

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2009.06059

# 南海构造演化模式: 综合作用下的被动扩张

栾锡武, 张亮

(中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071)

**摘要:**南海处于欧亚板块、印度-澳大利亚板块和太平洋板块的交汇处, 地质作用十分复杂, 至今未能建立一个普遍适用的演化模式, 成为南海研究中亟待解决的问题。通过总结南海构造演化的主要模式, 分析各模式建立的依据和存在的问题, 发现通过一个动力源来研究南海的形成演化是片面的。从南海构造特征分析, 结合国外有关大陆岩石圈破裂的研究成果, 认为南海海盆主体经历了被动大陆张裂到海底扩张的演化过程。动力源主要是古南海向南俯冲的拖曳力, 辅助于南、南东向的地幔流作用。南海北部陆缘广泛存在的高速层, 可能是地幔流沿拉张减薄面底侵的结果, 因而不同于地幔柱作用引起南海的打开。印度板块碰撞、楔入产生的地幔流, 经太平洋俯冲板块的阻挡, 最终发生南、南东向流动。印支地块的挤出则对南海西部的拉张具有重要影响。

**关键词:**构造演化; 海底扩张; 古南海; 地幔流; 南海

中图分类号: P736.1

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2009)06-0059-16

南海北邻中国大陆, 东邻菲律宾群岛, 南依加里曼丹和苏门答腊群岛, 西界中南半岛, 南北长约2 900 km, 东西宽约1 600 km, 总面积约 $350 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, 其平均水深为1 212 m, 中央部分平均水深超过4 000 m, 最大水深达5 559 m, 是西太平洋大陆边缘面积最大、水深最深的边缘海(图1)。

南海大致呈北东—南西向伸展的菱形, 在其北部、西部发育陆架、陆坡地形, 在其南部和东部则发育岛架和岛坡地形。陆架、岛架水深一般在250 m以浅, 陆坡、岛坡的水深一般在250~3 000 m之间。陆架、岛架部分海底平坦, 宽度以北部陆架最大, 为200~300 km, 西部陆架和南部岛架较窄, 为50~70 km, 东部岛架最窄, 在10 km以下。陆坡、岛坡部分海底崎岖不平, 变化复杂, 其上不仅山峰林立、礁滩广布, 更有沟谷纵横、深潭散落, 其宽度也随之有很大变化, 东部岛坡宽度最窄, 约100 km, 而北部陆坡、西部陆坡和南部岛坡的宽度在200~500 km之间不等<sup>[1]</sup>。

南海陆坡和岛坡围限的区域为深海平原(图1)。这部分区域主要位于南海的中部靠东的位置, 其主体水深在3 000~4 000 m之间, 海底广阔而平

坦, 其面积占整个南海总面积的1/3左右。南海深海平原在总体形态上类似于伸开的右手, 其拇指和食指分开, 其他中指、无名指和小拇指并拢在一起。这个右手的手掌部分即为中央海盆, 分开的拇指和食指的位置为东北次海盆和西北次海盆, 其他三指所在的位置则为西南次海盆。中央海盆和其他几个次海盆统称为南海深海海盆。和陆坡、岛坡一样, 在平坦的深水海盆中同样有海山、海丘分布。在一些地方这些海底山还集合成群或集合成链。最为显著的一条海山链为以黄岩海山为主体的东西向海山群形成的黄岩岛海山链。这条海山链横亘于中央海盆的中部, 将中央海盆分割为南北两部分。由于位于手掌的中间部分, 在形态上, 黄岩岛海山链形似一条起自掌根的掌纹线。除黄岩岛海山链外, 马尼拉海沟是南海深海海盆中另一个醒目地形。马尼拉海沟呈反“S”型嵌于深海海盆和吕宋岛坡之间<sup>[2]</sup>, 南北长达1 000 km, 深达4 500 m以上(图1)。

南海位处印-澳、欧亚和太平洋三大板块汇聚的中心, 四周又包含了大陆边缘的三大主要类型, 即南北两侧的张裂型(被动型)边缘、东侧的俯冲型(主动型)边缘和西侧的剪切型(转换)边缘; 南海经历了中生代时期东亚陆缘大规模地块拼合、构造挤压和大规模走滑伸展, 以及中特提斯洋最终关闭的过程, 又经历了新生代大陆岩石圈拉张破裂、海盆扩张直到后期的俯冲、碰撞过程, 其大地构造位置特殊, 演化过程复杂, 从而一直被认为是进行边缘海构造演化

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB411702); 国家自然科学基金项目(40776032); 中国科学院创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-211-01)

作者简介: 栾锡武(1966—), 男, 博士, 责任研究员, 主要从事海洋地球物理调查研究, E-mail: xluan@m.s. qdio.ac.cn

收稿日期: 2009-02-10; 改回日期: 2009-07-25. 文凤英编辑

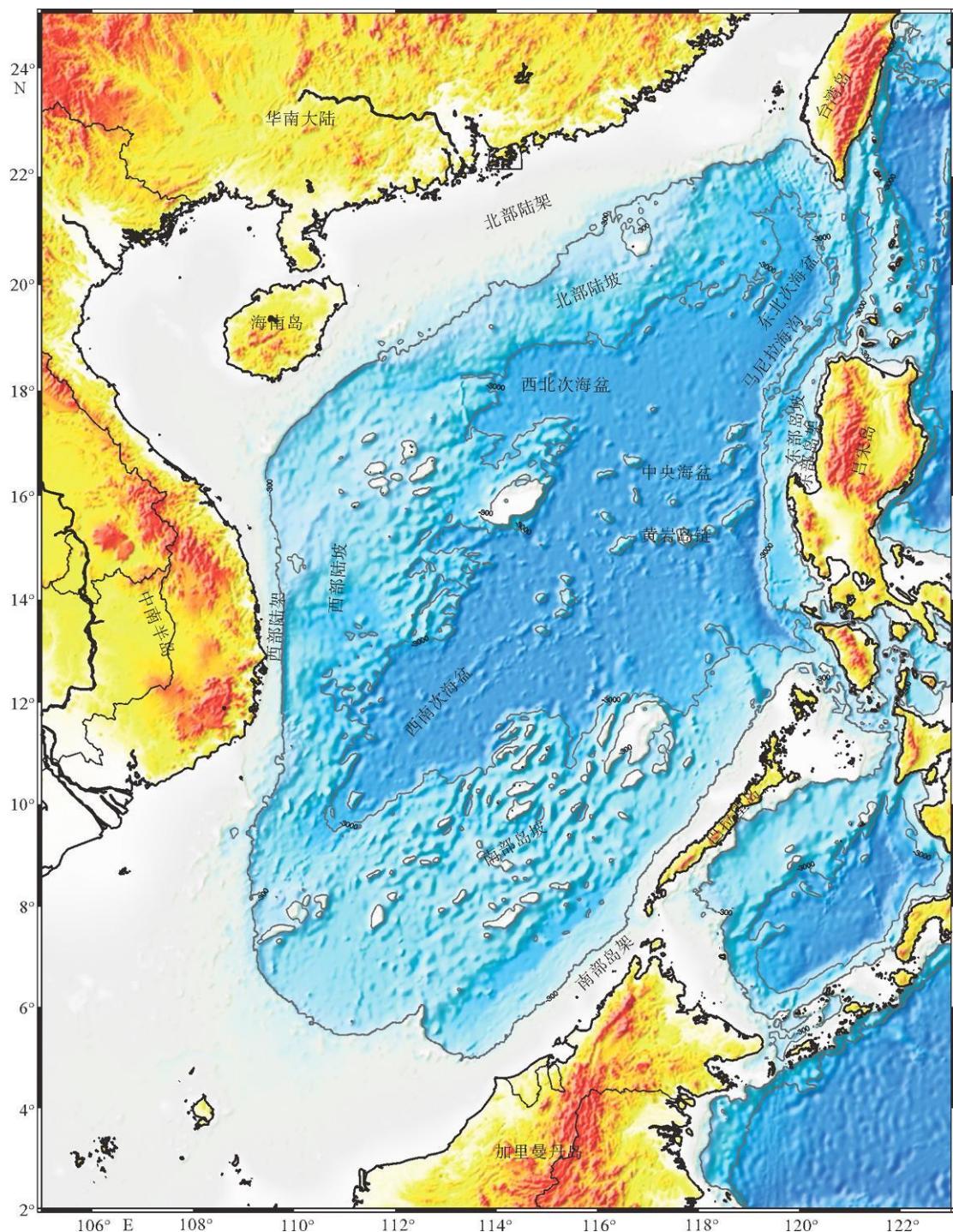


图 1 南海海底地形图

Fig. 1 Seafloor topographic map of South China Sea

研究的天然实验室。长期以来,南海吸引了许多中外专家学者对其进行调查研究,提出了不少关于南海成因演化模式。但到目前为止,还没有一种模式能够完全为大家所接受。本文对已有的各种模式进行了分析,提出了南海构造演化的三大关键要素,并指出南海的形成机制是在综合作用下的被动扩张。

