

DOI: 10. 16562/j. cnki. 0256-1492. 2017. 06. 002

南海的“山根拆沉成因观”——南海成因新议

刘海龄¹, 周洋^{2,3}, 王印^{1,3}, 朱荣伟^{1,3}, 黎雨晗^{1,3}

(1. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301;
2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:南海成因问题至今仍众说纷纭。作者以寻求南海形成演化的内因为着眼点,在大量地震剖面地质解释的基础上,运用构造解析法对南海南北陆缘前新生代基底地质构造变形形迹进行了系统的构造恢复和组合分析,发现了残存于南海南北陆缘中生代基底中的断层-褶皱具有碰撞造山带特有的背冲断褶构造特征,指出该古造山带的中轴位置大致沿现今双峰-笔架海山连线分布,并称之为古双峰-笔架碰撞造山带。结合南海地区新生代岩浆岩地球化学特征分析和南北陆缘新生代伸展构造特征分析,提出该造山带在新生代发生了山根拆沉的解体过程,并明确提出了该“山根拆沉”机制是诱发南海形成的根本原因。

关键词:南海成因;中生界;古双峰-笔架碰撞造山带;山根拆沉;造山带解体

中图分类号:P736.1 **文献标识码:**A **文章编号:**0256-1492(2017)06-0012-13

1 南海成因研究现状与简评

关于南海的成因,存在着许多种观点。因为这个问题很重要,它既是西太平洋边缘海动力学研究的重要部分,又是特提斯、太平洋两大超级构造域相互作用的动力学研究的关键部分,所以,凡涉及上述研究的国内外地质学者都会关注南海成因问题;但它又是一个很复杂的问题,周边诸多板块的相互作用形成错综复杂的岩石圈构造格局,内部诸多地块长期的、多期次的构造运动形成的复杂的演化历史,人们很难从各自的关注角度掌握南海地区地质全貌,因而也就很难得出一致的南海成因观。故此,南海的成因一直到今天都是南海及周围区域大地构造研究的热点问题。本文拟在总结前人研究成果的基础上,依据笔者近年来对南海海底地质构造综合解析的新成果,提出了南海的“山根拆沉成因观”并展开论证。

前人的南海成因观归纳起来分两大类:早年的非板块观和板块学说以来的板块观。

1.1 南海成因的非板块观

我国最早论及南海成因的当属地质力学成因

基金项目:国家自然科学基金项目(41776072, 41476039, 91328205, 41576068)

作者简介:刘海龄(1958—),男,研究员,博导,主要从事南中国海和东南亚区域大地构造研究, E-mail: liuh82@126.com

收稿日期:2017-11-30; **改回日期:**2017-12-15. 文凤英编辑

观,将南海的形成归因于新华夏构造体系第一沉降带^[1]。随后相继的还有镶嵌学说成因观(外太平洋构造带的东海-南海波谷带)^[2]、多旋回构造成因观(南海地台开裂扩张的产物)^[3-5]、地洼学说成因观(上地幔的隆升扩散和下降凝聚造成陆缘活化的结果)^[6]、断块构造成因观(大洋岩石圈俯冲时大陆岩石圈边缘的仰冲导致弧后拉张)^[7]、涌动构造说(Surge-tectonics)^[8]。这些相对早期的观点,逐步被后来板块构造说的众多观点所涵盖或修正。

1.2 南海成因的板块观

板块构造说的众多南海成因观又可大致分为地幔主动扩张观和周边板块相互作用被动观两大类。

1.2.1 地幔主动扩张观

地幔主动扩张观包括菲律宾弧后扩张说^[9,10]、热底辟说^[11,12]、沟-弧-盆系说^[13](强调次生地幔对流的影响)、潜没的中央海岭说、三叉点说、孤立地幔热源说^[14]、热区迁移说^[15]、弧间扩张说等多种说法,它们大同小异,基本上都认为南海的打开是地幔物质上涌所致。龚再升等^[16]和李思田等^[17]认为南海及其边缘盆地的形成与地幔柱及侧向地幔流有关,地幔柱引起的局部对流和岩石层底部的摩擦力导致大面积的伸展可以解释南海不同方向、不同构造部位的盆地在古近纪同期伸展的构造现象。岩石学及地球化学研究认为:包括华东南沿海、台湾、澎湖、菲律宾等地的环南海地区存在一个杜帕尔(Dupal)型的异常地幔域^[18-22],支持该区存在地幔热柱的可能性^[22-23]。黄福林认为南海海盆形成过程为地幔上

拱、地台裂隙,陆壳下沉到热的上地幔中,地幔岩取代原有的陆壳而形成新的洋壳^[5]。其中的弧后扩张观认为引起弧后扩张的原因是俯冲岩石圈片摩擦产生的热导致其附近的上地幔熔融上升或者是从大陆流向岛弧的地幔流行至岛弧后面地区时,因受消亡着的岩石圈片的阻挡而向上流动,结果引起海底扩张,其共同的特点是弧后海底扩张轴与消亡带的走向近于平行且紧邻岛弧的后方。

有学者从地热学、流变学、重力学等方面综合考察岩石圈板块运动与地幔物质流动之间的相互关系及构造演化的动力学机制,认为地幔对流对中央海盆扩张轴和北部边缘盆地基底的热流及构造活动影响明显。南海中央海盆洋壳层内垂向热流变化不大,但垂向温度变化较大,这是地幔上涌所致。海盆内成片分布的地热区,则是局部地区地幔上涌,导致多期次、多方向海底扩张的反映^[24,25]。

不支持弧后扩张模式的一些地质事实有:

(1)南海东部海盆的扩张脊走向为近东西向,它与菲律宾弧呈近 90 度相交,这与典型的弧后扩张盆地的伸展应力模式存在较大区别。如果真是弧后扩张,那么,南海海底扩张中心应与最邻近的来自菲律宾海板块的消亡带——菲律宾岛弧的走向相平行,即扩张轴走向应为近南北向,而不应该是现在实际所呈现的近东西向。也有学者认为南海的形成与印度洋-澳大利亚板块向北漂移并俯冲于欧亚板块之下的机制相关^[26]。但是,在南海海底扩张开始之时,印度洋-澳大利亚板块向北俯冲于现在的苏门答腊-爪哇海沟附近,从那里到南海的扩张中心尚有 3000 多千米的距离,板块俯冲作用能足以使如此远的地方产生海底扩张吗^[27]? 更何况在南海扩张期间,在其扩张中心与爪哇俯冲带之间的南沙海槽附近,曾发生过另外一个与爪哇俯冲带反向的俯冲带,从而使南沙地块以南的古南海向南俯冲于加里曼丹微陆块北缘之下。我们很难相信印度洋-澳大利亚板块的向北俯冲作用能越过古南海的南沙海槽俯冲带而使南沙地块北缘和华南大陆之间发生次生地幔对流,造成南海的扩张。所谓弧后盆地,空间上应该是紧邻岛弧的后方,可是,南海与苏门答腊-爪哇岛弧之间还隔着南沙地块、南沙海槽俯冲带、加里曼丹岛和爪哇海,很难认为南海应该属于苏门答腊-爪哇岛弧的弧后盆地。由此可见,若将南海归属于西太平洋边缘的沟、弧、盆系或印度洋-澳大利亚板块消亡有关的沟、弧、盆系,均似欠妥。到底是属于哪条岛弧之后的海底扩张,至今尚无令人信服的论证。

(2)南海地区地幔域地球化学特征表现出很强

的印度洋域的信息,几乎不存在太平洋板块俯冲的影响,因此有学者认为南海的形成与西太平洋板块运动无关^[18]。

与地幔上涌观不相符合的地质现象有:主动地幔活动产生的裂谷盆地在盆地形成早期应该存在区域性隆升和大规模的玄武岩火山活动^[28],但这种特征与南海北部白垩纪—古新世期间的地质构造特征不吻合,后者处于裂陷的开始阶段。南海海盆裂陷之前是否存在过区域性隆升尚有待进一步的研究,但存在过大规模的玄武岩火山活动是可以肯定的,因为国际大洋发现计划(IODP)2017 年第三次南海大洋钻探的 IODP367 和 368 两个航次研究发现,南海是岩浆喷涌后快速形成的,与以往一些科学家们认为南海的形成是一个缓慢的过程的看法不同^[29]。此外,尽管南海及邻区的火山岩中橄榄石斑晶的 100Mg/(Mg+Fe)值(即 Fo)含量达 90.7%,表明火山岩可能是海南地幔柱活动的产物,但南海及邻区新生代火山岩的时空分布也可能与南海扩张过程中洋中脊对地幔柱的抽吸作用有关,南海海盆火山岩可能不是典型的洋中脊玄武岩(MORB),华南大陆边缘-南海海盆的过渡带不具备火山裂解边缘的特点,显然,地幔柱活动与南海张开之间的关系尚需进一步的研究^[30]。

