角则通常较小, 可表现为拆离断层特征(图 4)。在基底, 多个大规模的断层可在盆地底部相

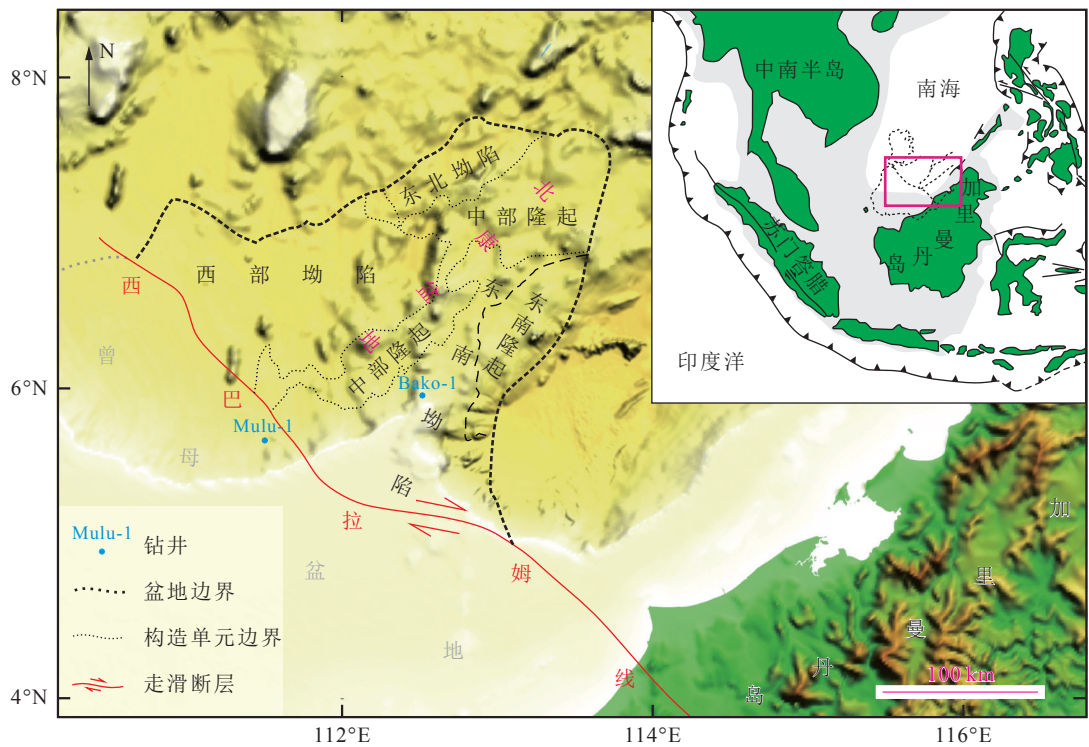


图 1 北康盆地区域位置及构造单元划分

Fig. 1 The location and tectonic units of Beikang Basin

连接, 构成一个统一的断层面, 且断层面往往发生旋转。此外, MMU 界面之下可观察到广泛发育的花状构造。这些花状构造主要发育于 3 号断层西侧的西部凹陷内, 盆地其他部位不发育该类型构造。这些花状断裂内的断层在深部的倾角逐渐减小, 向下

并入盆地低角度断层上, 并以这些断层为主断层。与主断层高达 9 km 的垂直断距相比, 这些断层的断距较小。断层特征的具体描述如下。

1 号断层位于北康盆地西部, 其北段位于北康盆地外, 南段位于北康盆地内, 向下穿过基底界面并延

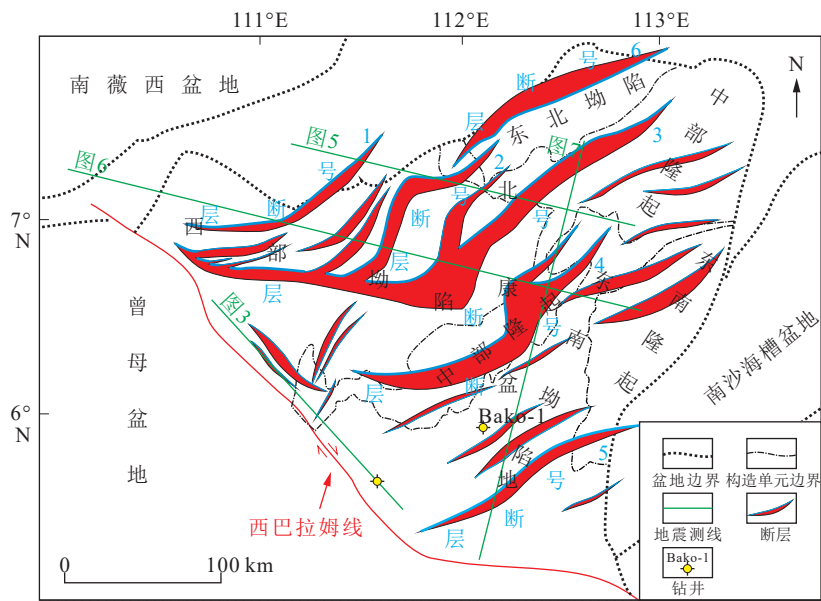


图 2 北康盆地断裂平面分布图(断层蓝色细线向粗线方向为断层倾向)