## 1 南海存在的主要演化模式

### 1.1 弧后扩张模式

Karig 较早地提出了南海形成的弧后扩张模式,认为南海的扩张形成与其东侧的菲律宾海板块

的向西俯冲有关<sup>[3-4]</sup>。Karig 认为在晚白垩纪到早第三纪, 太平洋板块向欧亚大陆板块之下俯冲, 当俯冲到一定深度, 摩擦生热, 上地幔物质熔融上升, 使其上的地壳产生拉张, 从而在西太平洋大陆边缘形成一系列边缘海, 这其中包括南海。南海就是在向东凸出的菲律宾岛弧后面扩张形成的弧间盆地。Ben-Avraham 和 Uyeda 较早地在南海海盆内发现了磁异常条带的存在<sup>[5]</sup>。在对比了南海和日本海已有的地球物理场特征后, Ben-Avraham 和 Uyeda 认为, 南海的成因应该和日本海的成因一样都是弧后扩张形成的, 但与 Karig 提出的弧后扩张模式不同的是, 认为南海的张开是加里曼丹地块向南旋转迁移的结果, 而不是吕宋岛弧的向东凸出, 这样可以更合理地解释南海海盆中出现的磁异常条带是近东西向的, 而不是平行于吕宋岛弧的。中国学者张文佑把南海和东海纳入一个统一的框架中进行考虑, 认为南海和东海一样, 都是菲律宾板块向中国大陆下俯冲引起的弧后扩张而形成的, 东海和南海不同的地方在于其演化的历史不同, 南海较东海更老更成熟<sup>[6]</sup>。Honza 在系统研究了西太平洋边缘盆地的成因后, 认为西太平洋绝大多数边缘盆地如日本海盆、南海海盆、四国海盆、西菲律宾海盆、帕里西维拉海盆等都是弧后扩张成因的<sup>[7]</sup>。根据扩张轴和转换断

层的位置关系, Honza 划分出了 I 型、II 型和 III 型三类弧后盆地(图 2), 并指出, 通常直接面向大洋板块的盆地一般为 I 型弧后盆地, 靠近大陆的则一般为 III 型弧后盆地, 对于我国南海则认为南海早期为 III 型弧后扩张, 形成中央海盆, 对应于 11-7 期磁条带, 而在后期的 7-5D 期磁条带期间, 南海中央海盆为 I 型弧后扩张, 西南海盆为 III 型弧后扩张<sup>[7]</sup>。可见在南海扩张过程中其周边动力环境曾发生重大转变。对于与南海弧后扩张相对应的岛弧系, Honza 认为是北巴拉望弧, 而不是吕宋岛弧, 因为 Honza 弧后扩张体系中岛弧一般和扩张轴是近平行的。关于弧后扩张的条件, 石耀霖等根据数值模拟指出, 需要在岛弧后撤的条件下才能发育弧后的扩张<sup>[8]</sup>。Tamaki<sup>[9]</sup>、Flower 等<sup>[10-11]</sup>根据地震层析成像结果及地幔地球化学研究, 认为特提斯构造域与欧亚大陆聚合及印度板块向北楔入, 导致地幔物质向东挤出, 此地幔流可能使俯冲板块后退, 从而引起南海等边缘海盆的张开。任建业等通过对西太平洋边缘海盆地基本特征和发育模式的研究, 认为印度-欧亚大陆碰撞形成向东和东南的地幔流, 推动了东亚大陆东侧和南侧俯冲带的后退<sup>[12]</sup>。这样南海的弧后扩张同样具备岛弧后撤的前提条件。综上所述, 弧后扩张模式认为太平洋弧后扩张或北巴拉望弧后扩张形

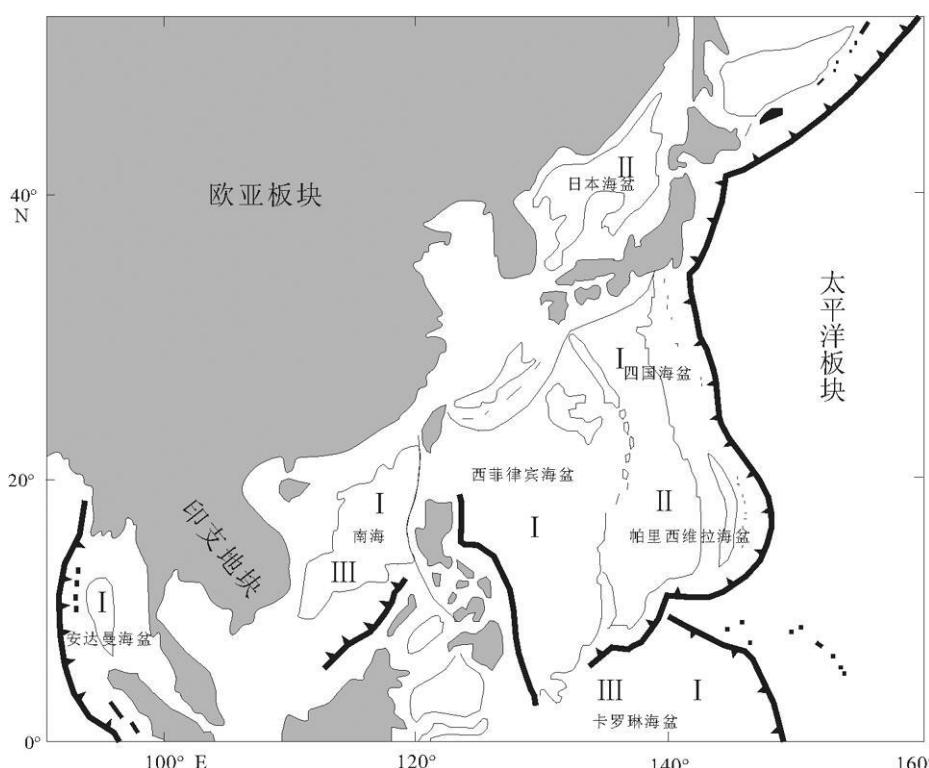


图 2 西太平洋大陆边缘弧后扩张盆地及类型(据文献[7])

Fig. 2 Marginal backarc basins and types in the western Pacific

成了南海海盆。

## 1.2 海底扩张模式

Bowin 认为 Ben-Avraham 和 Uyeda 在南海中央海盆发现的 EW 向磁异常条带是由海底扩张形成的<sup>[13]</sup>。Bowin 根据上述作者在南海中央海盆发现的磁异常条带, 推测南海可能在中生代先经历了一期海底扩张, 把加里曼丹从亚洲大陆分开并南移, 然后在第三纪中期, 洋壳再次裂开, 形成新一期海底扩张, 方向为北东向。即认为南海现今的洋壳由两侧的中生代洋壳和中间的新生代洋壳组成。Taylor 等对南海中央海盆的磁异常条带进行了更为详细的研究, 并首次在中央海盆 15°N 附近鉴别出 11-5d 磁异常条带(图 3), 认为南海中央海盆是在晚渐新世—早中新世(32~17 Ma)由海底扩张形成的, 与磁异常条带平行的海底火山链被认为是已停止的海底扩张轴<sup>[14-15]</sup>。根据 Taylor 等的模式, 南海可分为

以下 4 个演化阶段: (1) 中侏罗纪—中白垩纪, 原始东南亚边缘是一个安第斯山型的岛弧, 北巴拉望—礼乐滩—北康暗沙微陆块是这一边缘的弧前地区。沿原始中国边缘发生的岛弧火山活动于 85 Ma 停止。(2) 白垩纪末或古新世初期—早渐新世, 原始中国边缘发生断裂活动。(3) 晚渐新世—早中新世, 南海盆地东部首先发生海底扩张, 后在东部海底扩张和地壳拉张的综合作用下盆地西部也开始发生海底扩张。南海盆地的张开, 使北巴拉望—礼乐滩—北康暗沙从亚洲大陆分离出来。(4) 晚中新世以后, 南海盆地及边缘地区以大幅度沉降为主。黎明碧等基本认同南海上述 4 个演化阶段, 并推测南海最后阶段的大幅度沉降是由连续的热收缩引起<sup>[16]</sup>。Briais<sup>[17]</sup> 在磁异常条带工作基础上建立了更详细的南海海底扩张模式。他们认为在磁异常条带 11—7(32~27 Ma)期间, 南海海底扩张活动主要发生在西北海盆及中央海盆; 在磁异常 7—6b(26~24 Ma)