此外,还有学者认为,南海地区的地球动力学、南海海盆周边地球物理和地质构造特征、南海海盆的空间规模诸方面难以支持南海“扩张成因说”,应该放弃^[31]。热流在南海洋盆和大陆坡交界附近出现高值和在北部的坡麓处出现几处大洋型地壳,以及南海洋盆内有零星陆壳分布等,也多是板块构造学说不易解释的。

1.2.2 周边板块相互作用被动观

代表性的观点包括“碰撞-挤出-拉张”模式^[32,33]、大西洋型海底扩张模式^[34-36]、陆缘扩张成因观^[37]、右行陆缘裂解成因说^[38]、俯冲后撤观^[39]。

对“挤出模式”的不同看法:Miyashiro 曾提出印藏碰撞产生的能量主要被亚洲内部地壳的缩短作用所消耗^[40],红河断裂带走滑作用晚于地壳加厚作用,且在 30 Ma 以后的左行位移不超过几十千米^[41]。这些物质流很少影响到东南亚和中国东部。最近的 GPS 资料分析和研究^[42]表明,红河地区和南海西北部向东南逃逸的成分,最多只能占喜马拉雅碰撞挤出的 25%,因此导致南海 700 km 扩张的可能性不大。位于红河走滑变形带中的莺歌海盆地的同期沉积体系中没有发育能与南海晚渐新世—早中新世期间近 700 km 海底扩张相匹配的大位移

量走滑变形^[43,44]。

对大西洋型海底扩张模式的质疑：

如果沿黄岩海山链为扩张轴对称扩张,那么在重力场上沿黄岩海山链应有高重力异常,但实际上并不存在沿扩张轴的高重力异常。在南海海盆的范围内难以形成地幔对流并造成海底扩张^[45]。

南海海盆磁条带不同于一般的由于海底扩张和地磁极倒转所形成的磁条带。因为它的线性特征不典型,也不都是平行或近乎平行,有的相互之间有较大的夹角,即便同一条磁条带也有多处弯曲,甚至沿同一纬度可见正负磁异常相接的现象,这与大西洋型海底扩张是相矛盾的。张训华等^[45]认为南海海盆中的磁条带应是海盆形成过程中不同时期岩浆沿断裂多次侵入所造成的。

现有的动力学模式或者仅仅强调了其中一个因素的影响(弧后扩张模式和挤出模式),或者完全否定板块相互作用产生的应力传递对南海构造活动的影响(地幔柱活动模式),而将动力归于地幔柱。

此外,现有模型注重的仅仅是地幔对流作用及其引发的岩石圈板块以软流圈顶面为单一滑面的运动以及板块边界力的远程效应。

2 南海最大可能的成因——山根拆沉观

由上可知,南海成因的动力学背景非常复杂,动力因素既有东侧太平洋板块俯冲、菲律宾板块楔入的影响,又有西侧印度洋板块斜向俯冲、洋中脊俯冲,甚至有北侧青藏高原隆升、大陆块体挤出的影响;同时,深部底侵、拆沉、地幔柱、地幔水化过程等地幔动力学背景也不可忽视^[46]。多种成因观众说纷纭,不同学者从不同角度、用不同方法来研究同一个南海形成演化现象,能得到更客观和更深刻的认识,好比“盲人摸象”,用不同方式摸得多了,南海成因的这个超级“大象”的“形态”也能慢慢呈现出来。这是百花齐放、“多信使”时代带来的好局面。

既然现有的动力学模式在解释南海的基本地质特征方面都遇到一定的困难,那么到底还有没有别的成因机制可以解释南海的扩张?不难看出,单是“跳出”南海看南海,舍其南海本身的地质特征和周边紧邻地质环境于不顾,而去万里之外寻找弧后扩张是不科学的做法,难免会出现“隔靴搔痒”之牵强。只有“扎进”南海的内部方可摘取南海成因之“真谛”。众所周知,决定事物发生发展的是内因。虽然每一事物的运动都和它周围其他事物互相联系着和

互相影响着,但一切事物的发展都是事物内部运动的必然结果,事物发展的根本原因不是在事物的外部而是在事物的内部,在于事物内部的矛盾性,即“外因是变化的条件,内因是变化的根据,外因通过内因而起作用”。构造运动的根本原因来自地球内部,地球上的一切构造现象,都是构造运动的结果,而我们所能直接观察到的都属表面现象。如何透过现象抓住实质,找出何者是生成现象的内因,何者是外因;在多种因素的作用下,何者是主要因素,何者是次要因素;勿把条件当根据,这才是研究南海成因值得遵循的原则。

笔者曾提出南海成因的“拆沉”机制^[47]。其实这在当时仅仅是一个猜想,一个并不严谨的猜想,因为当时尚未发现能诱发拆沉作用的“硬件”——具有被拆沉山根的造山带的构造变形形迹的直接证据(图1)。近年来,笔者通过对国家自然科学基金委资助的数个项目的研究,对南海前新生代基底构造进行了系统分析和解析后,发现了南海地区中生代晚期曾存在一个中轴大致沿现今双峰-笔架海山连线位置展布的碰撞造山带——古双峰-笔架碰撞造山带,从而为南海成因“拆沉观”的建立找到了关键的依据。

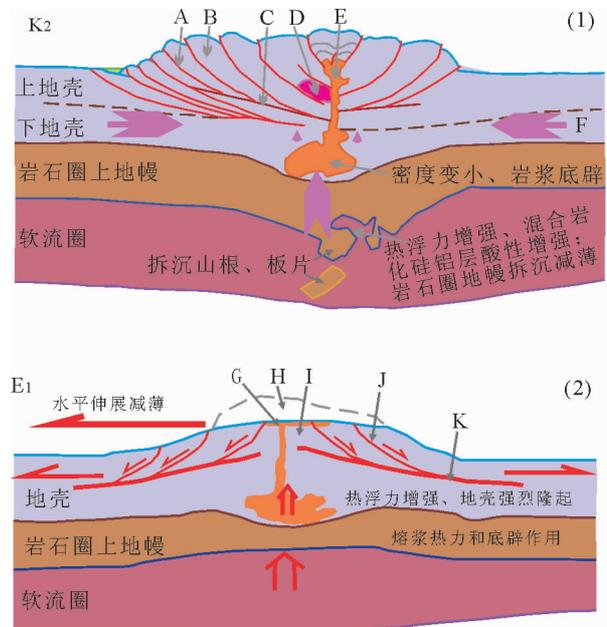


图1 南海成因“山根拆沉观”示意图

- A. 逆冲断层; B. 逆冲推覆体; C. 巨大的构造滑脱面;
- D. 原地型花岗岩; E. 侵入花岗岩; F. 碰撞带地壳缩短增厚;
- G. 地壳压力降低, 岩浆侵入或喷出; H. 剥蚀; I. 核部隆起;
- J. 造山带两翼正断拆离; K. 构造拆离面

Fig.1 Schematic diagram of the origin of the South China Sea : “a new mechanism of mountain root delamination”

3 古双峰-笔架造山带的发现

为了寻找南海形成的内部原因,笔者对一批关键性的地震剖面进行了详细的地层-构造解释,这些剖面包括南海北缘的 97301、79pr1884、ZZZ15、08e31374、ZZ07、91ec2534、dongsha-nh32a + nh32 和过 LF35-1-1 井的 a-b 测线(图 2)和南缘的 07ns-6、NH973-02、973-1、02N02、90N9 等测线(图 3)。

上述的南海北部陆缘地震剖面显示中生界明显发育向北逆冲推覆的褶皱-断层构造特征。如 97301 测线地震剖面显示中生代地层受构造活动影响,呈现出一系列逆冲推覆构造。79pr1884 测线剖面走向为北西—南东,经过珠一坳陷、东沙隆起,地震剖面中显示中生代地层与上覆新生代地层呈角度不整合接触,中生界内部存在较为明显的逆冲推覆构造(图 4)。ZZZ15 测线剖面走向为北西—南东向,穿过珠江口盆地的北部断阶带、陆丰凹陷、东沙隆起等,地震剖面中亦显示中生界内部存在较为明显的逆冲推覆构造。08e31374 测线剖面走向为北西—南东,反映珠江口盆地东南部中生界内部存在逆冲推覆构造。过 LF35-1-1 井的 a-b 地震剖面,位