Fig. 2 Sketch map showing the main faults in the basement of the Beikang Basin

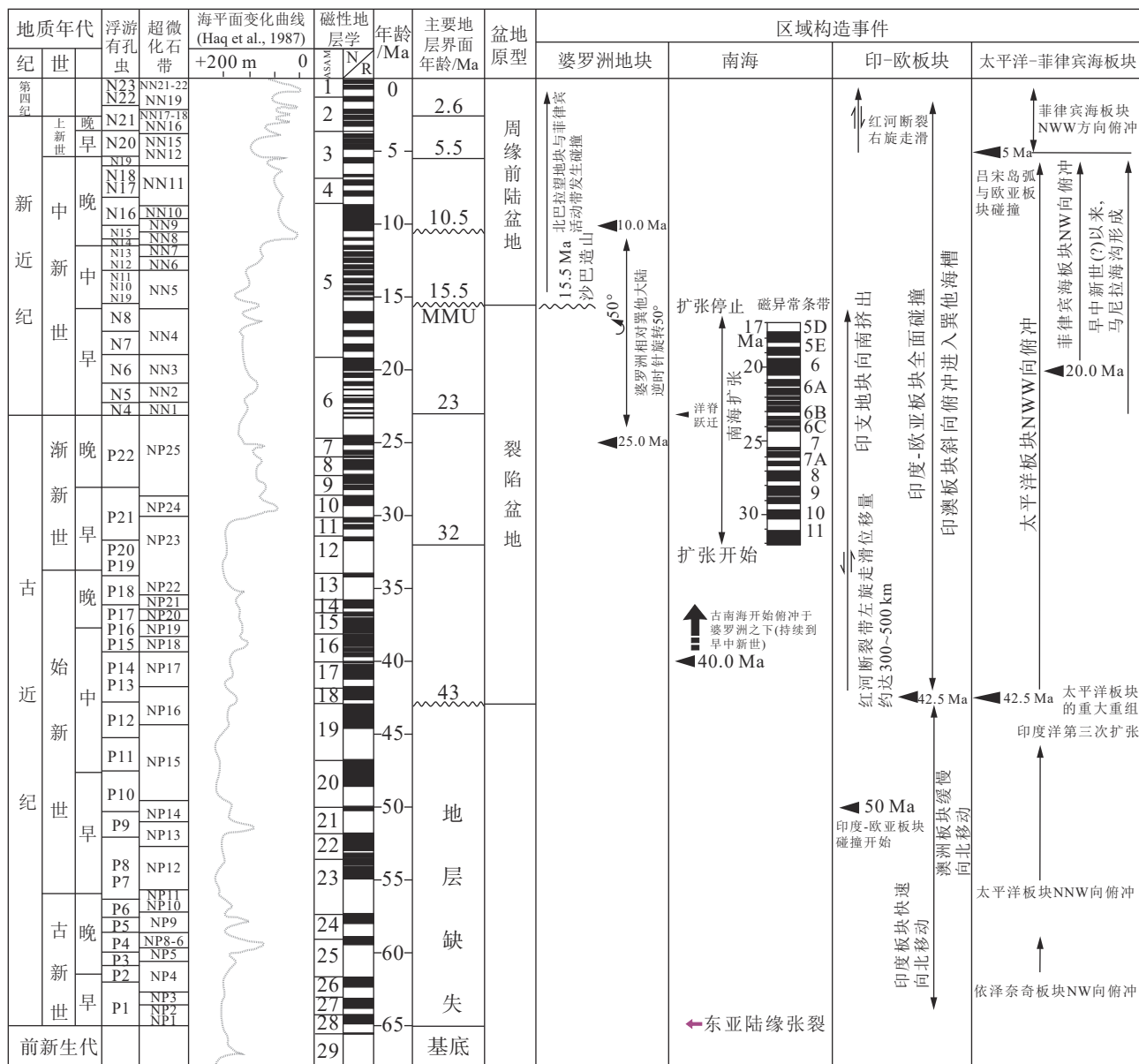


图3 北康盆地新生代地层划分

Fig. 3 Cenozoic stratigraphic framework of Beikang Basin

伸至 7 s TWT(双程反射时间)以下, 向上穿过 2.6 Ma 界面, 图 5 和图 6 两条 NWW—SEE 走向的地震解释剖面穿过该断层。在图 5 所示的剖面上, 该断层主要位于限定北康盆地边界的隆起西侧, 断面呈现相对较陡的平面形态, 倾角可至 54°左右, 断层的最大垂直断距可达 8.7 km 左右; 在图 6 所示的剖面上, 该断层主要表现为上陡下缓的铲式形态, 其上部断层倾角约为 74°, 下部倾角 50°左右, 向下穿过基底界面并延伸至 8 s TWT(双程反射时间)附近, 向上穿过 2.6 Ma 界面, 相比图 5 所示的剖面, 该剖面 1 号断层面上发育少量次级断层, 断层的最大垂直断距可达 5 km

左右。

2 号断层主体位于西部坳陷, 其北段穿过中部隆起进入东北坳陷, 图 5 和图 6 两条剖面穿过该断层。在图 5 所示的剖面上, 该断层向下穿过基底界面并延伸至 7 s TWT 左右, 向上终止于 15.5 Ma 界面, 断面主要表现为坡坪式, 并以坡坪为界, 上部倾角约为 54°, 下部为 40°左右, 断层的最大垂直断距可达 6.9 km 左右; 在图 6 所示的剖面上, 该断层向下穿过基底界面并延伸至 8 s TWT 左右, 向上终止于 15.5 Ma 地层界面, 断面主要表现为倾角变化缓慢的铲式形态, 其上部断层倾角约为 63°, 下部倾角最小

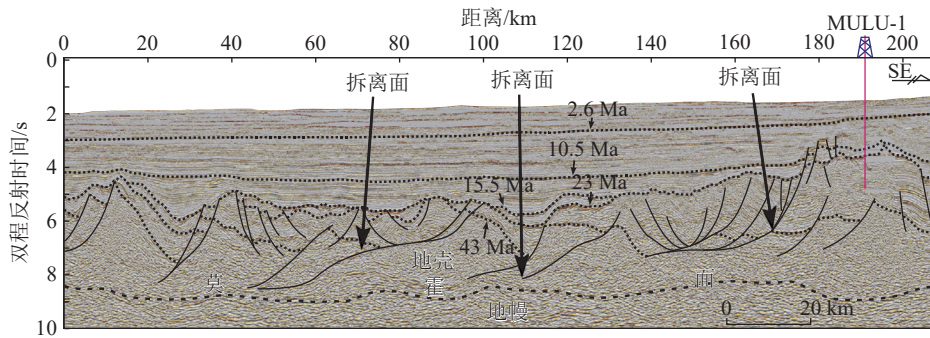


图 4 北康盆地典型构造地震剖面(据 Savva et al., 2014 修改)

Fig. 4 Seismic profile of typical structure in Beikang Basin

可至 36° 左右, 断层的最大垂直断距 4.6 km 左右, 表现为拆离断层特征。

3 号断层是北康盆地内规模最大的断层, 可分为走向不同的南、北两段, 其中南段近 EW 走向, 北段为 NE—SW 走向。断层穿过了西部拗陷和中部隆起, 图 5、图 6 和图 7 所示的 3 条剖面都可见该断层。在图 5 所示的剖面上, 该断层向下穿过基底界面并延伸至 7 s TWT 以下, 向上终止于 MMU, 断面主要表现为坡坪式, 并以坡坪为界, 上部倾角约为 45° , 下部为 24° 左右, 断层的最大垂直断距为 5.1 km 左右; 在图 6 所示的剖面上, 其向下穿过基底界面并延伸至 8 s TWT 以下, 向上终止于 MMU, 断面主要表现为坡坪式, 并以坡坪为界, 上部倾角约为 37° , 下部为 22° 左右, 断层的最大垂直断距可达 9.4 km 左右, 表现为拆离断层特征; 在图 7 所示的剖面上, 断面呈现相对较陡的平面形态, 倾角可至 58° 左右, 断层向下穿过基底界面, 向上可到达海底, 断层的最大垂直断距可达 8.6 km 左右。

4 号断层是北康盆地内规模仅次于 3 号断层的大型断层, 该断层主体位于中部隆起内, 仅有少量分支深入西部拗陷和东南拗陷, 图 6 和图 7 两条地震剖面穿过该断层。在图 6 所示的剖面上, 其向下穿过基底界面并延伸至 9 s TWT 左右, 向上穿过 2.6 Ma 界面, 主要表现为铲式, 其上部倾角约为 44° , 下部为 10° 左右, 断层的最大垂直断距可达 9.2 km 左右; 在图 7 所示的剖面上, 断层向下穿过基底界面并向下延伸至 8 s TWT 以下, 向上终止于 MMU, 断面在该剖面上主要表现为坡坪式, 其上部倾角约为 40° , 下部为 15° 左右, 断层的最大垂直断距可达 8.5 km 左右, 表现为拆离断层特征。

5 号断层主要位于东南拗陷南部, 其向北东延伸到东南隆起内, 图 7 所示的剖面穿过这一断层。在图 7 所示的剖面上, 断层向下穿过基底界面并向下延伸至 9 s TWT 左右, 向上终止于 MMU, 断层在该剖面上主要表现为铲式, 其上部倾角约为 35° , 下部为 16° 左右, 断层的最大垂直断距可达 2.6 km 左右,