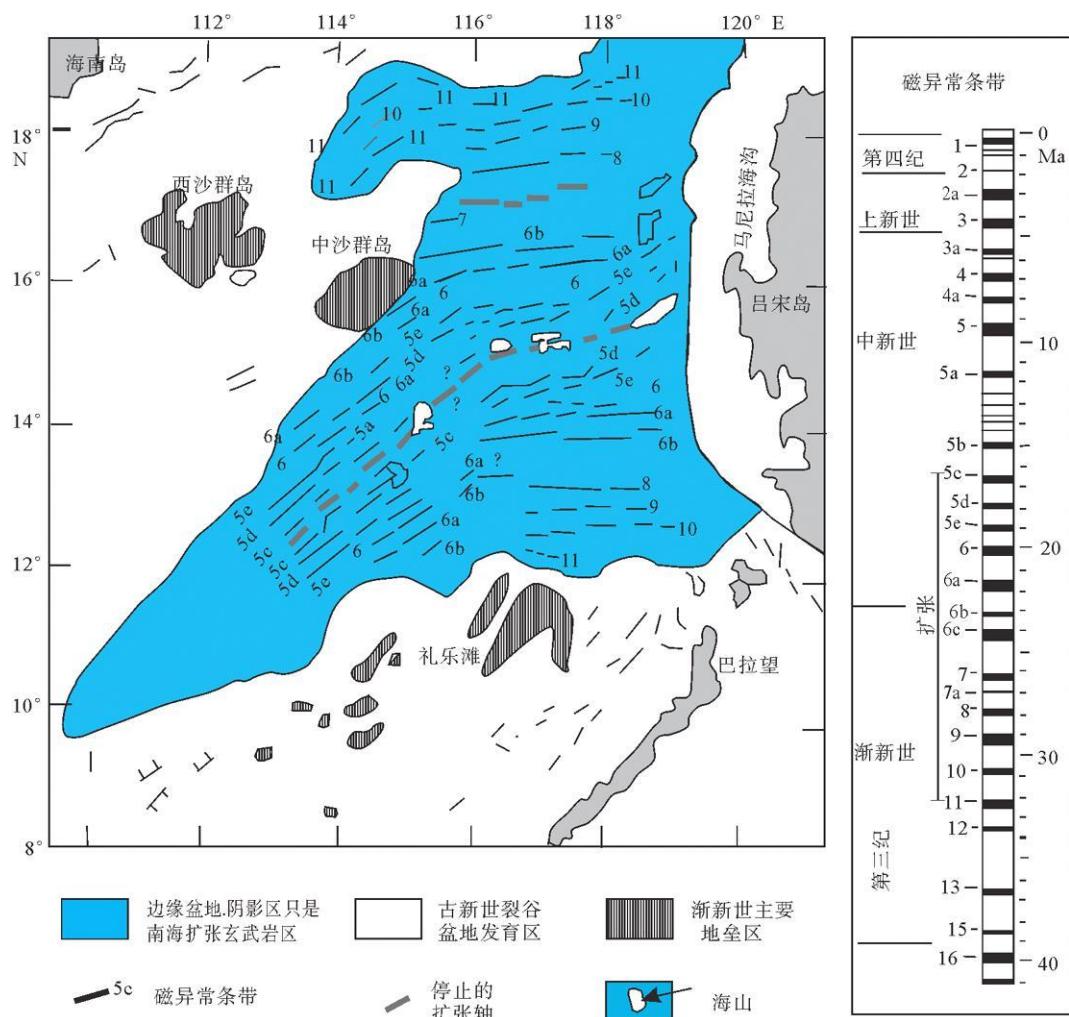


图 3 南海海底磁异常条带及对应的年龄(据文献[17])

Fig. 3 Magnetic lineations and their corresponding ages in South China Sea

期间, 扩张脊发生了一次向南的跃迁, 且其扩张轴的方向也从近EW向转变为NE向, 此时西南海盆开始扩张; 随后, 中央海盆与西南海盆在磁异常6b—5c(24~15.5 Ma)期间同时发生扩张, 并最终在15.5 Ma(磁异常5c)时海底扩张活动停止(图3)。姚伯初<sup>[18]</sup>据磁条带及南北陆缘的沉积加载和断裂性质, 认为南海新生代海盆经历了大西洋型海底扩张, 并受印度板块、太平洋板块的影响和制约。Sun等通过物理模型试验模拟认为, 南海经历了一个由被动大陆边缘张裂到边缘海海底扩张的过程, 并强调该过程独立于印支逃逸构造<sup>[19]</sup>。Sun等指出, 由

北部湾和珠江口盆地发育的断裂模式可知, 大陆裂谷及早期海底扩张发生于32~26 Ma期间伸展应力场由SE向转为SSE向, 24 Ma后, 转为NW—SE向扩张, 终止于15.5 Ma。引起伸展的原因, Sun等认为是古南海俯冲产生的拖曳力和(或)印度-欧亚板块碰撞引起的地幔流<sup>[19]</sup>。在综合分析早期研究成果的基础上, Li等<sup>[20]</sup>认为南海的形成可能利用了晚中生代古太平洋构造活动形成的北东向的薄弱面, 后来古南海向东南方向俯冲所形成的拖曳力使南海发生海底扩张。该观点在随后的模拟试验中得到证实, 即裂谷一般发育于岩石圈薄弱带或横向不

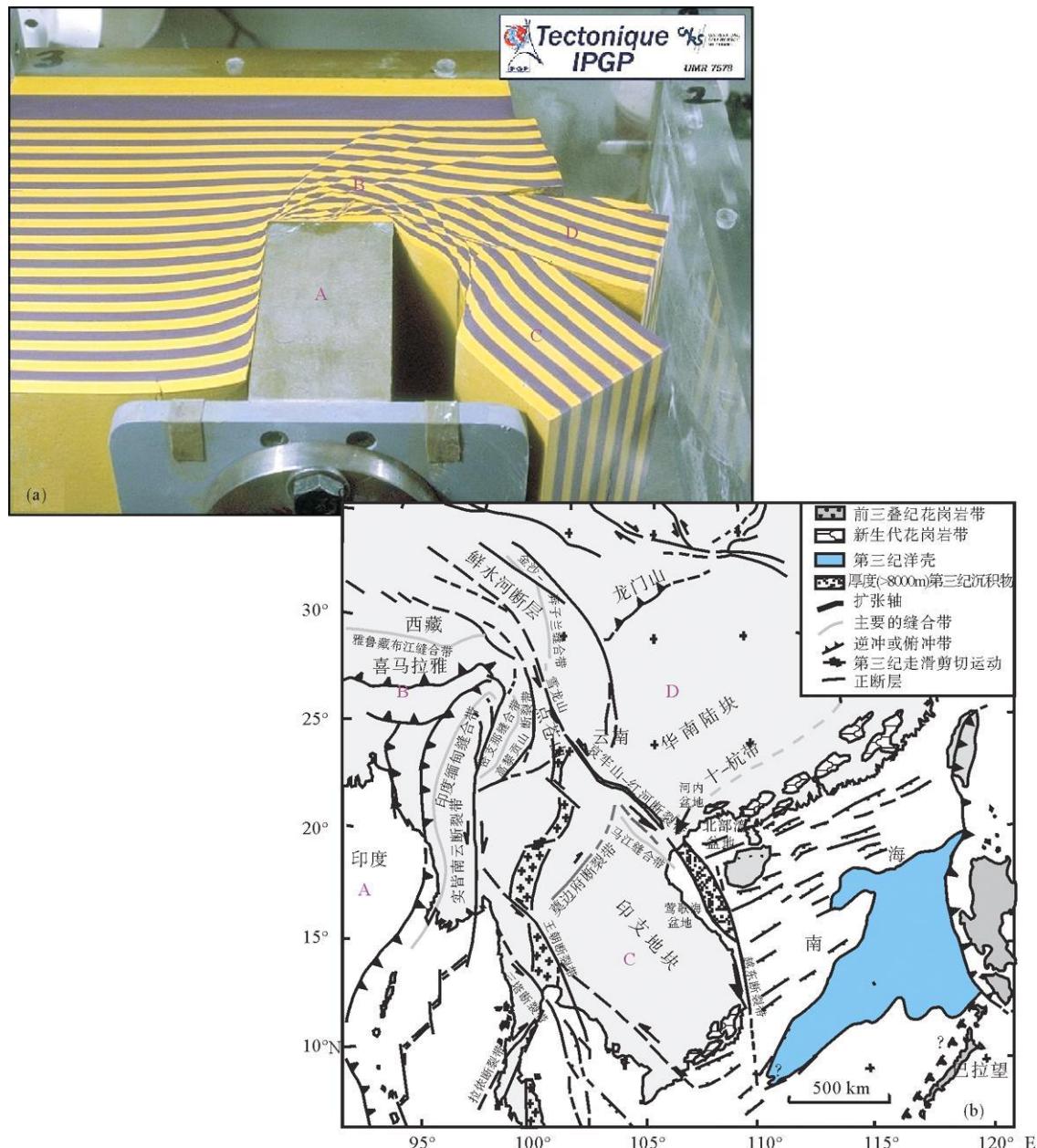


图4 模拟块体挤出实验与实际块体对比((a)、(b)分别引自文献[23]、[24])

Fig. 4 Comparison of extrusion experiment and actual blocks

均质位置,由最初孤立的破裂点发展成破裂面<sup>[21]</sup>。综上所述,该模式认为南海陆缘为大西洋型被动大陆边缘,后经历了海底扩张,发育完全洋壳。这是一种较为流行的观点。