于潮汕坳陷内,地震剖面中同样显示中生界内部存在明显的向北—北西逆冲的推覆构造^[48,49](图 5)。

南海南部陆缘的地震剖面则显示出中生界向南逆冲推覆的褶皱-断层构造特征。南海南部礼乐地块东侧北西向的 NH973-02 测线剖面上也可看到由西北向东南方向逆冲推覆的褶皱-断裂构造。南海南部礼乐地块西侧的 07ns-6 测线地震剖面中显示中生代地层褶皱变形强烈,并存在明显的由北向南逆冲推覆的褶皱-冲断构造(图 6)。南沙海域中部:一整套的中生代地层呈宽缓状,被一系列断裂分割形成一定的高角度,与上覆地层呈明显的角度不整合接触,同样反映了中生代时期发生的挤压褶皱作用,褶皱强度稍弱于西部。南沙中西部 90N9 地震剖面中可见中生界发育隐伏褶皱构造,反映了南沙海域中部由于中生代的挤压作用而形成的褶皱,褶皱顶部剥蚀,伴生冲断断层,中生代底面 T_m 为基底滑脱面。南沙海域西部,中生界的褶皱作用明显,其褶皱轴走向近 EW 向,同断裂分布走向呈现一定的相关性。从 91N14 地震剖面东南段可看出中生界的褶皱作用至少发生过两次,一是新之前,一是新生代期间。

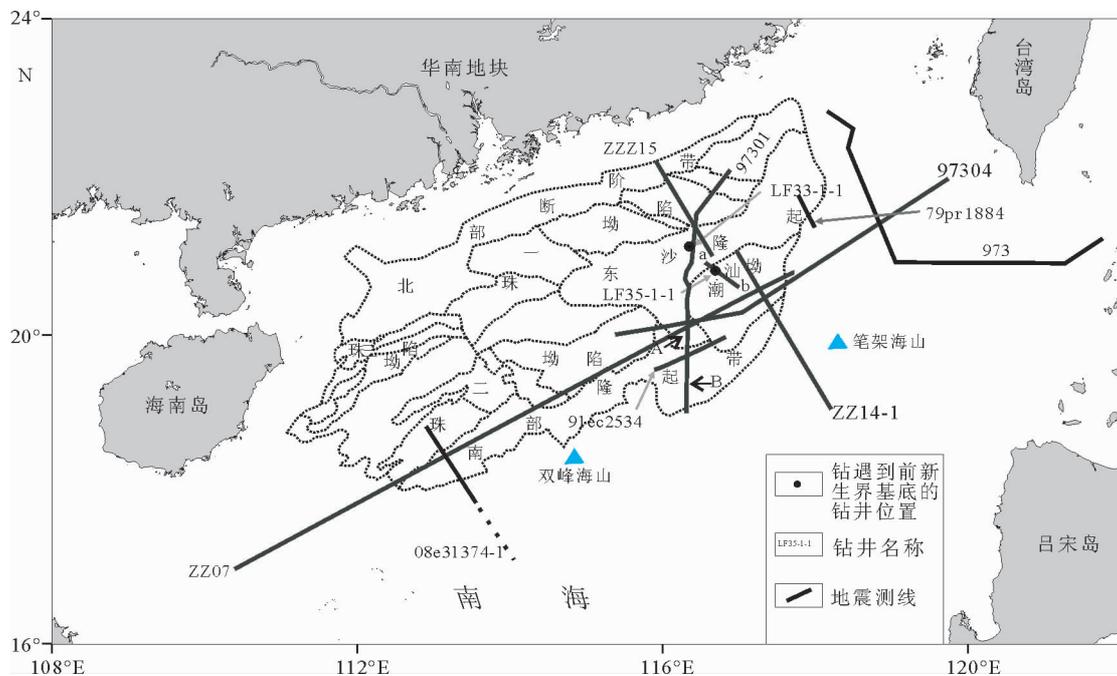


图 2 用于本文分析的南海北缘地震测线分布图

1. 双峰海山; 2. 笔架海山

Fig. 2 Distribution map of seismic lines in the northern South China Sea referred in this paper

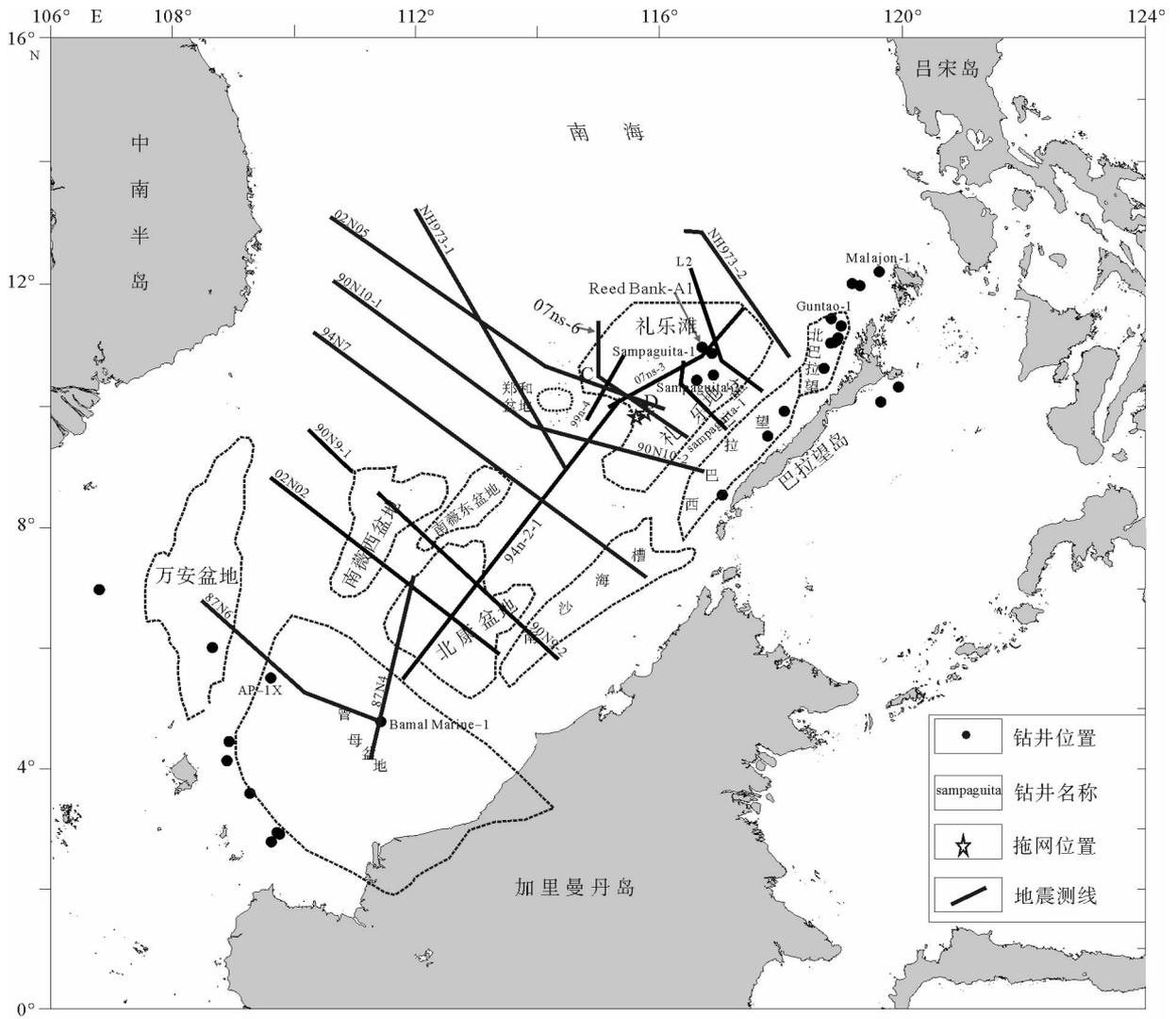


图3 用于本文分析的南海南缘地震测线分布

Fig. 3 Distribution of seismic lines of the southern South China Sea referred in this paper

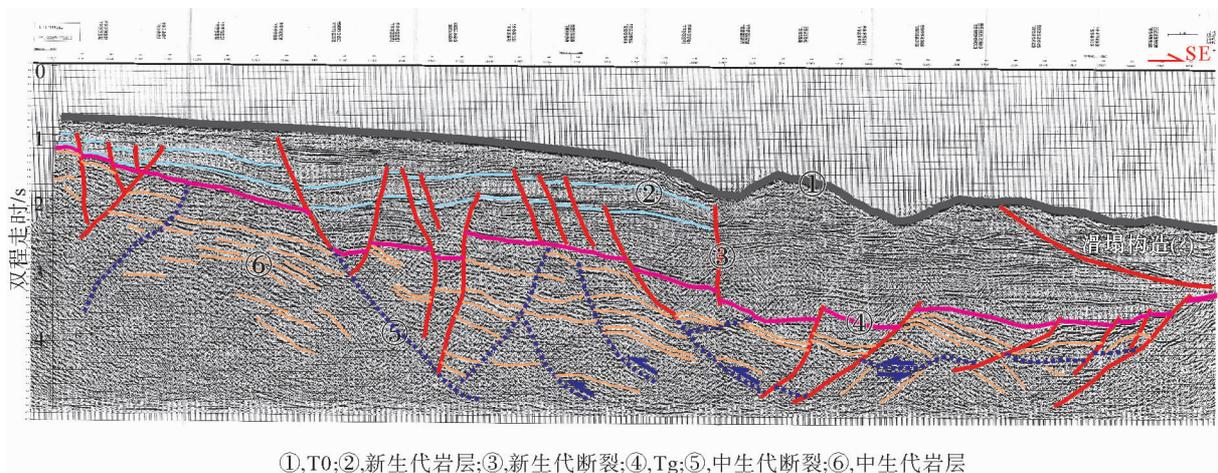


图4 南海北缘79pr1884地震剖面及其地质解释

Fig. 4 Seismic profile 79pr1884 and its geological interpretation in the northern South China Sea