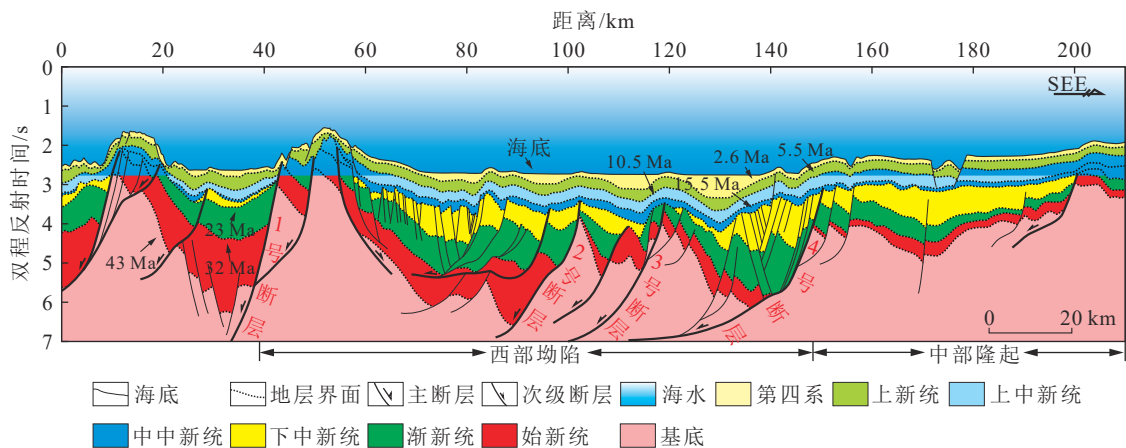


图 5 过西部拗陷、中部隆起 NWW—SEE 向地震解释剖面

Fig. 5 NWW—SEE direction interpreted seismic profile across the Western Depression and Central Uplift

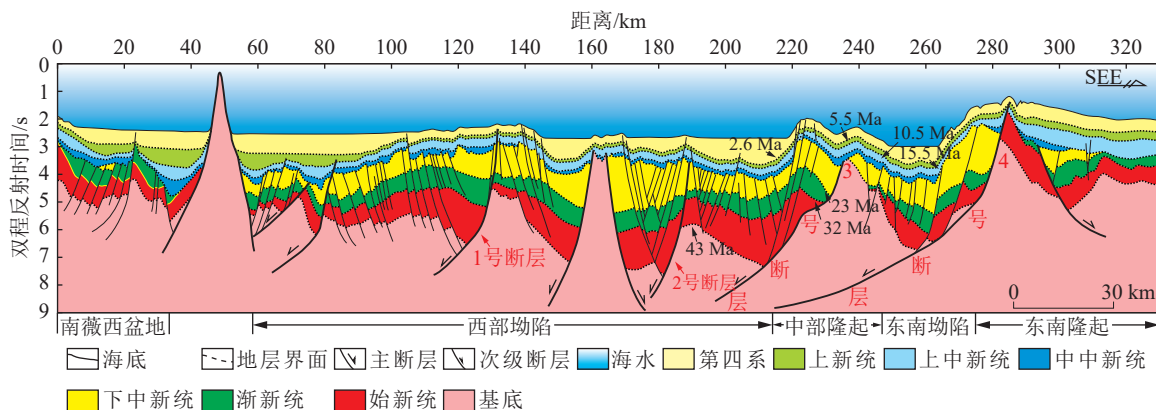


图6 过南薇西、北康盆地 NW—SE 向地震解释剖面

Fig. 6 NW—SE direction interpreted seismic profile across the Nanweixi Basin and the Beikang Basin

表现为拆离断层特征。

6号断层主要位于东北坳陷,限定了北康盆地的西北边界。相关地震剖面显示,该断层向下穿过基底界面并向下延伸至8s TWT左右,向上终止于MMU,断面在该剖面上主要表现为坡坪式,以坡坪为界,坡坪上方断层倾角约为 29° ,坡坪下方断层倾角为 12° 左右,断层的最大垂直断距可达7.1 km左右,也表现为拆离断层特征。

2 主控断层的活动性分析

前文研究表明,北康盆地 MMU 界面之下的断层发生了较大规模的活动,为了明确这些断层的活动强度,本文选取了盆内规模相对较大的2~6号断层进行断层活动速率分析(图8),分析结果如下。

2号断层南段并入3号断层中,其北段在43~32 Ma、32~23 Ma和23~15.5 Ma的活动速率分别为259 m/Ma、191 m/Ma和70 m/Ma。

3号断层在43~32 Ma活动速率总体表现为断层中段活动速率大,可达398 m/Ma,两端活动速率小,北段与图5剖面交叉部位活动速率最小可至105 m/Ma;32~23 Ma,断层北段的活动强度最大,可达233 m/Ma,向南逐渐减小,EW走向的南段最小可至8 m/Ma左右;23~15.5 Ma,3号断层的活动速率与43~32 Ma相似,中段最大活动速率可至253 m/Ma,南段近EW向分支活动速率最小可至6 m/Ma左右,北段最小活动速率52 m/Ma;15.5~10.5 Ma,仅断层南段发生活动,活动速率为79 m/Ma。

4号断层在43~32 Ma的活动规律与2号断层相

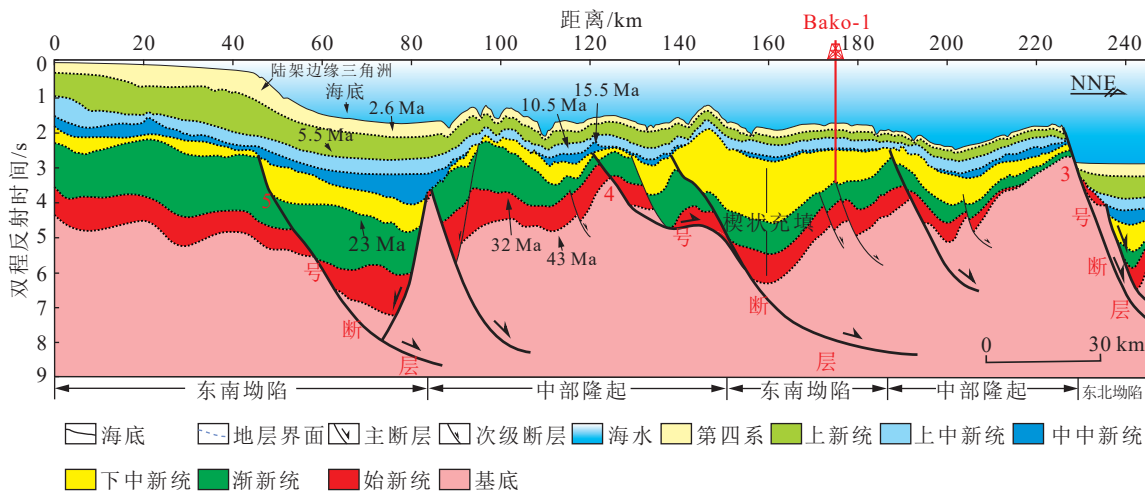


图7 过东南坳陷、中部隆起、东北坳陷 SSW—NNE 向地震解释剖面

Fig. 7 SSW—NNE direction interpreted seismic profile across the Southeastern Depression, Central Uplift and Northeastern Depression