### 1.3 碰撞挤出模式

Tapponnier 等人在青藏高原的实地观测结果显示,青藏高原第四纪以来的地壳拉张速率约为 1 cm/a,这种地壳的伸展并不足以吸收印度板块向青藏高原碰撞而引起总体物质汇聚<sup>[22]</sup>。利用塑性黏土来模拟印度板块和青藏高原碰撞而进行的平面变形实验结果表明,在将东部边界设为自由边界时,碰撞引起的地体走滑在很大程度上平衡了这种碰撞引起的总体物质汇聚<sup>[22]</sup>。结果表明,印度板块与欧亚板块发生碰撞和楔入,欧亚大陆沿若干条断裂大规模传播式挤出,在晚渐新世至早中新世,沿哀牢山-红河断裂带发生大规模走滑运动,促使加里曼丹地块南移,南海就是在其末端形成的拉分盆地<sup>[22]</sup>,也即南海是由于印度板块和欧亚板块碰撞挤出形成的。随后学者们更详尽地重复了上述实验,结果更清楚地显示出块体由于碰撞而发生挤出的效果。块体沿主要断裂,如红河—越东断裂可以有 1 000~1 500 km 的滑移量。这种滑移量和南海的扩张量相吻合<sup>[23]</sup>(图 4)。此外,Leloup 等、Lacassin 等在哀牢山-红河剪切带及青藏高原以东走滑断裂带进行的研究也为该模式提供了大量的证据。Leloup 等<sup>[24]</sup>根据新的构造、岩石学及<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 等资料阐述了哀牢山-红河剪切带运动特征,并从运动学和时间方面证明了哀牢山-红河剪切带左旋运动与南海海底扩张之间的因果关系,即哀牢山-红河剪切带在约 32 Ma(很可能是 36 Ma)到约 16 Ma 间发生了大规模的左旋运动,其运动的时代和南海形成的时间相吻合,其滑移的距离也和南海的扩张量相吻合,从而认为哀牢山-红河剪切带的左旋运动控制了南海的形成<sup>[24]</sup>。Lacassin 等在详细研究了王朝断裂带和三塔断裂带后,同样认为印度板块向北碰撞、楔入在其东侧引起了左旋走滑运动<sup>[25]</sup>。根据<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 的测年结果,Lacassin 等推断王朝断裂带和三塔断裂带活动的时代为 30.5~23 Ma,即在渐新世—中新世期间,这和哀牢山-红河剪切带的左旋活动时间基本一致。并且哀牢山-红河剪切带的左旋走滑活动和王朝断裂带及三塔断裂带的左旋走滑活动共同使印支地块向东南挤出<sup>[25]</sup>。此外,学者又通过数值模拟的方法,对深部地幔物质的运移进行了研究。谢建华等<sup>[26]</sup>对印度-欧亚板块碰撞的模拟结果发

现,当东、东南为自由边界条件时,可以导致大量物质向东、东南逃逸,取得与 Tapponnier 等、Peltzer 等实验一致的结果。Liu 等<sup>[27]</sup>通过地震层析成像和数值模拟,认为印欧大陆碰撞而致的软流圈物质横向挤出,对中国东部新生代裂谷和火山作用及南海打开均具重要作用,同时,也为地幔物质横向流动对南海形成演化提供了概念模型及物理上的可能性。从以上观点我们可以看出,南海扩张与印度板块的碰撞在时间和空间上均存在密切关系。

### 1.4 陆缘扩张模式

Hamilton<sup>[28]</sup>指出中国华南大陆边缘在中侏罗世—中白垩世期间为安第斯型火山弧,其应力场特征以挤压为主。到晚白垩世华南大陆边缘由主动转换为被动大陆边缘,其应力场特征也由挤压转变为伸展应力场。在这种伸展应力场的作用下,礼乐滩、东巴拉望等微地块从华南大陆向南分裂,导致南海的形成。1983 年,中国学者郭令智等<sup>[29]</sup>也提出整个东亚大陆边缘在燕山期为安第斯山型陆缘,南海在该时期为东亚安第斯型陆缘地堑系的一个构造单元。同时,刘昭蜀等首次在国内提出了南海陆缘扩张的见解<sup>[30]</sup>。随后,刘昭蜀等利用古地磁数据,结合地质、地球物理资料对南海形成演化的陆缘扩张模式进行了更详尽的论述,认为自新生代以来南海区域应力场从挤压转为松弛,大陆边缘由强烈挤压转为强烈拉张,地幔向大洋方向蠕散,导致陆缘断裂、解体并向大洋扩散,在这种背景下,南海海盆发生了多期多轴扩张,导致了南海的形成<sup>[31]</sup>。陈国达则认为陆缘扩张模式不仅适应于南海,同时,整个亚洲东部大陆边缘其边缘海的形成机理并非“洋壳俯冲,弧后扩张”所致,而是陆缘壳体上的大陆类型活动区,在其发展的余动期,由于陆缘扩张及陆壳薄化所致,并明确指出“陆缘扩张”是我国新生代以来东部陆壳拉伸过程中主要的构造作用,强调整个亚洲东部大陆边缘的形成都是由于陆缘扩张<sup>[32]</sup>。徐义刚等对南海北缘新生代玄武岩中幔源包体的研究揭示了该地区上地幔的不均一性和复杂的地幔过程。其中,橄榄岩的微量元素组成指示南海北缘地幔具有大陆裂谷型地幔特征,与俯冲带之上的地幔楔或受俯冲作用影响的地幔有很大差别,且该区地幔有明显分层的特征,其下部由大洋型橄榄岩组成,顶部则为类似于太古宙、元古宙地幔的富斜方辉石方辉橄榄岩组成。总之,深源岩石记录的信息支持南海海盆是由陆缘扩张引起的主动盆地的观点<sup>[33]</sup>。

## 1.5 “地幔柱”模式

地幔柱的假设最早由 Wilson<sup>[34]</sup> 和 Morgan<sup>[35]</sup> 提出, 用来解释像夏威夷和冰岛这样的热点火山成因。随着地幔柱理论的不断发展, 人们认识到其巨大的头部可以造成区域性的玄武岩火山活动, 以及地壳熔融、地壳拉张和地壳上拱, 从而地幔柱除控制热点火山的形成外, 对大陆地质构造演化、大陆边缘地质构造演化等都起到重要作用<sup>[36]</sup>, 从而, 也有了南海形成演化的地幔柱模式。南海的地幔柱模式应该起因于南海的高热流发现和玄武岩的发现。

南海与日本海、菲律宾海等其他几个西太平洋边缘海相比, 一个很大的不同是其具有很高的热流值<sup>[37]</sup>。随后, Maruyama<sup>[38]</sup>、曾维军等<sup>[39]</sup> 根据对南海区卫星重力异常分析发现了南海区存在强烈的地幔活动。王贤觉等、鄢全树等通过对南海海底玄武岩的研究, 提出南海之下可能存在一个地幔热柱<sup>[40-41]</sup>。解广轰等<sup>[42]</sup>、朱炳泉等<sup>[43]</sup> 通过对东南沿海新生代玄武岩及其中地幔包体的岩石学及地球化学研究, 查明了环南海地区存在一个 Dupal 型异常地幔域。龚再升、李思田、朱炳泉等则根据南海北部大陆边缘盆地及深部构造发育特征等资料综合推测南海地区这个 Dupal 型异常地幔可能是南海之下地幔热柱的表现, 即认同南海下存在地幔热柱的观点, 并进一步推测这个地幔热柱携带高温的地幔物质上升, 烘烤上覆的岩石圈, 使上覆岩石圈发生熔融, 从而引起熔融区地壳上拱并开裂, 从而导致南海的形成<sup>[43-46]</sup>。

地幔热柱的理论从被提出以来就吸引了广大的科技工作者, 并已被广泛接受。但实际上, 要获得直接的有关地幔热柱的证据并不容易。早期, 南海的地幔热柱被认为是位于越南的印支半岛之下, 从而被称为“越南地幔柱”<sup>[38]</sup> 或是“印支地幔柱”<sup>[39]</sup>。根据 S 波速度层析成像结果并结合其他地球物理和地球化学结果, Lebedev 等认为南海的地幔柱应该存在于海南之下, 并称为海南地幔柱<sup>[47-48]</sup>。赵大鹏等利用全地幔层析成像技术, 也发现南海的地幔热柱存在于海南之下<sup>[49]</sup>。最近, Lei 等公布了最新的南海地幔柱的研究成果。利用南海地区高质量的近震和远震初至到时资料, 采用一种新的远震和近震联合成像技术, 获得了南海地区壳幔高分辨率的速度模型。该速度结果在海南的下方揭示出一个直径 80 km、向下逐渐向东南方向倾斜、根达 250 km 上地幔的地幔热柱的存在<sup>[50]</sup> (图 5)。