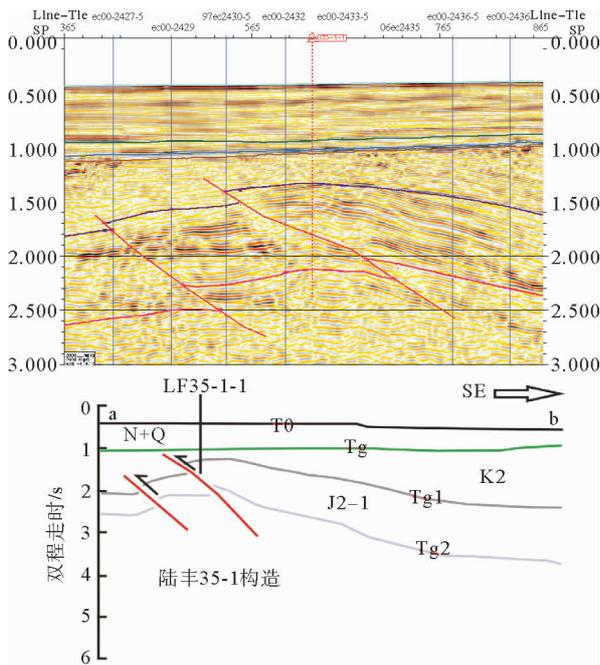


图 5 南海北缘过 LF35-1-1 井的 a-b 地震剖面及其地质解释

过 LF35-1-1 井地震剖面,位于潮汕坳陷,在地震剖面上,
 T_g—T_{g1}(白垩纪)、T_{g1}—T_{g2}(中晚侏罗世)
 之间地层地震反射特征迥然不同:T_g—T_{g1}之间地层为断续、
 中低频、变振幅反射,反映地层沉积的不稳定性;T_{g1}—T_{g2}
 之间地层为高连续、低频、强振幅反射

Fig. 5 Seismic profile a-b across well LF35-1-1 and its geological interpretation in the northern South China Sea

由上述南、北陆缘中生界冲断-褶皱构造的发育特征来看,在现今南海未打开之前,南北陆缘的冲断-褶皱构造曾经应该是连在一起的,共同组合成分别向南向北冲断的背冲式冲断-褶皱系。此乃碰撞造山带的典型构造样式,亦是迄今为止南海地区前新生代存在造山带最为直接的构造依据,故笔者依此推断了南海南北陆缘之间在中生代晚期曾存在过一碰撞造山带——古双峰-笔架碰撞造山带,其主体

中轴位置大致沿现今双峰-笔架海山一线展布,故而得名。

4 古双峰-笔架碰撞造山带的去根拆沉与南海的打开

古双峰-笔架碰撞造山带作为华南大陆边缘晚中生代形成的一个重要的大地构造单元,为何现在并不见它的雄峰而仅见零星的冲断-褶皱构造残存于新生界之下、取而代之却是浩瀚的南海呢?这正是笔者下文要重点阐述的主题:山根拆沉导致南海打开。

在碰撞造山的地区,由于密度较大的岩石圈地幔覆于密度较小的软流圈地幔之上将造成对流,会使岩石圈地幔沉入软流圈中,并使得岩石圈减薄;造山过程中由于地壳加厚,造山带地壳下部(大于 40 km)将形成榴辉岩,榴辉岩和地幔岩石在 600 MPa 和室温下的密度分别为(3.43±0.11) g/cm³和(3.29±0.02) g/cm³;基性岩浆底侵于下地壳底部和下地壳部分熔融产生的残余体,经过麻粒岩相变质作用同样会获得较高的密度(3.3~3.6 g/cm³),由榴辉岩和基性麻粒岩组成的下地壳在重力上亦是稳定的,将沉入地幔;洋壳在俯冲至大陆以下的过程中,在一定深度条件下也会相变为榴辉岩,造成俯冲的洋壳板片沉入地幔。这四种因素造成造山带地壳-岩石圈根-下地壳-俯冲板片的拆沉作用。拆沉作用诱发相应的软流圈上涌至壳-幔边界,使下地壳、岩石圈地幔和软流圈三者发生物质交换,引起岩浆作用、山脉隆升、岩石圈伸展、山体垮塌,形成裂谷-坳陷盆地-海底扩张。拆沉作用(delamination)是底侵作用(underplating)之外又一倍受地质、地球物理和地球化学家们共同重视的壳-幔交换过程,被用来解释软流圈、岩石圈地幔和地壳三者之

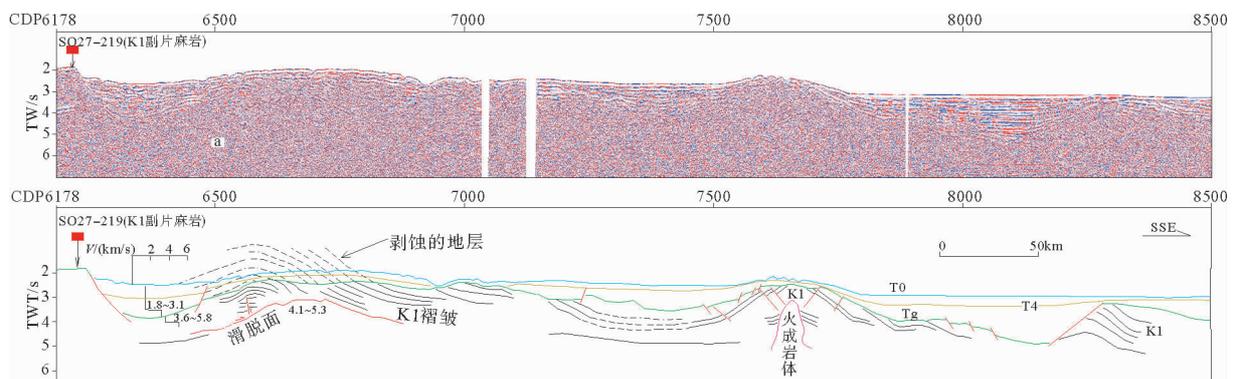


图 6 07ns-6 测线地震剖面及其地质解释

Fig. 6 Seismic profile 07ns-6 and its geological interpretation

间的物质交换以及随之而造成的山脉隆升、盆地形成过程和陆内大规模岩浆作用等现象。

近年来,越来越多的火成岩、同位素地球化学、地热和地球物理研究成果表明,南海地区在中、新生代之交发生过岩石圈根拆沉作用。

4.1 南海地区火成岩地球化学具有拆沉作用特征

燕山期的安第斯型广东陆缘,其地壳-上地幔因古板块(古特提斯洋板块)的俯冲挤压和幔源岩浆的深成增生而缩短增厚。进入晚白垩世后,该陆缘区水平挤压应力松弛,原俯冲下去的大洋板片及过厚的岩石圈下部便在重力拖拉等因素作用下发生拆沉作用及去根作用^[47],导致具有拆沉作用特征的岩浆活动的广泛发生。

南海及邻区新生代的火成作用一般被分成3期。南海张开之前的岩浆活动(64~35 Ma),主要局限在南海北缘和华南沿海一带,以双峰式火山岩为基本特征^[49-51]。南海北缘早期岩浆活动性质反映其处于一个伸展的构造背景,可以很好地响应古双峰-笔架碰撞造山带的去根-拆沉-软流圈地幔底侵效应。类似于冈瓦纳大陆裂解时地幔柱的作用。南海扩张期岩浆活动,在南海周边的分布非常少见,而主要分布于南海海盆。南海扩张期后(17或15.5 Ma以来)的岩浆活动,广泛分布于中央海盆、西南次海盆、海南岛、雷州半岛、泰国、越南等地,以碱性玄武岩为主,少数为拉斑玄武岩,尤其是17~8 Ma的岩浆活动性质主要呈现拉斑玄武岩系列,而8 Ma以来主要为碱性玄武岩系列^[50],具有洋岛玄武岩(OIB)地球化学特征,源于亏损地幔与II型富集地幔之间的混合地幔源(DM-EM2),这是经过部分熔融出岩浆后的地幔残留部分及壳幔相联系的交代成因的产物,显示杜帕尔(Dupal)同位素异常;EM2与上部陆壳有亲缘关系,可能代表了陆源沉积岩陆壳蚀变的大洋地壳或洋岛玄武岩的再循环作用,也可能是次大陆岩石圈进入地幔与之混合^[30]。茂名与三水盆地火成岩的年代学和地球化学研究表明,该盆地从92~38 Ma期间有近连续的火山喷发,并在56±2 Ma火山作用源区发生了急剧的转折^[18],同时还伴随一系列NE向左旋剪切伸展活动。此期伸展活动应是南海地区古双峰-笔架造山带岩石圈山根于新生代早期开始发生拆沉解体、软流圈热物质底侵作用在地表引发的构造效应。