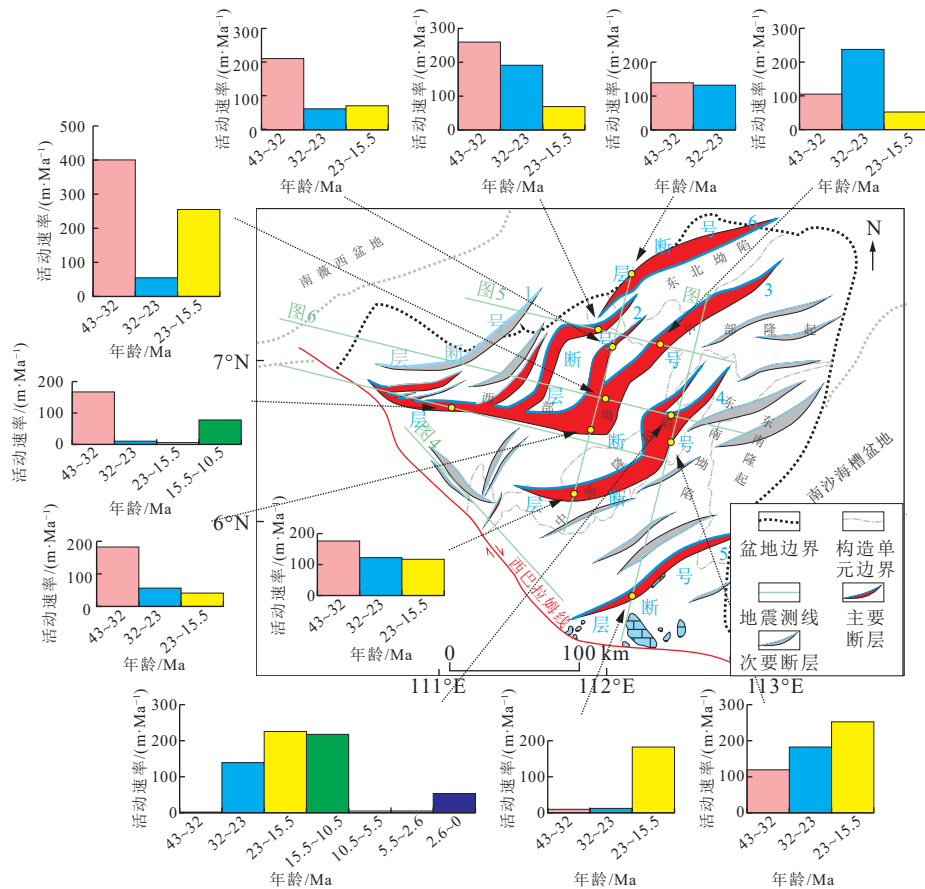


图 8 北康盆地主要断层活动速率

Fig. 8 Activity rate of main faults in the Beikang Basin

反, 断层南段活动速率最大, 为 174 m/Ma 左右, 向北段活动速率减小, 北段最小活动速率可至 3 m/Ma; 32~23 Ma, 断层北段活动速率较大, 最大活动速率为 182 m/Ma, 南段活动速率最小, 为 119 m/Ma; 23~15.5 Ma, 断层更大的活动速率也分布在北段, 最大可至 253 m/Ma, 南段分支活动速率为 118 m/Ma 左右; 15.5 Ma 至今, 仅断层北段发生活动, 15.5~10.5 Ma、10.5~5.5 Ma、5.5~2.6 Ma、2.6~0 Ma 断层的活动速率分别为 217 m/Ma、6 m/Ma、6 m/Ma 和 53 m/Ma。

5 号断层的活动速率随时间逐渐增大, 43~32 Ma、32~23 Ma 和 23~15.5 Ma 的活动速率分别为 10 m/Ma、13 m/Ma 和 181 m/Ma。

6 号断层西段末端 23 Ma 界面之上地层被剥蚀殆尽, 43~32 Ma 和 32~23 Ma 的断层活动速率分别为 138 m/Ma 和 134 m/Ma。

上述 11 个断点的平均活动速率见图 9。总体上, 断层活动在时间上主要集中于 43~15.5 Ma, 且总体活动强度逐渐减弱, 15.5 Ma 后盆地的裂陷活动基

本停止。本文根据断层分析结果, 将盆地划分为 43~15.5 Ma 的裂陷盆地阶段和 15.5 Ma 至今的周缘前陆盆地阶段。43~32 Ma, 盆地断层的活动速率最大, 由于平面上断层在盆地的西北部分布更集中, 因此断层活动在盆地北部较集中, 在盆地南部相对分散, 表明盆地早期的裂陷活动可能主要发生在盆地的西北部, 盆地东南角裂陷活动相对较弱; 32~23 Ma, 断层的活动递减, 主要集中在盆地北部, 南部断层活动速率较小, 43~23 Ma 盆地最东南部的东南坳陷断层几乎没有发生活动, 表明裂陷活动进一步向盆地的西北部集中; 23~15.5 Ma, 断层活动主要集中在盆地东南部, 包括西部坳陷东部、中部隆起的南部和东南坳陷, 盆地其他部位断层活动速率相对很小, 表明盆地的裂陷活动逐渐由西北部迁移到东南部。15.5 Ma 之后, 盆地的绝大部分断层活动停止(图 4—图 7), 仅西部坳陷中部的东侧断层在活动, 其活动速率为 217 m/Ma; 10.5 Ma 之后, 盆地断层的活动小到可以忽略不计。

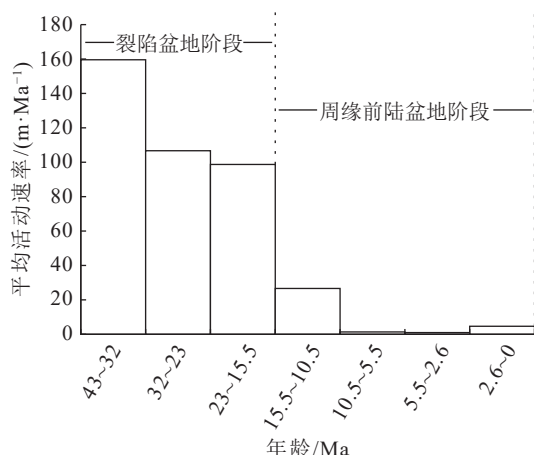


图9 断层平均活动速率

(图8断点在各个时期活动速率之和除以11)

Fig. 9 Average activity rate of the faults

3 盆地基底地壳伸展程度

假定地壳厚度的变化是地壳的伸展和减薄的结果,通过这一变化可估算地壳的伸展程度。将初始地壳厚度(t_0)设定为32 km,现今的地壳厚度指基底到莫霍面之间的岩石圈厚度(t_c),莫霍面深度主要通过 Lei et al.(2016)对南海地区重力反演的研究获得,选取了图5和图6两条地震剖面进行地壳伸展程度分析,基底深度通过对基底界面(43 Ma 界面)进行时深转换获得,地壳的伸展系数(β)可表示为原始地壳厚度与现今地壳厚度的比值。即:

$$\beta = t_0/t_c \quad (1)$$

任建业等(2015a)在研究南海北部被动大陆边缘时通过伸展系数命名了不同减薄程度的地壳:伸展系数1.2~1.5为近端带,1.5~3.0为细颈化带(即减薄带),大于3.0为远端带(即强烈减薄带)及地壳厚度为0(即伸展系数无穷大)的洋陆转换带。对图5、图6对应的地壳伸展系数进行计算,结果如下。

图5所示的剖面长度为210 km左右,穿过了南康盆地和北康盆地的北部。该剖面处地壳的厚度和相应的伸展因子分析结果如图10所示。总体上,地壳厚度发生了较大程度的减薄,厚度13~21 km,地壳厚度的最大值20.9 km出现在剖面10 km处(图10-a),最小值13.2 km出现在剖面中间90 km处;地壳的伸展因子总体呈现中间大、两侧小的特点,总体介于1.5~2.4之间,与地壳厚度对应,其最大值出现在90 km处,为2.41左右,最小值出现在10 km处,为1.53左右(图10-b)。

图6所示的剖面全长为330 km左右,它穿过了北康盆地4个构造单元。该剖面处地壳的厚度和相应的伸展因子分析结果如图11所示。总体上,该剖面处地壳的伸展程度与图4剖面基本相似。地壳厚度主要介于13~22 km之间,最大值21.3 km出现在剖面50 km处(图11-a),最小值出现在剖面中间170 km处,为11.2 km左右;地壳的伸展因子沿剖面变化较大,但总体也呈现中间大、两侧小的特点,介于1.5~2.9之间,与地壳厚度对应,其最大值出现在170 km处,为2.85左右,最小值出现在50 km处,为1.5左右(图11-b)。

综上所述,北康盆地最大伸展部位是盆地中部的西部坳陷,该处也是盆地范围内地壳厚度最小的部位,从西部坳陷中心向两侧地壳厚度增大,伸展因子减小。盆地总体的伸展因子大于1.2,小于3.0,与被动陆缘细颈化带的伸展程度相当(任建业等,2015b)。