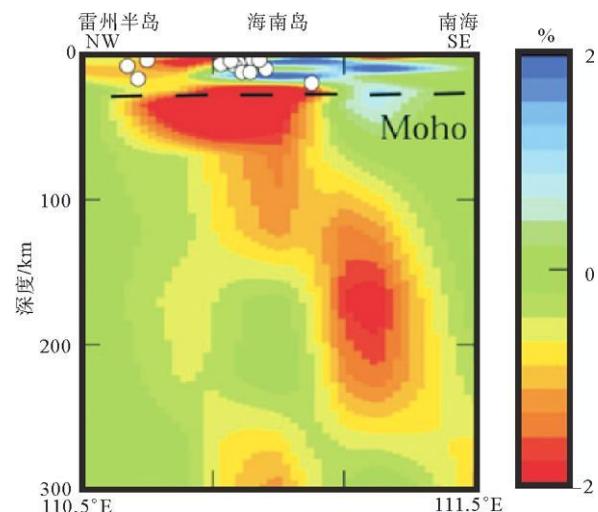


图 5 P 波速度扰动图像显示的海南地幔柱(据文献[50])

Fig. 5 Mantle plume in Hainan on the disturbance image of P-wave velocity

## 1.6 右行拉分模式

自 Burchfiel 等<sup>[51-52]</sup> 首先提出拉分盆地的概念以来, 人们对拉分盆地进行了许多实验的和理论的研究, 并在世界各地找到了许多典型的拉分盆地的例子。许浚远等<sup>[53-54]</sup> 根据欧亚板块东缘新生代盆地形态相似的几何学特征, 如盆地平面形态都呈准菱形等, 认为各盆地均为右行剪切作用下形成的拉分盆地。此拉分作用始于印度板块与欧亚板块碰撞, 成形于欧亚板块向北退却与太平洋板块之间的右行剪切作用。在早第三纪(或至早中新世末)形成南海、日本海、菲律宾海等右行拉分裂谷, 它们共同构成了巨大的右行拉分裂谷系统。据沉降及变形特征, 其构造演化可划分为 3 个阶段: 右行走滑拉分裂谷阶段(始新世中期—中新世早期)、挤压隆起阶段(中新世中期)和后裂谷沉降阶段(中新世中晚期—第四纪)(图 6)。而南海总体几何学特征及次级盆地和周缘盆地的几何学特征表明, 它们的裂谷作用是以近南北向主断裂为主剪切的右行拉分作用。联系到裂谷作用序列, 南海成因具有右行拉分作用、裂谷和左行转换挤压作用交替出现的特征, 表现了具有转换性质的“开”与“合”的更迭<sup>[53-54]</sup>。

周蒂等鉴于南海与日本海在形成时代、海盆形态和海底地貌、海底扩张的多轴、多阶段、由东向西扩展特征、岩石圈地幔的地球化学异常等方面具有共同特征, 从而推测两者在成因上可能也应该一致<sup>[55]</sup>。通过南海海盆的楔形形状、海底扩张及陆架盆地断陷的由北向南发展和自东向西推进的特征、地壳伸展减薄和海底扩张程度的由东向西减弱都可

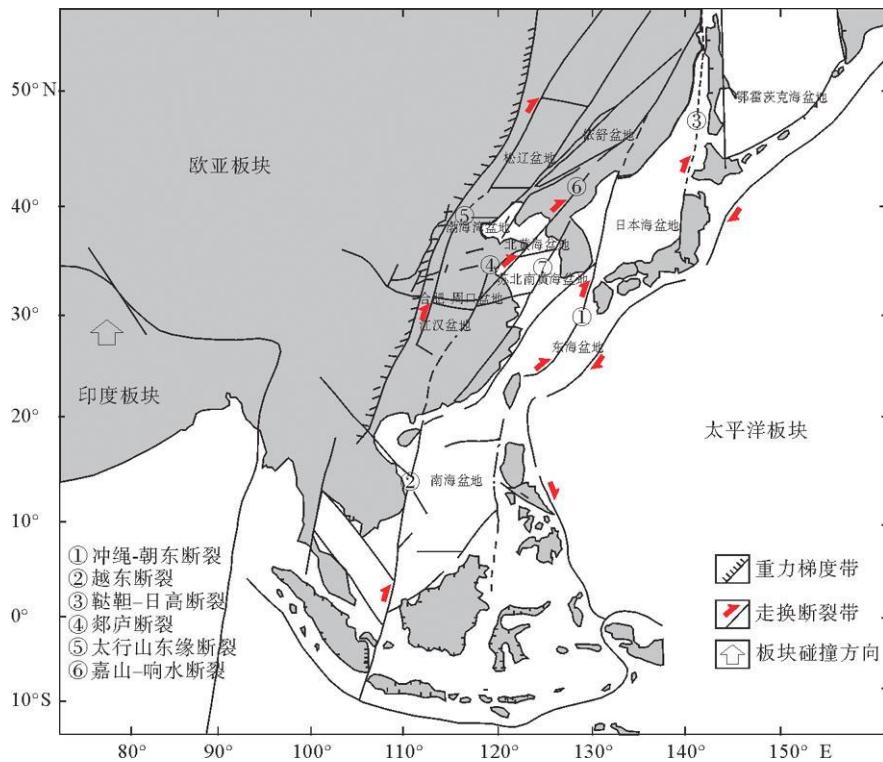


图 6 欧亚板块东缘新生代右行走滑拉分盆地(据文献[53])

Fig. 6 Cenozoic right lateral pull-apart basins in the eastern margin of Eurasia plate

用尖端向西的“剪刀模型”来描述。南海的张开是近南北向右行剪切力作用下东亚陆缘发生裂解的结果。南海张开的同时,在海盆内及其西缘中南半岛上发育了大量近南北向右行走滑断裂<sup>[55]</sup>。

## 2 南海形成演化模式存在的问题

从以上的论述中可以看出,关于南海形成演化模式已涵盖了弧后扩张、板块运动及地体学说等理论。但各模式只是就影响南海演化的某一因素或其中一个演化阶段提出的,因而存在很多无法解释的问题。

弧后扩张模式是在没有进行大规模地质、地球物理调查的情况下提出的,因而存在很多与现在观测不符的地方。特别是早期的弧后扩张模式难以解释南北向的吕宋岛弧与弧后东西向磁异常条带相垂直的问题<sup>[16]</sup>。陈国达指出南海裂谷型深大断裂与弧后盆地内次生张应力造成的张性断裂性质不符<sup>[32]</sup>。在沉积地层方面,扩张南移的南沙、北巴拉望地块的第三系碳酸盐沉积和南沙礼乐滩发育的早第三纪陆缘砂页岩沉积,均与弧后扩张模式下的岛弧性质相矛盾<sup>[56]</sup>。朱炳泉等根据地幔域地化特征表现强的印度洋域信息,而认为几乎不存在太平洋板块俯冲的影响<sup>[43]</sup>。愈多地质观测表明,南海早第

三纪以来的扩张与太平洋板块并不直接关系,而与加里曼丹微地块的向南漂移有关<sup>[15]</sup>。此外,据古地磁研究结果,菲律宾和菲律宾海板块是在新生代晚期才达到今天的位置,南海发生海底扩张时它们还在赤道附近<sup>[57]</sup>。若这一说法成立,则从根本上否定了南海是吕宋岛弧之后的弧后扩张盆地。

海底扩张模式存在的问题是仍未有鉴别出的典型的磁异常条带<sup>[58]</sup>。目前鉴别出的磁异常条带之间存在较大夹角,同一条也有多处弯曲,这与大西洋是矛盾的。此外,也有学者认为磁条带可能是海盆形成过程中不同期岩浆沿断裂多次侵入造成的。若黄岩岛链为扩张轴,则沿该岛链应有高重力异常,但在实测资料中并未发现<sup>[59]</sup>。林长松等<sup>[60]</sup>也对南海海盆扩张模式提出质疑,认为南海“扩张成因说”无法解释南海北部地区丰富多彩的构造运动和地球动力学特征。此外,对于海底扩张的期次,尤其是西南海盆的扩张时间存在很大争议。Taylor 和 Hayes<sup>[15]</sup>、Briais 等<sup>[17]</sup>、Ru 和 Pigott<sup>[61]</sup>、姚伯初等<sup>[18, 62]</sup>、何廉声等<sup>[63]</sup>、吕文正等<sup>[64]</sup>等均有不同的认识。除前两者外,一般认为南海经历了两期或多期海底扩张,其中东部海盆的扩张时间基本一致,西南海盆的扩张时间则差别较大。Taylor 等<sup>[15]</sup>、Briais 等<sup>[17]</sup>根据其建立的单期扩张模式,将磁条带对比为 11—5d(5c),即 32~17 Ma(15.5 Ma),得到较普遍

的认可; Ru 和 Pigott<sup>[61]</sup> 根据南海的幕式裂谷及沉降作用, 认为西南海盆形成于晚古新世—中始新世期间; 吕文正<sup>[64]</sup> 则根据磁异常条带得出西南海盆的扩张时间为 M32—27(70~60 Ma); 何廉声<sup>[63, 65]</sup> 认为西南海盆形成于第一次海底扩张, 时间为白垩纪(126~120 Ma), 这与梁德华<sup>[66]</sup> 对比出 M8—M11(126~120 Ma)一致; 姚伯初等<sup>[62]</sup> 根据海盆内未变形沉积层之下还有一层变形的沉积层, 认为 18—13(42~35 Ma) 的对比更为合理。尽管对于西南海盆扩张时间莫衷一是, 但由磁条带确定的中央海盆扩张时间得到了普遍的认可。这在一定程度上肯定了南海的扩张模式。