前人对南海北部古近纪晚期—中新世超镁铁岩捕虏体的地球化学特征研究表明:由陆到海,Fe、Ti、K相对富集,稀土总量降低,Rd、Nd、Sr等同位

素值升高^[52],镧铈比值(La/Yb)_N比值也降低,为2.6~6.7^[53],表明地幔熔融增强^[54],发生了高温交代作用,与软流圈热物质上升、地壳减薄有关^[55],可视为拆沉作用的产物^[47]。

还有学者指出南海玳瑁海山火山角砾岩亦为具有过渡性质的拉斑玄武岩,K₂O+Na₂O含量较高(3.10%~4.98%),富集大离子亲石元素和轻稀土元素,具有位于E-MORB与OIB之间的稀土元素配分模式,ΣREE为(80~147)×10⁻⁶^[53],这与南海广泛分布的碱性玄武岩具有相似的构造环境,为南海扩张后的板内成因。南海中中新世的海山主要为拉斑玄武岩,而晚中新世以后则主要为碱性、强碱性玄武岩。说明南海陆缘存在古老的交代岩石圈地幔,在海盆扩张前后发生过拆沉及热化学减薄,使得软流圈中加入了富集相容元素组分,可能是玳瑁海山玄武岩富集组分的来源。

来自南海北缘新生代玄武岩中幔源包体橄榄岩的微量元素组成信息指示南海北缘地幔具有大陆裂谷型地幔的特征,表现为部分橄榄岩样品中较高含量(8%~12%)的单斜辉石(Cpx)中却含极低的Ti含量(<160 μg/g),同时主元素成分变化趋势及Cpx中的重稀土元素(HREE)的分异现象,也暗示该区上地幔经历了变压熔融。此外,始于深部的石榴子石稳定区并延续到浅部的尖晶石稳定区的地幔熔融总熔融程度达23%^[56],包体的平衡温度和橄榄石中Fo值呈负相关,岩石圈地幔成分具有分层结构,下部由大洋型橄榄岩组成,而地幔顶部为类似于太古宙—元古宙地幔的富斜方辉石方辉橄榄岩,这是岩石圈减薄和软流圈对老岩石圈的置换的结果。上述地球化学特征充分说明其与俯冲带之上的地幔楔或受俯冲作用影响的地幔有很大的差别^[56],有效地支持了南海海盆是造山带岩石圈深部的山根拆沉—软流圈地幔上隆—陆缘扩张引起的主动成盆的观点。

此外,对南海南、北大陆坡底的玄武岩单斜辉石进行研究的学者发现,其以顽透辉石为主(占3/4),位于深绿辉石区域内。基质微晶辉石比辉石斑晶更富钙、钛、铁,反映了岩浆演化向着富钙、钛、铁方向发展,且碱度逐渐降低。由单斜辉石-熔体平衡温压计计算的岩浆房深度分别为:碱玄武岩岩浆房约49 km,粗面玄武岩岩浆房约25 km;玄武岩岩浆房约15 km。由碱玄武岩→粗面玄武岩→玄武岩,平衡温度(K)依次降低,从1535~1498→1429→1369^[57]表明南海新生代玄武岩为板内碱性玄武岩,可能是山根拆沉诱发软流圈热物质柱在上升过程中在不同深

度处发生部分熔融并伴随有分离结晶作用等物理化学过程的连续演变的产物。

近年有学者研究华南陆区距离南海最近的中新生代三水盆地的岩浆活动特征,亦反映出与海区相似的特征,属板内裂谷成因,始新世各类火山岩均呈板内深源性质,说明地幔上涌曾是南海北部陆缘破裂的基本方式。早始新世(约 53Ma)粗面岩具备部分高场强元素(HFSE)(Nb、Ta、Zr、Hf 等)、大离子亲石元素(LILE)的富集和明显的 Sr、Ba、Eu 负异常,加之较高的 Nd 同位素比值(0.51279 ~ 0.51293)和较低的 Sr 同位素比值(0.70461 ~ 0.71088)^[58],表明为幔源岩浆结晶分异成因。中始新世(约 53 Ma)玄武岩以富含橄榄石斑晶和贫 Si 为主要特色,与粗面岩构成陆内裂谷阶段火山活动鼎盛期的强碱性-碱性岩浆组合;晚始新世末期(约 36 Ma)玄武岩表现为指示陆内裂谷演化达到成熟阶段的拉斑玄武岩,反映陆内裂谷演化至成熟阶段,其碱性成分的消失代表南海海盆打开的前兆。它们来自 DM 与 EMI 两个端元混合的同一源区,岩浆产生于软流圈地幔甚至更深的部位,指示南海最初诞生于地幔上涌的主动裂谷作用,与海区的火成岩一样,都是山根拆沉机制的反映。

4.2 南海热流特征支持山根拆沉观

一些学者的研究表明,南海北部陆缘具有普遍偏高的大地热流和地温梯度,大地热流总体表现为由陆架向洋盆方向递增的趋势,平均为 75 mW/m²,其中绝大部分为来自地幔热流的贡献^[59]。岩石圈具有温度高、强度低和强烈流变分层等特征,且下地壳表现为韧性流动变形。经稳态温度场计算的南海北部中、下陆坡热居里深度比磁反演得到的磁居里深度深,说明地热处于不平衡状态,地热状态受控于地壳拉张减薄和莫霍面抬升的构造格局^[60]。莫霍面温度亦较高,从陆架向海盆方向,深部地温越来越高。南海北部中、下陆坡莫霍面抬升恰恰反映了其为古双峰-笔架碰撞造山带岩石圈山根拆沉、软流圈地幔上隆作用的结果。

4.3 地球物理场特征佐证了山根拆沉机制的存在

南海南、北洋陆结合带的陆缘上均存在磁静区^[61],其中北缘的磁静区在磁异常图上位于陆架高值正磁异常带以南、海盆磁异常条带区以北。磁静区内存在磁性基底深度增加、居里等温面隆升、磁性层厚度减薄和莫霍面抬升的现象,其原因在于新生代早期陆缘地壳拉张减薄、拉张带内厚度较大而磁

化率极小的中生代和新生代地层、地壳的拉张使磁性基底变深、重力均衡使地幔热物质向上运移填充、莫霍面抬升、深部高热物质使上覆磁性层发生热退磁、居里等温面抬升、磁性层厚度更加减薄、底侵的高温物质在局部区域降温冷却使上覆地层叠加反向磁化,诸种因素的综合作用导致了磁静区的产生^[62-63]。上述诸因素的出现恰恰就是古双峰-笔架碰撞造山带的拆沉-塌陷过程的结果。

此外,层析成像研究证实研究区存在巨型复蘑菇云状地幔低速体^[64],亦可归结于山根拆沉作用。山根拆沉促使地幔热流体上涌,底侵至地壳-岩石圈形成熔岩垫,成为下地壳厚达 8 km 的高速层^[65],并导致区域性熔融、抬升、剥蚀、减薄^[66]和断陷,最终导致海底扩张。

5 古双峰-笔架碰撞造山带山根形成-拆沉过程

在晚古生代的泥盆纪—早二叠世(D-P₁)期间,在欧亚大陆与冈瓦纳大陆之间发育广阔的古特提斯洋,这是一个“不干净”的大洋,即其大洋中包含众多陆块岛体,属于多岛洋体系。此时南沙—礼乐地块等位于古特提斯的南缘、冈瓦纳大陆的北部,而华南板块位于欧亚大陆南缘。晚二叠世—早三叠世时期(P₃-T₁),冈瓦纳大陆北缘中特提斯开始打开并出现古南海,南沙—礼乐地块随中特提斯的不断扩张而不断向北漂移。

中三叠世(T₂)开始,中特提斯的打开造成古特提斯从西到东开始俯冲消亡。先是琼中地块和三亚地块之间的琼南海盆在存续 150 Ma 后于中三叠世基本消亡^[67],后是位于古特提斯的东段、礼乐地块北面残留着的部分古特提斯洋盆(即“古礼乐北海盆”)于晚三叠末(T₃末)开始俯冲消亡(图 7A)。

在早侏罗世—早白垩世(J₁-K₁),来自礼乐地块南部的古南海向北的扩张使古礼乐北海盆向华南板块之下消亡殆尽,古双峰-笔架俯冲带的俯冲挤压作用接近尾声(图 7B)。