4 MMU 界面之下的盆地原型

Madon et al.(2013)认为,古南海的南侧边界线为卢帕尔线,发生在该构造线以北的沙捞越造山活动同时控制了西巴拉姆线南北侧的曾母盆地和北康盆地在始新世—渐新世的构造演化。因此, Madon et

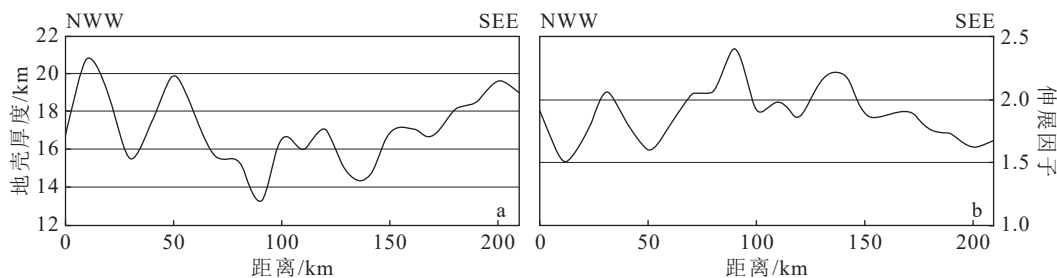


图10 过西部坳陷、中部隆起剖面的地壳伸展特征

Fig. 10 Features of crustal extension on section across the Western Depression and Central Uplift

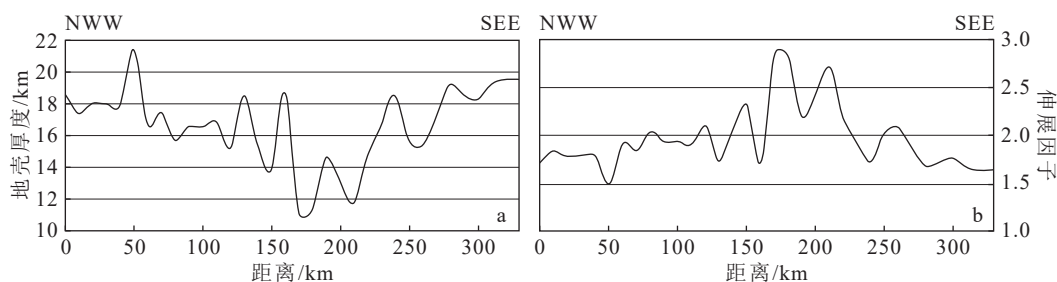


图 11 过南薇西、北康盆地剖面的地壳伸展特征

Fig. 11 Features of crustal extension on section across the Nanweixi Basin and Beikang Basin

al.(2013)认为 MMU 界面之下北康盆地的原型盆地为前陆盆地。然而,盆地断层几何学特征和活动性分析结果表明,北康盆地在始新世—早中新世期间发生了很大规模的断裂活动,盆地处于强烈的伸展环境。雷超等(2015)将 MMU 界面之下的北康盆地地层序列划分为裂陷盆地。

本次研究发现,盆地 3 号和 4 号断层表现为低角度的拆离断层特征,基底断层发生了大规模、快速的断层活动,断层活动的特征与南海东南部的礼乐盆地总体一致(吴智平等, 2018)。局部断层的水平断距高达 40 km,垂直断距可达 9 km 左右(图 5—图 7),伸展活动对盆地格局的形成产生了极大的影响。3 号和 4 号断层之上虽然也发育了走滑断裂,但并没有影响盆地的隆坳格局,因此,在 MMU 界面之下的北康盆地裂陷盆地中,由 3 号和 4 号断层主控的西部坳陷甚至表现为拆离盆地特征(任建业等, 2015b)。

北康盆地的裂陷活动主要发生在 43~15.5 Ma,且活动强度逐渐减弱,沙巴造山时期活动停止。北康盆地、南薇西盆地与南海西南次海盆另一侧的中建南盆地是共轭的被动大陆边缘(Sibuet et al., 2016)。Savva et al.(2013)通过对中建南盆地的地震资料进行重新处理和解释,结合地震波速度反演,发现中建南盆地的中部坳陷发生了强烈拉伸,莫霍面上升到 12 km 左右,地壳厚度减薄至 5 km 以下,甚至局部出现剥露地幔。基于此, Savva et al.(2013)认为中建南盆地属于拆离盆地。与之相比, Savva et al.(2014)对东纳土纳盆地(包含部分曾母盆地和几乎全部北康盆地)的研究发现,该盆地位于曾母盆地的部分地壳厚度较均匀,介于 7~10 km 之间,位于北康盆地的部分地壳厚度变化较大,介于 7~23 km 之间,故认为纳土纳盆地位于“强烈减薄带”内。Gozzard et al.(2018)通过对自由空气重力异常进行岩石圈热

重力异常校正,获得了南海及其周围区海域的地壳厚度,并发现北康盆地所在区域地壳的厚度主要介于 9~25 km 之间。本文在前人研究的基础上(Lei et al., 2016),结合地震资料研究,进一步确定北康盆地的地壳厚度介于 11~22 km 之间,伸展因子介于 1.5~2.9 之间,虽然发生了一定程度的拉伸且发育拆离断层,但拉伸程度明显小于曾母盆地和中建南盆地。北康盆地的伸展程度与被动陆缘的细颈化带(如南海北部的白云凹陷)(Peron-Pinvidic et al., 2013; 任建业等, 2015a)进行对比,位于“减薄带”内,而非“强烈减薄带”内。

5 北康盆地成盆机制及其对南海南部被动陆缘构造演化的启示

婆罗洲岛上发现了与洋壳俯冲相关的蛇绿岩(Zahirovic et al., 2014)和火山岩(Wang et al., 2016),南沙海槽附近的地震剖面显示,沙巴造山的响应不整合界面向下插到婆罗洲岛之下(Cullen, 2014),揭示了婆罗洲之下的俯冲, Hall et al.(2017)通过地震层析成像发现,现今南沙海槽之下出现明显的俯冲板片。这些证据表明,西北婆罗洲之下存在一个古南海,古南海俯冲拖曳力的作用导致了现今南海的形成。古南海俯冲时期其后方必定处于伸展环境,它的俯冲方向与北康盆地内伸展构造的方向较吻合,此外,对北康盆地 MMU 界面之下 NE—SW 走向基底断层的活动性分析表明,盆地伸展活动与古南海俯冲发生的时间都在 45~15.5 Ma。北康盆地位于南海和古南海之间,既是南海的被动陆缘,也是古南海的被动陆缘,盆地在 MMU 界面之下发育了一系列 NE—SW 走向的大规模断层,表明盆地在沙巴造山之前处于伸展环境。因此,北康盆地的形成必然主要与古南海板片的俯冲拖曳相关(Barckhausen et al., 2014; Li et al., 2015)。

除古南海俯冲外,可能还有一些其他的因素控制该裂陷盆地的形成。西巴拉姆线在南沙地块漂移期间发生右旋走滑运动(Cullen, 2014),同一时期,北康盆地内广泛发育了花状构造,这些花状构造虽然没有改变盆地的隆坳格局,但可能改变了盆地局部断裂构造的方向。如与北康盆地共轭的中建南盆地内的同时期断层走向为 NE—SW 至 NNE—SSW,而盆内 3 号和 4 号断层走向由北段的 NE—SW 至 NNE—SSW 方向转变为南段的近 E—W 方向。因此,西巴拉姆线右旋走滑运动可能对盆地的形成也产生了一定的影响。此外,南沙地块与婆罗洲地块的碰撞拼贴发生在 22~20 Ma(Menier et al., 2017),而 25~10 Ma,婆罗洲发生了近 50°左右的逆时针旋转(Fuller et al., 1999; Hall, 2012),3 号和 4 号断层走向的变化也可能是受区域旋转影响发生了局部变形(吴智平等, 2018)。