碰撞挤出模式受到了 England 和 Houseman<sup>[67]</sup> 的质疑。他们认为欧亚大陆的变形更像黏性流体, 因而, 不可能有大距离的滑移量存在。Dewey 等认为, 印度次大陆向欧亚大陆楔入的效应主要被大陆隆升, 特别是青藏高原的隆升所调整, 印支地块只有较短距离的走滑<sup>[68]</sup>。另外, Tapponnier 的模式将欧亚板块视作塑性板块, 也与实际情况差别太大。但从区域地质资料看, 印度板块碰撞及楔入引起了欧亚大陆岩石圈挤压变形(西南部)和张裂变形(东南部), 对南海海区新生代海底扩张起了触发作用, 但不是主要推动作用力的来源<sup>[57]</sup>。也有人提出了完全相反的意见, 李思田等<sup>[45]</sup> 指出, 作为红河断裂海上延伸的莺歌海盆地在始新世以来是右旋运动的, 这意味着哀牢山—红河断裂带的左旋运动影响不到南海海盆。Hall<sup>[69]</sup> 等在研究印度—欧亚板块碰撞对亚洲东南部的影响时认为, 婆罗洲不是从亚洲逃逸的块体, 若旋转南移则与古地磁资料不符, 也未发现主要的走滑断层。Wang<sup>[70]</sup> 等根据新的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 资料, 认为哀牢山—红河剪切带左旋运动发生于 27.5 Ma 以后, 晚于南海打开的时间, 表明挤出构造不可能是南海打开的原因。可见, 该模式另一关键问题, 还应进一步确定碰撞挤出引起的走滑运动时间与南海打开时间之间的先后关系。此外, Yang 等<sup>[71]</sup> 通过 3D 黏性流体模型模拟印度—欧亚板块碰撞引起的地壳加厚与水平挤出间地壳物质分布时发现, 碰撞早期的地壳缩短主要被喜马拉雅—青藏高原所吸收, 约 20 Ma 后水平挤出才占主导地位。这也说明印支地块挤出只是对南海扩张晚期或对西部扩张有重要影响。

陆缘伸展模式虽然引入了地幔流动、海底扩张, 但实质仍为陆壳拉张、减薄洋壳化, 理论依据不足, 很难被大多数学者接受。此外, 在区域挤压应力场下的拉伸环境形成机制还待进一步研究。

对于地幔柱模式, 多数学者认为仅仅用该模式难以解释海盆内部复杂的构造现象。崔学军等<sup>[72]</sup> 通过数值模拟的方法考查了地幔活动在南海扩张中的作用, 结果表明地幔上涌对南海地壳减薄影响很小, 并且仅地幔上涌打开南海需很长的时间。地幔柱或地幔上涌理论只是提供了动力来源, 由它引起地壳开裂的运动学模式和动力学机理仍需要进一步说明<sup>[55]</sup>。

右行剪切拉分模式只是根据盆地几何形态、张开的特征等提出的, 解释了南海与日本海等西太平洋边缘海在统一应力场条件下的相似成因, 但模式过于简单, 不能解释深部的动力学过程<sup>[73]</sup>。

从各演化模式所存在的问题可以看出, 前人常常是通过一个动力源来研究南海的形成演化过程, 从根本上决定了他们研究存在的片面性<sup>[26]</sup>。直接的体现是一个模式的提出, 常是另一模式的问题所在, 因而, 未有一个模式能很好地全面地解释南海的形成演化(表 1)。

### 3 讨论

可以看出, 南海的各演化模式大都肯定南海海盆存在 E—W 向的磁异常条带, 及由其确定的南海打开的时间, 并承认南海存在海底扩张。这是南海各演化模式的共同点。不同点在于对于引起南海海底扩张的动力机制有不同的解释。

海底扩张模式认为古南海向北巴拉望地块下俯冲产生的拖曳力使南海张裂并最终发生海底扩张, 经历了类似于大西洋型的海底扩张过程; 而碰撞挤出模式则更强调由于印度板块的碰撞楔入而引起印支地块沿哀牢山—红河剪切带向东南东方向大规模的构造挤出, 认为南海是该剪切带末端形成的拉分盆地。虽然对于哀牢山—红河剪切带实际的滑移量、走滑的性质和时间仍存在争议, 但印度板块碰撞引起的地幔物质流动对南海的影响是不容忽视的。南海广泛存在的玄武岩火山活动以及层析成像技术给出的地幔速度异常, 似乎又显示出地幔热柱对南海扩张的重要作用。

上述各演化模式都有其与南海的构造演化相符合的地方, 但又都有与实际相矛盾的地方。可见, 由于地理位置的复杂性, 南海的形成演化受到多个因素的控制和影响。在特提斯构造区背景下, 三大板块及内部微地块相互作用, 对南海的影响此消彼长, 造成了南海明显不同的构造演化阶段。为此, 不同学者在对南海北部陆缘盆地叠加现象的剖析<sup>[74]</sup>、南

表 1 南海 6 个演化模式的主要依据与主要问题  
Table 1 Main basis and problems in six evolution models of South China Sea

演化模式	主要依据	与实际不符合的地方
弧后扩张模式	菲律宾板块向西俯冲; 南海和日本海、东海相邻、相似; 菲律宾俯冲带存在后撤	EW 向磁异常条带与俯冲带垂直; 存在裂谷型深大断裂; 扩张南移的地块为陆源沉积
海底扩张模式	识别出 11—5d 磁异常条带; 古南海向南俯冲;	磁异常条带之间存在较大夹角; 南海扩张期次存在争议
碰撞挤出模式	哀牢山—红河断裂 32~16 Ma 发生大规模左旋走滑; 王朝断裂、三塔断裂在 30.5~23 Ma 发生左旋走滑; 塑性物理模型实验可以产生大规模走滑断裂	将欧亚板块视为塑性板块与实际差别较大; 对哀牢山—红河断裂带运动机制仍存在很多争议; 加里曼丹地块并不确定是亚洲逃逸的块体
陆缘伸展模式	新生代以来南海应力场从挤压转为松弛; 北缘地幔具有裂谷地幔特征	理论依据不足; 在区域挤压应力场下的拉伸环境形成机制还待进一步研究。
地幔柱模式	高热流; 存在玄武岩火山活动; Dupal 型异常地幔; 层析成像结果发现海南地幔柱	模拟表明地幔上涌对地壳减薄影响很小; 南海火山活动规模较小
右行拉分模式	盆地形态为菱形	未能解释深部动力学过程

海北缘盆地幕式裂解作用<sup>[73]</sup> 以及对南海地区板块新生代重建的研究中<sup>[74]</sup>,也都证实该观点,并大致总结为以下 3 个阶段:(1)晚白垩纪—始新世:古南海向南俯冲,产生 NW—SE 向伸展,在华南陆缘形成一系列半地堑盆地,早期对应于神狐运动。(2)晚始新世—早中新世:随着印支地块的不断向南东方向挤出,加之太平洋俯冲方向由 NNW 变为 NWW,古南海加速俯冲于巴拉望海沟之下。到晚渐新世,古南海从西段开始封闭并逐渐向东发展。俯冲板块产生的拖曳力及哀牢山—红河断裂的左行运动共同形成了 N—S 向区域伸展<sup>[7]</sup>,导致南海打开并在渐新世发生海底扩张形成洋壳。南海裂开对应于南海运动。(3)早中新世晚期,顺时针旋转的印支地块由 E—W 走向的剪切变为 NW 向,加之印度洋—澳大利亚板块迅速向北俯冲,古南海完全封闭,北巴拉望微地块与西菲律宾地块碰撞,到此南海扩张结束。此时对应于万安运动。可见,南海的构造演化是 3 个主要板块之间相互作用的结果。虽然对印支地块挤出时间和作用还有待于研究,但明确了古南海向南俯冲对南海打开,乃至整个东南亚构造演化都是必不可少的<sup>[77]</sup>。

以上从宏观上或板块构造上阐述了 3 个主要板块对南海演化的重要作用,但我们更重要的工作是从南海构造特征出发,弄清各种作用在不同演化时期的相互关系。从构造特征分析,南洋洋盆是一个

典型的小大西洋,是由大陆岩石圈发生张裂与分离、海底扩张而形成的<sup>[78]</sup>。可见,尽管南海所处的构造环境极其复杂,但我们仍可以借鉴国外张裂大陆边缘的研究理论,应用于南海的研究中。