晚白垩世(K₂),古双峰-笔架俯冲带变成了礼乐地块等向华南陆缘碰撞拼贴的缝合带,碰撞方向呈 NNW—SSE 向,形成古双峰-笔架碰撞造山带(图 7C)。碰撞的结果造成:①珠江口盆地古地形要高于琼东南盆地,T_g'面埋深呈现珠江口盆地高、琼东南盆地低的形态。②造山带从翼部到核部,沿 NEE 方向宽度向东逐渐增大,在靠近核部位置(大致为潮汕残留凹陷)处宽度达到最大。③在靠近造山带核

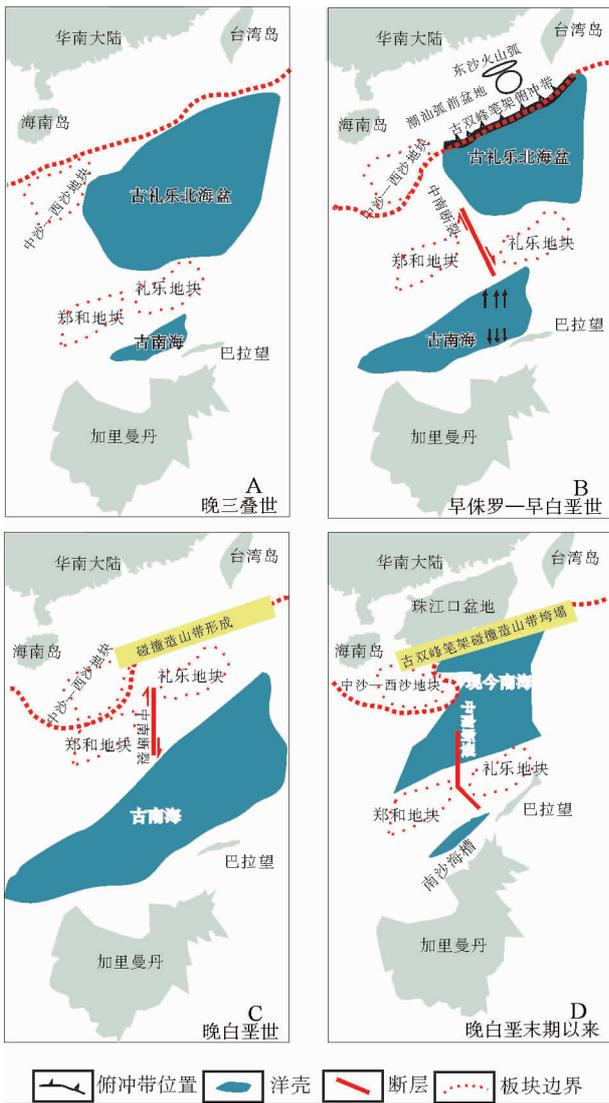


图7 古双峰-笔架碰撞造山带山根形成-拆沉过程与南海的打开

Fig. 7 Process of mountain root delamination of ancient Shuangfeng-Bijia

collision orogenic belt and opening of the South China Sea

部位置的中生代地层发生强烈挤压,发育 SSE—NNW 向挤压所致的逆冲断层和褶皱,向北至华南陆地方向构造变形减弱。④在礼乐滩上及其南部中生界分别发育向北逆冲的较大规模逆冲断层带和宽缓的褶皱带,并且变形程度向南逐渐减弱^[68,69];礼乐滩北部陆缘(现今洋陆过渡带位置)的中生代地层受碰撞造山作用影响发育由北向南的构造逆冲(图6)。

晚白垩世末期(K₂末),古南海停止扩张。来自礼乐地块南面的推挤力消失,受风化剥蚀作用的影响,造山带上地壳不断减薄;同时深部岩石圈山根及原俯冲的板片,受地幔热蚀作用而发生拆沉作用,沉

陷到下伏热地幔中,拆沉带周围的热地幔物质乘隙上侵到山根和俯冲板片原来占据的空间,进而造成上部地壳进一步隆升并发生伸展构造作用,岩石圈强烈减薄,造山带开始塌陷。碰撞拼贴缝合带由于两侧地体的差异性和焊接程度不高而成为最易重新裂开、岩石圈强度最为薄弱的地方。因此,造山带塌陷-解体时伸展最强烈的位置、垮塌最为强烈的位置也是造山期变形最为强烈的地方——相互碰撞地块间的缝合带,此时残留的造山带在南海北部陆缘几何形态表现为西低东高、南低北高^[68,69]。进一步的伸展拉张导致南海北部陆缘破裂,出现裂谷,南沙—礼乐地块开始裂离华南大陆,古南海向巽他-加里曼丹陆块之下俯冲(图7D)。

古近纪以来,南海北部陆缘东段所在位置靠近核部,伸展作用强烈,拉张出现洋壳,发生海底扩张。往西至翼部,伸展拉张作用减弱,形成西沙海槽,海槽两侧地壳结构相似,南北对称分布,呈中间薄、两边厚的典型拉张裂谷特征^[70,71]。伴随着南海的形成,南沙—礼乐地块开始向南飘移。同时古南海伴随着南海的扩张而加速消亡于巽他-加里曼丹陆块之下,在南海南部地区形成了卢帕尔线蛇绿岩带和一系列俯冲增生带,只剩下现今的南沙海槽。

6 结论

(1)南海南北陆缘前新生代基底中生界背冲式冲断褶皱构造组合为南海地区中生代晚期古双峰-笔架碰撞造山带的存在提供了直接的证据。

(2)古双峰-笔架碰撞造山带于中生代末发生了山根拆沉作用。

(3)古双峰-笔架碰撞造山带的山根拆沉作用是南海形成的直接原因。

南海古双峰-笔架碰撞造山带是冈瓦纳古陆碎块裂离-漂移、特提斯消亡和东南亚增生、南海形成过程的“见证者”和“参与者”。

参考文献 (References)

[1] 李四光. 地质力学概论[M]. 北京: 科学出版社, 1973. [LI Siguang. Introduction to Geomechanics [M]. Beijing: Science Press, 1973.]

[2] 张伯声, 王战. 地壳的波浪状镶嵌构造与地震[J]. 西北地震学报, 1980; 2(2): 3-15. [ZHANG Bosheng, WANG Zhan. Wavy crustal mosaic structure and earthquakes [J]. Journal of northwestern Seismological, 1980, 2(2): 3-15.]

[3] 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等. 中国大地构造及其演化[M].