南海南部是印支半岛挤出-逃逸的末端,也是接受古南海俯冲拖曳作用的近端。雷超(2012)发现,红河-越东-卢帕尔线东侧盆地规模相对较大,主要受拉伸活动挤压作用的控制,西侧盆地规模相对较小,主要受走滑和地块顺时针旋转的控制。基于此,雷超(2012)将南海地区沿该构造线划分为西侧的挤出-逃逸变形区和东侧的古南海俯冲-拖曳变形区,其中,南海南部 2 个变形区的界线为卢帕尔线,北康盆地位于俯冲-拖曳变形区内。对曾母盆地的地震剖面研究发现,曾母地块在 45 Ma 与婆罗洲地块发生碰撞并造山(Hutchison, 1996),之后曾母地块之上的曾母盆地进入前陆盆地阶段,断裂活动微弱(解习农等, 2015; 徐俊杰, 2019),然而,本文地震剖面显示,同一时期该盆地东北侧的北康盆地却处于裂陷盆地阶段的拉伸环境,并且断层活动速率较大(图 8)。此外, Cullen(2014)在南沙海槽附近的地震剖面解释结果也表明,曾母盆地和北康盆地在始新世经历了程度不同的伸展过程,同时,还发现婆罗洲岛上曾母-北康盆地分界处的火山岩体在始新世发生了错动和分裂。结合对古南海的讨论,笔者认为曾母盆地和北康盆地之间必然存在一条动力边界,即西巴拉姆线。该动力边界的走滑运动开始于西巴拉姆线南侧地块与婆罗洲地块发生碰撞的 45 Ma,且是右旋走滑运动。15.5 Ma,沙巴造山导致曾母盆地和北康盆地中形成非常明显的 MMU 不整合界面,表明这一时期西巴拉姆线南侧的曾母地块和其北侧

的南沙地块已经发生了焊接,两者是一个整体,西巴拉姆线停止活动。沙巴造山之后,曾母盆地进入被动大陆边缘阶段(Xu et al., 2019),接受了来自婆罗洲岛和盆地南部的高通量碎屑物源,而同一时期的北康盆地由于更靠近沙巴地区进入前陆盆地阶段。总而言之,西巴拉姆线两侧的曾母盆地和北康盆地在新生代经历了完全不同的构造演化过程。此外, Hall et al.(2017)在该地区的地震层析成像结果显示,古南海只存在于西巴拉姆线的东北侧; Hutchison(1975)在卢帕尔线附近的岩石样品中发现了与洋壳俯冲相关的蛇绿岩,表明卢帕尔线并非走滑断层,而是一条洋壳俯冲完毕形成的缝合线,其下俯冲开始于晚白垩世,结束于晚始新世。因此,本次研究认为,南海南部动力变形区的分界线可能并不是卢帕尔线(雷超, 2012),而是西巴拉姆线,其南侧为挤出-逃逸构造区,其北侧为古南海俯冲-拖曳构造区。

结合上文的断层活动性分析,得出北康盆地的构造演化过程: 45 Ma 时期,古南海沿西巴拉姆线向南俯冲(Hall et al., 2017),在俯冲拖曳力的作用下,北康盆地所在华南地块受 NW—SE 方向拉伸应力影响,形成裂陷盆地(图 12-a); 43 Ma 左右北康盆地所在部位开始接受沉积(Madon et al., 2013),盆地的伸展中心主要集中在盆地的西部坳陷,形成了一系列 NE—SW 方向的构造单元和大型断裂; 32 Ma 时期,华南地块发生破裂,南海开始海底扩张(Briaies et al., 1993),北康盆地裂离华南地块并向南漂移; 23 Ma 时期,南海发生洋脊跃迁后(Briaies et al., 1993),北康盆地的伸展中心向东南方向迁移到盆地的东南坳陷; 15.5 Ma 时期,古南海俯冲完毕(Briaies et al., 1993; Hall et al., 2017),南沙地块向东与卡加延脊发生碰撞,南海扩张停止,南沙地区主要伸展活动停止,该构造运动在婆罗洲-巴拉望沿岸形成了大量近 NS 方向的褶皱(图 12-b),在海域范围内形成了 MMU 不整合界面。Hall et al. (2008)、Cullen(2014)和 Wang et al. (2016)认为,沙巴造山可持续到 8 Ma 左右, Madon et al. (2013)则认为古南海呈剪刀式关闭,沙巴造山之后,南海东部统一的处于挤压应力场中。北康盆地地震剖面上的褶皱发育特征(图 5—图 8、图 12-b)则表明,北康盆地受挤压应力场的持续影响直至现今,形成了现今的周缘前陆盆地。

基底的断层活动总是发生在岩石圈最薄弱的部位,因此,岩石圈在伸展到破裂的过程中,其应变会

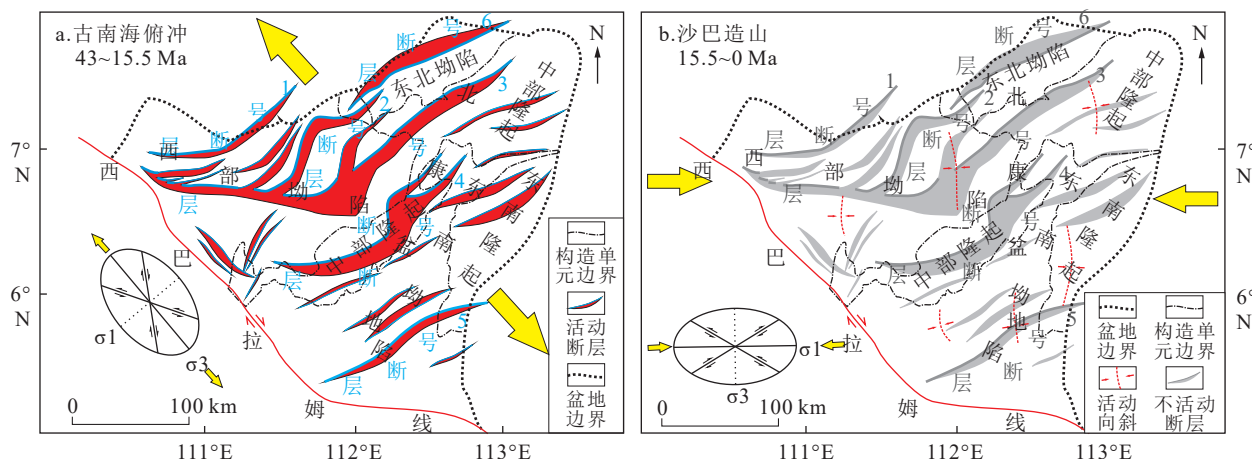


图 12 北康盆地不同演化阶段构造及应力场特征(据 Hall et al., 2008)

Fig. 12 The tectonics and stress fields in different evolutionary phase of the Beikang Basin