大西洋伊比利亚与纽芬兰共轭大陆边缘作为典型的非火山型陆缘已得到详细的研究<sup>[79-85]</sup>,并将其演化过程总结为以下 4 个阶段(图 7):(1)伸展阶段,以高角度铲状断层及典型半地堑盆地为特征。(2)减薄阶段,以刚性块体下发育共轭拆离断层使岩石圈强烈减薄,由均匀伸展过渡到局部伸展为特征。(3)地幔抬升阶段,拆离断层穿透脆性地壳到达地幔。(4)海底扩张阶段,被定义为张裂过程中的热、力过程不可逆转地集中于一狭窄带中<sup>[86]</sup>。若将(2)和(3)合为一个阶段,则与南海演化 3 阶段具有很好的对应关系。对于张裂系统最后的构造样式,可认为是不同阶段变形的叠加,这在南海北部陆缘盆地的研究中也有所体现<sup>[44, 74, 87]</sup>。此外,南海地区也普遍发育与张裂边缘相对应的断裂系统,活动时期贯穿于南海演化的整个过程,以近平行于南北陆缘的 NE 向张性断裂为主。姚伯初等<sup>[62]</sup> 在南海北部陆缘发现滑脱断层, Schluter 等<sup>[88]</sup> 在南海南部边缘地震剖面上也识别出北倾的滑脱断层。南海北部陆缘东段虽然有一定的岩浆活动,但不是张裂的同期产物,它在形成机制上属于非火山型被动大陆边缘,其活动性因素是受周边板块相互作用的叠加所致<sup>[89]</sup>。

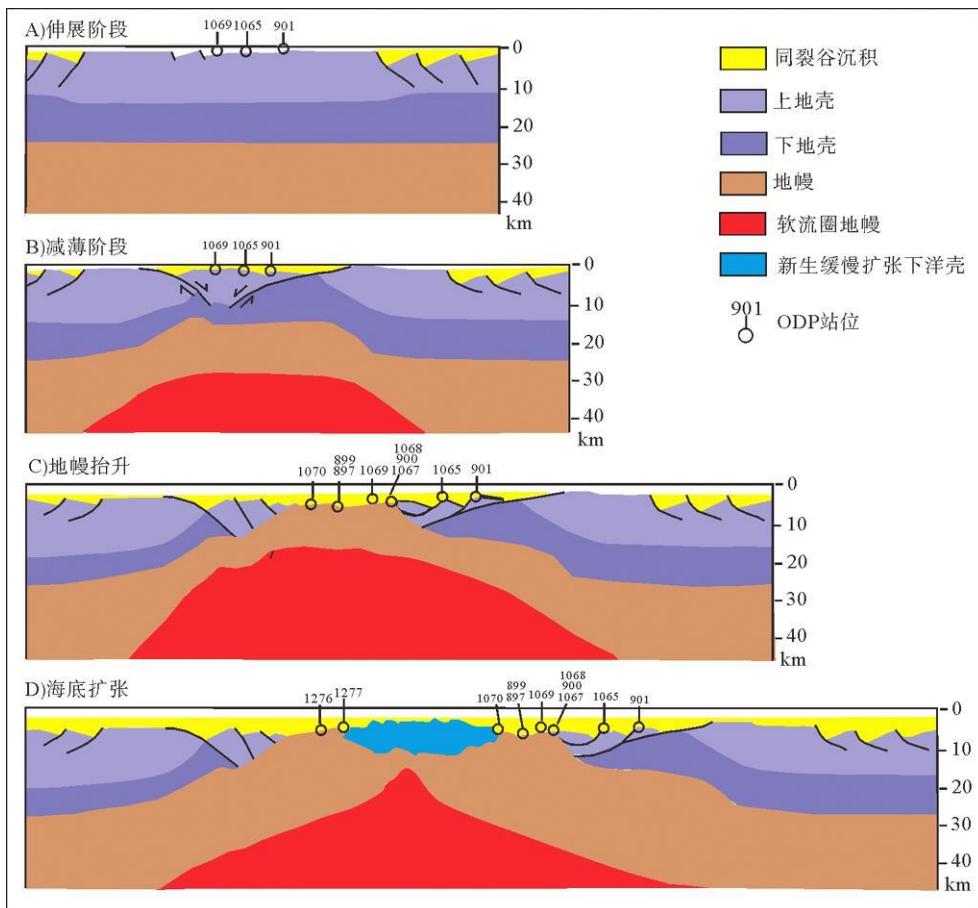


图7 典型非火山型陆缘海底扩张过程(据文献[86])

Fig. 7 The process of seafloor spreading in the typical non-volcanic continental margin

南海与典型非火山型被动边缘也存在不同之处, 即强烈的地幔活动。晚白垩纪开始, 印度板块与亚欧板块碰撞并楔入, 必然伴随着相应的地幔流动。Liu 等<sup>[27]</sup>通过地震层析成像和数值模拟, 证实了亚洲大陆下存在水平向东的地幔流。这股地幔流在东部受到太平洋俯冲的影响, 最后转向南、南东方向流动<sup>[26, 90-91]</sup>。因此, 我们认为在地幔流动和古南海向南俯冲的双重拖曳作用下, 南海发生 NW—SE 向的伸展、减薄。这里我们强调地幔流对南海打开的重要作用, 但并不是说地幔上涌导致了岩石圈减薄。南海北部陆缘广泛分布的玄武岩火山活动和地幔高速层, 则可能是南海岩石圈张裂后引发地幔上涌造成的结果。

在南海张裂过程中, 另一个不容忽视的因素是印欧碰撞引起的印支地块向东南挤出。根据对哀牢山—红河剪切带的研究, 一般认为其发生左旋运动的时间为 35~17 Ma<sup>[24-25]</sup>, 与南海海底扩张的时间基本一致<sup>[17]</sup>。Liu 等<sup>[92]</sup>通过地球物理调查资料及盆地模拟, 认为红河断裂带对南海的构造演化有着重要影响。地震资料显示, 南海共轭陆缘本身在地

壳厚度和伸展程度上存在明显的差异, 而造成这种差异的原因可能是裂前地壳流变性及相关岩石圈热结构的不同<sup>[93]</sup>, 同时, 也可能受印支地块的挤出影响。此外, 印支地块的挤出也可能造成了西南海盆和东部海盆在扩张时间、扩张速率上的不同。

随着古南海完全俯冲于巴拉望地块下, 南沙地块与加里曼丹—巴拉望碰撞(约 17 Ma), 南海停止扩张。通过对南海南部发育的前陆盆地系统的研究, 发现盆地形成自西南往东北, 时间为晚始新世末—早中新世—中中新世, 这与南海俯冲碰撞带形成的时间相对应<sup>[94]</sup>。简单地说, 南海是在三大板块相互作用下, 由古南海向南俯冲形成的。我们总结为综合作用下的被动扩张。我们强调古南海的俯冲、印支地块的挤出, 以及由印度板块北向碰撞引起的南东向的地幔流三大关键要素。

## 4 结论

将今论古是地学研究的基本思想, 我们结合南海现今的构造特征和大陆岩石圈张裂的一般规律,

以南海周围板块间相互作用为基础, 讨论了以上各模式所涉及的问题, 发现用一种机制去解释南海的演化是困难的。从以上讨论可知:

(1) 从南海陆缘的构造、盆地及断层发育特点看, 南海经历了拉张、张裂到海底扩张的演化过程, 拉张动力来源主要是古南海向南俯冲的拖曳力, 辅助于东南向的地幔流作用。因此, 南海北部形成了典型的被动大陆边缘, 南部盆地早期为拉张环境, 后期因古南海完全俯冲于巴拉望地块之下, 而形成碰撞挤压边缘。

(2) 南海北部陆缘广泛发现的高速层, 可能是扩张后期地幔流沿拉张薄弱面底侵造成的, 因而不同于地幔上涌引起南海的打开。南海现今普遍高的热流值, 也体现了南海深部地幔活动的影响。

(3) 印度板块与欧亚板块的碰撞、楔入以及东部太平洋板块俯冲的影响, 最终产生南、南东向的地幔流, 促进了南海地区的伸展和扩张。同时, 印支地块的强烈挤出对南海西部的拉张具有重要影响, 扩张轴发生旋转和跃迁。