- 科学出版社, 1980. [HUANG Jiqing, REN Jishun, JIANG Chunfa, et al. The Geotectonic evolution of China[M]. Beijing: Science Press, 1980.]
- [4] 杨巍然, 郭铁鹰, 路元良, 等. 中国构造演化中的“开”与“合”[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1984, 9(3): 39-53. [YANG Weiran, GUO Tieying, LU Yuanliang, et al. The “opening” and “closing” of the tectonic evolution of China[J]. Earth Science - Journal of China University of Geosciences, 1984, 9(3): 39-53.]
- [5] 黄福林. 论南海的地壳结构及深部过程[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1986, 6(1): 31-42. [HUANG Fulin. On crustal structure and plutonic processes of the South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1986, 6(1): 31-42.]
- [6] 刘以宣. 一种新型地洼区——南海大地构造演化概述[J]. 大地构造与成矿学, 1984, 8(2):194-200. [LIU Yixuan. New type of diwa region—on the geotectonic evolution of the South China Sea[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1984, 8(2):194-200.]
- [7] 张文佑. 中国及邻区海陆大地构造[M]. 北京: 科学出版社, 1986. [ZHANG Wenyu. Marine and Continental Geotectonics of China and its Environs. Beijing: Science Press, 1986.]
- [8] Meyerhoff A A. Surge-tectonic evolution of southeastern Asia: a geohydrodynamics approach[J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1995, 12(3):145-247.
- [9] Karig D E. Origin and development of marginal basin in the western Pacific[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76: 2543-2561.
- [10] Karig, D E. Plate convergence between the Philippines and Ryukyu Islands[J]. Marine Geology, 1973, 14: 153-168.
- [11] Hilde T W C, Uyeda S, Kroenke L. Evolution of the western Pacific and its margin[J]. Tectonophysics, 1977, 38(1): 145,155-152,165.
- [12] Uyeda S. Some basic problems in trench-arc-back-arc-system [C]// In: Talwani, M., Pitman, W C (Eds). Island arcs, Deep Sea Trenches and Back Arc Basins, Maurice Ewing Ser. American Geophysical Union, 1977: 1-14.
- [13] 郭令智, 施央申, 马瑞士, 等. 华南大地构造格架和地质演化[C]//第26届国际地质大会国际交流学术论文集. 北京: 地质出版社, 1980: 109-116. [GUO Lingzhi, SHI Yangshen, MA Ruishi, et al. Tectonic framework and geological evolution of South China [C]// In: 26th International Geological Congress Proceedings. Beijing: Geological Publishing House, 1980: 109-116.]
- [14] 张用夏. 东亚中生代地幔热源活动与西太平洋边缘海的成因[C]//第二届全国海洋地质会议论文集. 1985. [ZHANG Yongxia. The relationship between Mesozoic-Cenozoic mantle heat activity of n East Asia and the origin of the western Pacific marginal sea[C]// In: Proceedings of the Second National Marine Geology Conference. 1985.]
- [15] Miyashiro A. Hot region and the origing of marginal basins in the western Pacific[J]. Tectonophysics, 1986, 122: 195-216.
- [16] 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997. [GONG Zaisheng, LI Sitian, XIE Taijun, et al. Continental margin Basin analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Northern South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1997.]
- [17] 李思田, 林畅松, 张启明, 等. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及10Ma以来的构造事件[J]. 科学通报, 1998, 43(8): 797-810. [LI Sitian, LIN Changsong, ZHANG Qiming, et al. Dynamic process of episodic rifting in continental margins in the northern South China Sea and structural events since 10Ma[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(8): 797-810.]
- [18] 朱炳泉, 王慧芬, 陈毓蔚, 等. 新生代华夏岩石圈减薄与东亚边缘海盆构造演化的年代学与地球化学制约研究[J]. 地球化学, 2002, 31(3): 213-221. [ZHU Bingquan, WANG Huifen, CHEN Yuwei, et al. Geochronology and geochemical constraint of Cenozoic extension of Cathenaysian lithosphere and tectonic evolution of the border Sea Bas in East Asia[J]. Geochimica, 2002, 31(3): 213-221.]
- [19] 朱炳泉, 王慧芬. 雷琼地区 MORB-OIB 过渡型地幔源火山作用的 Nd-Sr-Pb 同位素证据[J]. 地球化学, 1989, 18(3): 193-201. [ZHU Bingquan, WANG Huifen. Nd-Sr-Pb isotopic and chemical evidence for the volcanism with MORB-OIB source characteristics in the Leqiong area, China[J]. Geochimica, 1989, 18(3): 193-201.]
- [20] 解广轰, 涂勘, 王俊文, 等. 中国东部新生代玄武岩铅同位素组成的地理分布特征和成因意义[J]. 科学通报, 1989, 10: 772-775. [XIE Guanghong, TU Kan, WANG Junwen, et al. Geographic distribution and genetic significance of lead isotopic composition of cenozoic basalt in Eastern China[J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 10: 772-775.]
- [21] 范蔚茗, Menzies M A. 张裂环境火山作用的岩石圈地幔组分: 雷琼地区新生代玄武岩的地球化学证据[M]// 刘若新(主编). 中国新生代火山岩年代与地球化学. 北京: 地震出版社, 1992: 320-329. [FAN Weiming, Menzies M A. Lithospheric Mantle Components in the Cracked Environmental Volcanism: Geochemical Evidence of Cenozoic Basalts in Leqiong Area[M]// In: LIU Ruoxin, (Eds). Cenozoic volcanic rock age and geochemistry of China. Beijing: Earthquake Press, 1992: 320-329.]
- [22] 涂勘, 解广轰. 南海盆地新生代玄武岩的地球化学特征与 Dupal 型同位素异常区的成因讨论[M]// 刘若新(主编). 中国新生代火山岩年代与地球化学[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 169-284. [TU Kan, XIE Guanghong. Geochemical characteristics of the Cenozoic basalt in the South China Sea basin and discussion on the genesis of the Dupal-isotopic abnormal region [M]// In: LIU Ruoxin, (Eds). Cenozoic volcanic rock age and geochemistry of China. Beijing: Earthquake Press, 1992:169-284.]
- [23] 王贤觉, 吴明清, 梁德华, 等. 南海玄武岩的某些地球化学特征[J]. 地球化学, 1984, 4: 332-339. [WANG Xianjue, WU Mingqing, LIANG Dehua, et al. Some geochemical characteristics of the South China Sea basalts[J]. Geochimi-

- ca, 1984, 4: 332-339.]
- [24] 张健, 石耀霖. 南海中央海盆热结构及其地球动力学意义[J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21(3): 407-412. [ZHANG Jian, SHI YaoLin. Thermal Structure of Central Basin in South China Sea and Their Geodynamic Implications[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2004, 21(3): 407-412.]
- [25] 张健, 熊亮萍, 汪集暘. 南海深部地球动力学特征及其演化机制[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 602-610. [ZHANG Jian, XIONG Liangping, WANG Jiyang. Characteristics and mechanism of geodynamic evolution of the South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(5): 602-610.]
- [26] 何廉声. 南海新生代岩石圈板块的演化和沉积分布的某些特征[J]. 海洋地质研究, 1982, 2(1): 18-25. [HE LIANSHEN. Some Features of the Evolution and Sedimentary Distribution of the Cenozoic Lithospheric Plate in the South China Sea[J]. Marine Geology Research, 1982, 2(1): 18-25.]
- [27] 谢继哲. 对南海成因问题的探讨[J]. 海洋地质研究, 1982, 2(3): 1-10. [XIE Jizhe. Discussion on the origin of the South China Sea[J]. Marine Geology Research, 1982, 2(1): 1-10.]
- [28] Sengör A M C, B. A. Natal'in. Paleotectonics of Asia; fragments of a synthesis[C]//In: Yin A, (eds). The Tectonic Evolution of Asia, 1996: 486-640.
- [29] 周凯, 王焯捷. 中国科学家或改写南海成因[N]. 中国青年报, 2017-06-13. [ZHOU Kai, WANG Yejie. Chinese scientists may rewrite the cause of the South China Sea[N]. China Youth Daily, 2017-06-13.]
- [30] 徐义刚, 魏静娴, 邱华宁, 等. 用火山岩制约南海的形成演化: 初步认识与研究设想[J]. 科学通报, 2012, 20: 1863-1878. [XU Yigang, WEI Jingxian, QIU Huaning, et al. Controlling the formation and evolution of the South China Sea with volcanic rocks; preliminary understanding and research assumption[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 20: 1863-1878.]
- [31] 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.]
- [32] Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large scale continental tectonics[J]. Nature, 1976, 264: 319-324.
- [33] 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 Solid Earth, 1993, 98(B4): 6299-6328.
- [34] Ben-Avraham Z, Uyeda S. The evolution of the China Basin and the mesozoic paleogeography of Borneo[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1973, 18(2): 365-376.
- [35] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea basin[C]// In: Hayes D E(ed). The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands; Part 2: geophysical monograph series, vol 27. American Geophysical Union, Washington, D C, 1983: 23-56.
- [36] 姚伯初, 曾维军, Hayes D E, et al. 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 & USA[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994.]
- [37] 中国科学院南海海洋研究所地质构造研究室. 南海地质构造与陆缘扩张[M]. 北京: 科学出版社, 1988. [Geological Structure Laboratory, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. South China Sea geological structure and continental margin expansion[M]. Beijing: Science Press, 1988.]
- [38] 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.]
- [39] 张健, 石耀霖. 东亚陆缘带构造扩张的深部热力学机制[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(3): 222-227. [ZHANG Jian, SHI YaoLin. Thermodynamics mechanism of the marginal extensional belt of east Asia[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27(3): 222-227.]
- [40] Miyashiro A. Hot region and the origing of marginal basins in the western Pacific[J]. Tectonophysics, 1986, 122: 195-216.
- [41] Rangin C, Huchon P, Pichon X Le, et al. Cenozoic deformation of central and South Vietnam[J]. Tectonophysics, 1995, 251: 179-196.
- [42] Shen Z, Zhao C, Yin A, Li Y, et al. Contemporary crustal deformation in East Asia constrained by global pastionning system measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(B3): 5721-5734.
- [43] 郭令智. 华南板块构造[M]. 地质出版社, 2001. [GUO Lingzhi. The Plate Tectonics of South China. Beijing: Geological Publishing House, 2001.]
- [44] 孙珍. 南海莺歌海盆地海盆形成机制的物理模拟[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(2): 36-40. [SUN Zhen. Physical simulation of formation mechanisms of the Yinggehai basin, South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2001, 20(2): 36-40]
- [45] 张训华, 李延成, 蔡振华, 等. 南海海盆形成演化模式初探[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(2): 1-7. [ZHANG Xunhua, LI Yancheng, QI Zhenhua, et al. An approach to the formation and evolution model of South China Sea Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1997, 17(2): 1-7.]
- [46] 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 model of the South China Sea: problems, advances and controversies[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(6): 35-53.]