向新生洋壳方向发生迁移、集中(任建业等, 2018), 具体表现为断层活动的终止时间向洋壳方向变晚(Ranero et al., 2010)。32 Ma, 南海开始扩张, 南海地区的拉伸应变迁移并集中于洋盆地区, 白云凹陷内的断层停止活动(解习农等, 2015; 任建业等, 2015a, 2018), 但包括北康盆地、中建南盆地(Savva et al., 2013)在内的南海南部诸盆地内(姚永坚等, 2005; 吴冬等, 2014; 解习农等, 2015; 段亮等, 2018)的断层仍然保持较高的活动速率, 且一直持续到 15.5 Ma 的沙巴造山时期。对比南海北部和南部陆缘靠近和远离洋盆的地区发现, 32 Ma 时期白云凹陷停止拉伸应变, 然而其北部的其他断陷, 如琼东南盆地的拉伸应变则普遍持续到 23~21 Ma(解习农等, 2015; 徐俊杰, 2019), 同样的情况出现在南海南部, 靠近西南次海盆的郑和隆起西侧部位拉伸应变终止于 23 Ma 左右(Song et al., 2015), 而南海南部诸多盆地的拉伸活动则普遍持续到 15.5 Ma 左右(Morley, 2016)。因此, 在南海地区, 岩石圈发生破裂后, 应变向洋壳方向集中, 主要体现在靠近洋壳的细颈化带和远端带部位, 远离洋壳地区的拉伸应变受海底扩张的影响较小。这一特性可能与被动陆缘岩石圈的近端和远端在拉伸过程中的解耦相关, 表明岩石圈伸展-破裂过程的联合剪切模式可能需要进一步细化。

Peron-Pinvidic et al. (2010) 的研究表明, 在没有出现洋壳的被动大陆边缘盆地内, 与拆离断层关联的调节断层在洋壳出现后仍保持活动。这一断层活动可能与被动陆缘近端和远端在洋壳出现之前的解耦相关(Mohn et al., 2012)。北康盆地与南海洋盆周

缘的被动陆缘远端在发生解耦后, 在古南海洋壳俯冲拖曳作用和不受南海扩张应变集中影响(或受影响极小)的情况下, 发生断裂活动, 并一直持续到 15.5 Ma 左右。并且, 在这一岩石圈拉伸活动的过程中, 南海海底扩张和北康盆地的断裂活动处于同等地位——两者均受到古南海俯冲拖曳力的作用, 同样的情况可能出现在南海周缘的其他被动陆缘之上的盆地。

6 结 论

(1) 北康盆地内发育了大规模的拆离断层。这些断层主要发育于西部拗陷内, 其走向可能受到走滑活动的影响, 北段走向 NNE 向乃至 NW 向, 南段走向 NEE—SWW 向至 NWW—SEE 向, 总体体现了盆地早期沿 NW—SE 方向的伸展活动。

(2) 北康盆地的断层活动导致地壳发生了较大程度的减薄, 但其厚度通常大于 10 km, 伸展因子小于 3, 是发育于被动大陆边缘减薄带内的伸展型盆地。

(3) 对比曾母盆地和北康盆地的构造演化过程, 推断两者之间的西巴拉姆线划分了南海南部古南海俯冲-拖曳构造区和挤出-逃逸构造区 2 个动力变形区。

(4) 南海地区的岩石圈发生破裂后, 应变向洋壳方向集中, 主要体现在靠近洋壳的细颈化带和远端带部位, 远离洋壳地区的拉伸应变受海底扩张的影响较小, 这一情况可能与被动陆缘近端和远端在洋壳出现之前的解耦相关。

References

- Bai Y L, Wang X Y, Dong D D, et al. 2020. Symmetry of the South China Sea conjugate margins in a rifting, drifting and collision context[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 117: 104397.
- Barckhausen U, Engels M, Franke D, et al. 2014. Evolution of the South China Sea: Revised ages for breakup and seafloor spreading[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 599–611.
- Briaes A, Patriat P, Tapponnier P. 1993. 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: Solid Earth*, 98(B4): 6299–6328.
- Brune S, Heine C, Clift P D, et al. 2017. Rifted margin architecture and crustal rheology: Reviewing Iberia–Newfoundland, Central South Atlantic, and South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 79: 257–281.
- Cullen A. 2014. Reprint of Nature and significance of the West Baram and Tinjar Lines, NW Borneo[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 674–686.
- Duan L, Pei J X, Zhang Y Z, et al. 2018. Tectonic characteristics of extensional detachment basin in southern South China Sea[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 23(4): 71–80(in Chinese with English abstract).
- Fuller M, Ali J R, Moss S J, et al. 1999. Paleomagnetism of Borneo[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17(1/2): 3–24.
- Gozzard S, Kusznir N, Franke D, et al. 2018. South China Sea crustal thickness and oceanic lithosphere distribution from satellite gravity inversion[J]. *Petroleum Geoscience*, 25(1): 112–128.
- Hall R, van Hattum M W A, Spakman W. 2008. Impact of India–Asia collision on SE Asia: The record in Borneo[J]. *Tectonophysics*, 451(1/4): 366–389.
- Hall R. 2012. Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean[J]. *Tectonophysics*, 570/571(11): 1–41.
- Hall R, Spakman W. 2015. Mantle structure and tectonic history of SE Asia[J]. *Tectonophysics*, 658: 14–45.
- Hall R, Breitfeld T. 2017. Nature and demise of the Proto–South China Sea[J]. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 63: 61–76.
- Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. *Science*, 235: 1156–1167.
- Hutchison C S. 1975. Ophiolite in Southeast Asia[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 86: 797–806.
- Hutchison C S. 1996. The 'Rajang accretionary prism' and 'Lupar Line' problem of Borneo[J]. *Geological Society London Special Publications*, 106(1): 247–261.
- Lei C. 2012. Structure and evolution of Yinggehai and Qiongdongnan Basins, South China Sea: Implications for Cenozoic tectonic in Southeast Asia[D]. Doctoral Dissertation of China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Lei C, Ren J Y, Zhang J. 2015. Tectonic province division in the South China Sea: Implications for basin geodynamics[J]. *Earth Science–Journal of China University of Geosciences*, 40(4): 744–762(in Chinese with English abstract).
- Lei J P, Jiang S H, Li S Z, et al. 2016. Gravity anomaly in the southern South China Sea: a connection of Moho depth to the nature of the sedimentary basins' crust[J]. *Geological Journal*, 51(S1): 244–262.
- Lei Z Y, Zhang L, Wang L Z, et al. 2020. Provenance migration in the Beikang Basin of the Southern South China Sea during the Oligocene to the Mid–Miocene[J]. *Earth Science*, 45(5): 1855–1864(in Chinese with English abstract).
- Li C F, Li J, Ding W, et al. 2015. Seismic stratigraphy of the central South China Sea basin and implications for neotectonics[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 120(3): 1377–1399.
- Liang G H, Zhang B L. 2024. Discussion on the Cenozoic tectonic evolution of the South China Sea from continental margin extension[J]. *Geological Bulletin of China*, 43(1): 20–32(in Chinese with English abstract).
- Liu J, Chen X, Wu W, et al. 2015. New tectono–geochronological constraints on timing of shearing along the Ailao Shan–Red River shear zone: Implications for genesis of Ailao Shan gold mineralization[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 70–86.
- Madon M, Kim C L, Wong R. 2013. The structure and stratigraphy of deepwater Sarawak, Malaysia: Implications for tectonic evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76: 312–333.
- Menier D, Mathew M, Pubellier M, et al. 2017. Landscape response to progressive tectonic and climatic forcing in NW Borneo: Implications for geological and geomorphic controls on flood hazard[J]. *Scientific Reports*, 7(1): 1–18.
- Metcalfe I. 2011. Tectonic framework and Phanerozoic evolution of Sundaland[J]. *Gondwana Research*, 19(1): 3–21.
- Mohn G, Manatschal G, Beltrando M, et al. 2012. Necking of continental crust in magma–poor rifted margins: Evidence from the fossil Alpine Tethys margins[J]. *Tectonics*, 31(1): 1–28.
- Morley C K. 2016. Major unconformities/termination of extension events and associated surfaces in the South China Seas: Review and implications for tectonic development[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 120: 62–86.
- Peron–Pinvidic G, Manatschal G, Osmundsen P T. 2013. Structural comparison of archetypal Atlantic rifted margins: A review of observations and concepts[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 43: 21–47.
- Peron–Pinvidic G, Manatschal G. 2010. From microcontinents to extensional allochthons: witnesses of how continents rift and break apart?[J]. *Petroleum Geoscience*, 16(3): 189–197.
- Ranero C R, Perez–Gussinye M. 2010. sequential faulting explains the asymmetry and extension discrepancy of conjugate margins[J]. *Nature*, 468(7321): 294–299.
- Ren J Y, Pang X, Lei C, et al. 2015a. Ocean and continent transition in passive continental margins and analysis of lithospheric extension and breakup process: Implication for research of the deepwater basins in the continental margins of South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 102–114 (in Chinese with English abstract).
- Ren J Y, Pang X, Lei C, et al. 2015b. Structure and evolution of deep water/superdeep water basins in the northern continental margins of South China Sea[C]// The 17th Annual Meeting of the China Association for Science and Technology—Minutes 9, Proceedings of the Symposium on Deepwater Oil and Gas Exploration and Development Technology in the South China Sea, Guangzhou, China: 8 (in Chinese with English abstract).
- Ren J Y, Pang X, Yu P, et al. 2018. Characteristics and formation mechanism of deepwater and ultra–deepwater basins in the northern continental margin of the South China Sea[J]. *Chinese Journal of*