- [47] 刘海龄,杨树康,周蒂,等.南沙北部伸展构造的基本特征及其动力学意义[J].高校地质学报,1998,4(1):64-72. [LIU Hailing, YANG Shukang, ZHOU Di, et al. Basic characteristics of extension structure in northern Nansha islands, China, and its dynamical implications[J]. Geological Journal of China Universities, 1998, 4(1): 64-72.]
- [48] 姚伯初,张莉,韦振权,等.华南东部中生代构造特征及沉积盆地[J].海洋地质与第四纪地质,31(3):47-60. [YAO Bochu, ZHANG Li, WEI Zhenquan, et al. The Mesozoic Tectonic Characteristics and sedimentary basins in the eastern margin of South China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(3):47-60.]
- [49] 郝沪军,林鹤鸣,杨梦雄,等.潮汕坳陷中生界——油气勘探的新领域[J].中国海上油气(地质),2001,15(3):157-163. [HAO Hujun, LIN Heming, YANG, Mengxiong, et al. The Mesozoic in Chaoshan depression: a new domain of petroleum exploration[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2001, 15(3):157-163.]
- [50] 石学法,鄢全树.南海新生代岩浆活动的地球化学特征及其构造意义[J].海洋地质与第四纪地质,2011,21(2):59-72. [SHI Xuefa, YAN Quanshu. Geochemistry of the Cenozoic magmatism in the South China Sea and its tectonic implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 21(2): 59-72.]
- [51] 黄小龙,徐义刚,邱华宁.粤东新生代玄武岩:被动大陆边缘岩浆活动[J].高校地质学报,2013,19(增):145. [HUANG Xiaolong, XU Yigang, QIU Huaning. Eocene basalts in eastern Guangdong: magmatic activity on the margin of the passive continental margin[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(Supplement): 145.]
- [52] 邹和平,李平鲁,饶春涛.珠江口盆地新生代火山岩地球化学特征及其动力学意义[J].地球化学,1995,24(增):33-45. [ZOU Heping, LI Pinglu, RAO Chuntao. Geochemistry of the Cenozoic Volcanic Rocks in the Zhujiangkou Basin and its geodynamic significance[J]. Geochimica, 1995, 24(Supplement): 33-45.]
- [53] 任江波,王嘹亮,鄢全树,等.南海玳瑁海山玄武质火山角砾岩的地球化学特征及其意义[J].地球科学—中国地质大学学报,2013,38(S1):10-20. [REN Jiangbo, WANG Liaoliang, YAN Quanshu, et al. Geochemical characteristics and its geological implications for basalt in volcanoclastic rock from Daimao seamount[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2013, 38(S1):10-20.]
- [54] Kay R W, Kay S M. Delamination and delamination magmatism[J]. Tectonophysics, 1993, 219: 177-189.
- [55] Menzies M A, Rogers N, Tindle A G, et al. Metasomatic and enrichment processes in lithospheric peridotites, an effect of asthenosphere-lithosphere interaction[M] // Menzies M A, Hawkesworth C J. Mantle Metasomatism. London: Academic Press, 1987:313-361
- [56] 徐义刚,黄小龙,颜文,等.南海北缘新生代构造演化的深部制约(D):幔源包体[J].地球化学,2002,(3):230-242. [XU Yigang, HUANG Xiaolong, YAN Wen, et al. Constraints on Cenozoic tectonic evolution of the northern South China Sea (I): Mantle-derived inclusions[J]. Geochimica, 2002, (3): 230-242.]
- [57] 鄢全树,石学法,王昆山,等.南海新生代玄武岩中单斜辉石矿物化学及成因意义[J].岩石学报,2007,23(11):2981-2989. [YAN Quanshu, SHI Xuefa WANG Kunshan, et al. Mineral chemistry and its genetic significance of olivine in Cenozoic basalts from the South China Sea [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2981-2989.]
- [58] 张维.三水盆地陆内裂谷火山活动特征与南海早期演化[D].中国地质大学(北京),2013. [ZHANG WEI. Characteristics of continental rift volcanic activities in Sanshui Basin and the early evolution of South China Sea [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2013.]
- [59] 刘绍文,施小斌,王良书,等.南海成因机制及北部岩石圈热-流变结构研究进展[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(4):117-124. [LIU Shaowen, SHI Xiaobin, WANG Liangshu, et al. Recent advances in studies on the formation mechanism of the South China Sea and thermos-rheological structure of lithosphere in its northern margin: an overview [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(4): 117-124.]
- [60] 李守军.南海北部陆缘地热状态及其成因探讨[J].海洋学研究,2014,32(4):11-18. [LI Shoujun. Characteristics and genesis of the geothermal field in the northern South China Sea[J]. Journal of Marine Sciences, 2014, 32(4):11-18.]
- [61] 吕文正,柯长志,吴声迪,等.南海中央海盆条带磁异常特征及构造演化[J].海洋学报,1987,9(1):69-78. [LV Wenzheng, KE Changzhi, WU Shengdi. Magnetic anomaly characteristics and tectonic evolution of the South China Sea central basin [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1987, 9(1): 69-78.]
- [62] 刘鸿.南海磁静区成因探讨及地质意义[D].中国科学院海洋研究所,2013. [LIU Hong. Genesis of magnetically quiet zone and its geological significance in the South China Sea [D]. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2013.]
- [63] 赵俊峰,张毅祥.南海东北部磁静区深部构造及成因模式[J].上海地质,2008(3):4-7. [ZHAO Junfeng, ZHANG Yixiang. Deep structure and genetic model of magnetically quiet zone[J]. Shanghai Geology, 2008(3):4-7.]
- [64] 真允庆,牛树银,孙爱群.南海热幔柱构造与油气分布[J].地质找矿论丛,2013,28(3):401-411. [ZHEN Yunqing, NIU Shuyin, SUN Aiqun. The mantle plume structure and oil-gas distribution in the South China Sea[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2013, 28(3): 401-411.]
- [65] 刘安,武国忠,吴世敏.南海东北部下地壳高速层的成因探讨[J].地质论评,2008,54(5):609-616. [LIU An, WU Guozhong, WU Shimin. The discussion on the origin of high velocity layer in the lower crust of Northeast South China Sea [J]. Geological Review, 2008, 54(5): 609-616.]
- [66] 夏斌,崔学军,张宴华,等.南海扩张的动力学因素及其数值模拟讨论[J].大地构造与成矿学,2005,29(3):328-333.

- [XIA Bin, CUI Xuejun, ZHANG Yanhua. Dynamic factors for the opening of South China Sea and a numerical modeling discussion[J]. *Geotectonica Et Metallogenia*, 2005, 29(3): 328-333.]
- [67] 张业明, 谢才富, 付太安, 等. 三亚地体与琼中地体构造边界的直接证据[J]. *科学技术与工程*, 2005, 5(20): 1482-1484. [ZHANG Yeming, XIE Caifu, FU Taian, et al. The direct evidence about tectonic terrain and Qiongzong boundary between Sanya terrain[J]. *Science Technology and Engineer*, 2005, 5(20): 1482-1484.]
- [68] 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. The preliminary exploration for spatial distribution characteristics of ancient shuangfeng-bijia orogen in northern continental margin of South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(4):77-84.]
- [69] 周洋. 古双峰-笔架碰撞造山带断裂-褶皱构造几何学特征及成因研究[D]. 中国科学院南海海洋研究所理学硕士学位论文, 2017. [ZHOU Yang. The geometric characteristics and genesis of fault-fold structure in ancient Shuangfeng-Bijia collision orogenic belt[D]. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2017.]
- [70] 丘学林, 赵明辉, 敖威, 等. 南海西南次海盆与南沙地块 OBS 探测和地壳结构[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3117-3128. [QIU Xuelin, ZHAO Minghui, AO Wei, et al. OBS survey and crustal structure of the Southwest Sub-basin and Nansha Block, South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3117-3128.]
- [71] 郭晓然, 赵明辉, 黄海波, 等. 西沙地块地壳结构及其构造属性[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(4): 1414-1425. [GUO Xiaoran, ZHAO Minghui, HUANG Haibo, et al. Crustal structure of Xisha block and its tectonic attributes[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(4): 1414-1425.]

“MOUNTAIN ROOT DELAMINATION”: A NEW MECHANISM FOR ORIGIN OF THE SOUTH CHINA SEA

LIU Hailing¹, ZHOU Yang^{2,3}, WANG Yin^{1,2}, ZHU Rongwei^{1,2}, LI Yuhuan^{1,2}

(1. CAS Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology,

Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The origin of the South China Sea (SCS) still remains a dispute. With emphasis on internal mechanisms for the formation and evolution of the SCS, based on geological interpretation of a large number of seismic profiles, and using tectonic analysis as the method, the authors carried out systematic tectonic restoration of the structural deformation features of the Pre-Cenozoic basements on the northern and southern continental margins of SCS. Back thrust fold structures are found remained in the basements, which are endemic to collision orogenic belt. The axis of the paleo-orogenic belt is distributed roughly along the modern Shuangfeng-Bijia seamount line. We name it “Paleo-Shuangfeng-Bijia collision orogenic belt” hereafter in this paper. Together with the analyses of Cenozoic magmatite geochemical characteristics of SCS region and the Cenozoic extensional tectonic characteristics of northern and southern continental margins, the authors proposed that the orogenic belt underwent a mountain root delamination process in Cenozoic. And the mechanism of “mountain root delamination” is the fundamental origin of the SCS.

Key words: origin of the South China Sea; Mesozoic; Papeo-Shuangfeng-Bijia collision orogenic belt; mountain root delamination; disintegration of orogenic belt