- Geophysics, 61(12): 4901–4920 (in Chinese with English abstract).
- Sandoval L, Welford J K, Macmahon H, et al. 2019. Determining continuous basins across conjugate margins: The East Orphan, Porcupine, and Galicia Interior basins of the southern North Atlantic Ocean[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 110: 138–161.
- Savva D, Meresse F, Pubellier M, et al. 2013. Seismic evidence of hyper-stretched crust and mantle exhumation offshore Vietnam[J]. *Tectonophysics*, 608: 72–83.
- Savva D, Pubellier M, Franke D, et al. 2014. Different expressions of rifting on the South China Sea margins[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 579–598.
- Sibuet J C, Yeh Y C, Lee C S. 2016. Geodynamics of the South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 692: 98–119.
- Song T, Li C. 2015. Rifting to drifting transition of the Southwest Subbasin of the South China Sea[J]. *Marine Geophysical Researches*, 36(2/3): 167–185.
- Tang W. 2018. Characteristics of major unconformities and depositional evolution of Cenozoic in Beikang Basin, South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 30(2): 9–16(in Chinese with English abstract).
- Wang P C, Li S Z, Guo L L, et al. 2016. Mesozoic and Cenozoic accretionary orogenic processes in Borneo and their mechanisms[J]. *Geological Journal*, 51(S1): 464–489.
- Williams S E, Whittaker J M, Halpin J A, et al. 2018. Australian–Antarctic break up and seafloor spreading: Balancing geological and geophysical constraints[J]. *Earth Science Reviews*, 188: 41–58.
- Wu D, Zhu X M, Zhang H H, et al. 2014. Deposition characteristics and hydrocarbon distribution in medium and large basins of Nansha, South China Sea[J]. *Journal of Palaeogeography*, 16(5): 673–686(in Chinese with English abstract).
- Wu Z P, Liu Y Q, Zhang J, et al. 2018. Cenozoic characteristics and evolution of fault systems in the Liyue Basin, South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(2): 221–231 (in Chinese with English abstract).
- Xie X N, Ren J Y, Wang Z F, et al. 2015. Difference of tectonic evolution of continental marginal basins of South China Sea and relationship with SCS spreading[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 77–87(in Chinese with English abstract).
- Xu J J. 2019. The tectono-stratigraphic framework and geodynamics of the Zengmu Basin, southern South China Sea[D]. Doctoral Dissertation of China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Xu J, Ren J, Luo P. 2019. The evolution of a gravity-driven system accompanied by diapirism under the control of the prograding West Luconia Deltas in the Kangxi Depression, Southern South China Sea[J]. *Marine Geophysical Research*, 40(B4): 199–221.
- Yao Y J, Xia B, Xu X. 2005. Tectonic evolution of the main sedimentary basins in southern area of the South China Sea[J]. *Geological South China sea*, 17: 1–11(in Chinese with English abstract).
- Ye Q, Mei L, Shi H, et al. 2020. The Influence of Pre-existing Basement Faults on the Cenozoic Structure and Evolution of the Proximal Domain, Northern South China Sea Rifted Margin[J]. *Tectonics*, 39(3): 290–312.
- Zahirovic S, Matthews K J, Flament N, et al. 2016. Tectonic evolution and deep mantle structure of the eastern Tethys since the latest Jurassic[J]. *Earth–Science Reviews*, 162: 293–337.
- Zahirovic S, Seton M, Miller R D. 2014. The Cretaceous and Cenozoic tectonic evolution of Southeast Asia[J]. *Solid Earth Discussions*, 5(2): 227–273.
- Zhang Y, Xia S, Cao J, et al. 2020. Extensional tectonics and post-rift magmatism in the southern South China Sea: New constraints from multi-channel seismic data[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 117: 104396.
- Zhao S, Li X J, Yao Y J, et al. 2019. Orogenic events in Southern South China Sea and their relationship with the subduction of the Proto South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(5): 147–162 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 段亮, 裴健翔, 张亚震, 等. 2018. 南海南部裂离型盆地构造特征[J]. *海相油气地质*, 23(4): 71–80.
- 雷超, 任建业, 张静. 2015. 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*, 40(4): 744–762.
- 雷超. 2012. 南海北部莺歌海—琼东南盆地新生代构造变形格局及其演化过程分析[D]. 中国地质大学(武汉) 博士学位论文.
- 雷振宇, 张莉, 王龙樟, 等. 2020. 南海南部北康盆地晚渐新世—中新世物源变化[J]. *地球科学*, 45(5): 1855–1864.
- 梁光河, 张宝林. 2024. 从陆缘伸展探讨新生代南海构造演化[J]. *地质通报*, 43(1): 20–32.
- 任建业, 庞雄, 雷超, 等. 2015a. 被动陆缘洋陆转换带和岩石圈伸展破裂过程分析及对南海陆缘深水盆地研究的启示[J]. *地学前缘*, 22(1): 102–114.
- 任建业, 庞雄, 雷超, 等. 2015b. 南海北部陆缘深水—超深水盆地结构和演化[C]//第十七届中国科协年会——分 9 南海深水油气勘探开发技术研讨会论文集, 广州.
- 任建业, 庞雄, 于鹏, 等. 2018. 南海北部陆缘深水—超深水盆地成因机制分析[J]. *地球物理学报*, 61(12): 4901–4920.
- 唐武. 2018. 南海北康盆地新生代重要不整合界面特征与沉积演化规律[J]. *中国海上油气*, 30(2): 9–16.
- 吴冬, 朱筱敏, 张厚和, 等. 2014. 中国南沙海域大中型盆地沉积特征与油气分布[J]. *古地理学报*, 16(5): 673–686.
- 吴智平, 刘雨晴, 张杰, 等. 2018. 中国南海礼乐盆地新生代断裂体系的发育与演化[J]. *地学前缘*, 25(2): 221–231.
- 解习农, 任建业, 王振峰, 等. 2015. 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*, 22(1): 77–87.
- 徐俊杰. 2019. 曾母盆地构造—地层格架及其成盆机制研究[D]. 中国地质大学(武汉) 博士学位论文.
- 姚永坚, 夏斌, 徐行. 2005. 南海南部海域主要沉积盆地构造演化特征[J]. *南海地质研究*, 17: 1–11.
- 赵帅, 李学杰, 姚永坚, 等. 2019. 南海南部造山运动及其与古南海俯冲的成因联系[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 39(5): 147–162.