(4) 我们将南海的形成演化模式总结为: 综合作用下的被动扩张。

#### 参考文献(References)

- [1] 专项综合报告编写组. 我国专属经济区和大陆架勘测专项综合报告 [M]. 北京: 海洋出版社, 2002: 610. [Project Report Team. Report of exploring and mapping EEZ and shelf of China [M]. Beijing: China Ocean Press, 2002: 610.]
- [2] 陈志豪, 李家彪, 吴自银, 等. 马尼拉海沟几何形态特征的构造演化意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(2): 59-65. [CHEN Zhihao, LI Jiabiao, WU Ziyin, et al. Tectonic evolution implication of geometry shape characteristics for Manila Trench [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009, 29 (2): 59-65.]
- [3] Karig D E. Origin and development of marginal basin in the Western Pacific [J]. J. Geophys. Res., 1971, 76: 2543-2561.
- [4] Karig D E. Plate convergence between the Philippines and Ryuku Islands [J]. Mar. Geol., 1973, 14: 153-168.
- [5] Ben Avraham, Uyeda. The evolution of the China basin and the Mesozoic paleogeography of Borneo [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1973, 18: 365-376.
- [6] 张文佑. 断块构造导论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1984. [ZHANG Wenyou. Block Tectonics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984.]
- [7] Honza E. Spreading mode of backarc basin in the western Pacific [J]. Tectonophysics, 1995, 251(1-4): 139-152.
- [8] 石耀霖, 王其允. 俯冲带的后撤与弧后扩张 [J]. 地球物理学报, 1993, 36(1): 37-43. [SHI Yaolin, WANG Qiyun. Roll-back subduction and back-arc opening [J]. Acta Geophysica Sinica, 1993, 36(1): 37-43.]
- [9] Tamaki K. Opening tectonics of the Japan Sea [C] // In: Taylor B, ed. Backarc Basins: The Tectonics and Magmatism. New York: Plenum Press, 1995: 407-420.
- [10] Flower M, Tamaki K, Hoang N. Mantle extrusion: a model for dispersed volcanism and DUPAL-like asthenosphere in East Asia and the Western pacific [C] // Mantle Dynamics and Plate Interactions East Asia, AGU Geodynamics Series, 1998, 27: 67-88.
- [11] Flower M, Russo R, Tamaki K. Mantle contamination and the Izu-Bonin-Mariana (IBM) "high-tide mark": evidence for mantle extrusion caused by Tethyan closure [J]. Tectonophysics, 2001, 333: 9-34.
- [12] 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): 203-212. [REN Jianye, LI Sitian. Spreading procedure and dynamic background of west Pacific marginal basins [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7 (3): 203-212]
- [13] Bowin C O, Lu R C, Lee C S, et al. Plate convergence and accretion in Taiwan-Luzon region [J]. AAPG Bull., 1978, 62: 1645-1762.
- [14] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Basin [C] // In: Hayes D E (ed). The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 1. Geophys. Monogr. Amer. Geophys. Union, Washington D. C., 1980, 23: 89-104.
- [15] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China basin [C] // In: Hayes D E (ed). The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2. Geophys. Monogr. Ser. AGU, Washington D. C., 1983, 27: 23-56.
- [16] 黎明碧, 金翔龙. 中国南海的形成演化及动力学机制研究综述 [J]. 科技通报, 2006, 22(1): 16-20. [LI Mingbi, JIN Xianglong. Review on formation and geodynamic of South China Sea [J]. Bulletin of Science and Technology, 2006, 22(1): 16-20.]
- [17] Brnais A, Patriat P, Tapponier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia [J]. J. Geophys. Res., 1993, 98 (B4): 6299-6328.
- [18] 姚伯初. 南海海盆新生代的构造演化史 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(2): 1-13. [YAO Bochu. Tectonic evolution of the South China Sea in Cenozoic [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1996, 16(2): 1-13.]
- [19] Sun Z, Zhou D, Zhong Z, et al. Research on the dynamics of the South China Sea opening: evidence from analogue modeling [J]. Sci. China (Ser. D: Earth Science), 2006, 49(10): 1053-1069.
- [20] Li C F, Zhou Z, Li J. Structure of the northernmost South China Sea continental margin and ocean basin: geophysical constraints and tectonic implication [J]. Marine Geophysical Researches, 2007, 28: 59-79.
- [21] Sun Z. 3D analogue modeling of the South China Sea: A dis-

- cussion on breakup pattern[ J]. Journal of Asian Earth Science, 2009, 34(4): 544-556.
- [ 22] Tapponnier P. On the mechanics of the collision between India and Asia[ J]. Geol. Soc. Spec. Publ., 1986, 19: 115-157.
- [ 23] Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts and basins during the India-Asia collision: An experimental approach[ J]. J. Geophys. Res., 1988, 93: 15085-15117.
- [ 24] Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, et al. New constraints on the structure, thermochronology and timing of the Ailao Shan - Red River shear zone[ J]. J. Geophys. Res., 2001, 106: 6683-6732.
- [ 25] Lacassin R, Maluski H, Leloup P H, et al. Tertiary diachronic extrusion and deformation of western Indochina: structural and Ar/Ar evidence from NW Thailand[ J]. J. Geophys. Res., 1997, 102: 10013-10037.
- [ 26] 谢建华, 夏斌, 张宴华, 等. 南海形成演化探究[ J]. 海洋科学进展, 2005, 23(2): 212-218. [ XIE Jianhua, XIA Bin, ZHANG Yanhua, et al. Study on formation and evolution of South China Sea[ J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(2): 212-218.]
- [ 27] Liu M, Cui X, Liu F. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: a mantle dynamic link to the Indo-Asian collision[ J]. Tectonophysics, 2004, 393(1-4): 29-42.
- [ 28] Hamilton W. Tectonics of the Indonesian region[ R]. US Geol. Survey Prof. Paper, 1979; 1078-1345.
- [ 29] 郭令智, 施央申, 马瑞士. 西太平洋中新生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成和演化[ J]. 地质学报, 1983, 57(1): 11-12. [ GUO Lingzhi, SHI Yangshen, MA Ruishi. Formation and evolution of continental margins and island arcs along West Pacific Ocean during Mesozoic and Cenozoic[ J]. Acta Geologica Sinica, 1983, 57(1): 11-12.]
- [ 30] 刘昭蜀, 杨树康, 何善谋, 等. 南海陆缘地堑系及边缘海的演化旋回[ J]. 热带海洋, 1983, 2(4): 251-259. [ LIU Zhaoshu, YANG Shukang, HE Shanmou, et al. The continental margin spreading of South China Sea and the cycle of evolution of marginal seas[ J]. Journal of Tropical Oceanography, 1983, 2(4): 251-259.]
- [ 31] 刘昭蜀, 陈忠, 潘宇. 南海海盆的形成演化探讨[ J]. 海洋科学, 1992, 4: 18-22. [ LIU Zhaoshu, CHEN Zhong, PAN Yu. A discussion on the origin and history of South China Sea basin[ J]. Marine Science, 1992, 4: 18-22.]
- [ 32] 陈国达. 东亚陆缘扩张带——一条离散式大陆边缘成因的探讨[ J]. 大地构造与成矿学, 1997, 21(4): 285-293. [ CHEN Guoda. The marginal extensional belt of East Asia continent: investigating the origin of a discrete continental margin[ J]. Tectonophysics, 1997, 21(4): 285-293.]
- [ 33] 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(I): 幔源包体[ J]. 地球化学, 2002, 31(3): 230-242. [ XU Yigang, HUANG Xiaolong, YAN Wen, et al. Constraints on the Cenozoic tectonic evolution of northern South China Sea (I): mantle-derived xenoliths[ J]. Geochimica, 2002, 31(3): 230-242.]
- [ 34] Wilson J. A possible origin of the Hawaiian islands[ J]. Canadian Journal of Physics, 1963, 41: 863-870.
- [ 35] Morgan W. Convection plumes in the lower mantle[ J]. Nature, 1971, 230: 42-43.
- [ 36] Hill R I, Campbell I H, Davies G F, et al. Mantle plumes and continental tectonics[ J]. Science, 1992, 256(5054): 186-193. DOI: 10.1126/science.256.5054.186.
- [ 37] 陈墨香, 夏斯高, 杨淑贞. 雷州半岛局部地热异常及形成机制[ J]. 地质科学, 1991(4): 369-383. [ CHEN Moxiang, XIA Sizhao, YANG Shuzhen. Local geothermal anomalies and their formation mechanisms on Leizhou peninsula, South China[ J]. Scientia Geologica Sinica, 1991(4): 369-383.]
- [ 38] Maruyama S. Plume tectonics[ J]. Journal of Geol. Soc. Japan, 1994, 100, 1: 24-29.
- [ 39] 曾维军, 李振五, 吴能友, 等. 南海区域的上地幔活动特征及印支地幔柱[ J]. 南海地质研究, 1997, 9: 1-19. [ ZENG Weijun, LI Zhenwu, WU Nengyou, et al. The upper mantle activation in South China Sea and the Indosinian mantle plume[ J]. Geological Research of South China Sea, 1997, 9: 1-19.]
- [ 40] 王贤觉, 吴明清, 梁德华. 南海玄武岩的某些地球化学特征[ J]. 地球化学, 1984, 4: 332-340. [ WANG Xianjue, WU Mingqing, LIANG Dehua. Characteristics of basalt in South China Sea[ J]. Geochimica, 1984, 4: 332-340.]
- [ 41] 鄢全树, 石学法. 海南地幔柱与南海形成演化[ J]. 高校地质学报, 2007, 13(2): 311-321. [ YAN Quanshu, SHI Xuefa. Hainan mantle plume and the formation and evolution of the South China Sea[ J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(2): 311-321.]
- [ 42] 解广轰, 涂勘, 王俊文, 等. 中国东部新生代玄武岩 Pb 同位素组成的地理分布特征和成因意义[ J]. 科学通报, 1989, 34(10): 772-775. [ XIE Guanghong, TU Kan, WANG Junwen, et al. Lead isotopic compositions of Cenozoic basalts from Eastern China: geographical control and genetic significance[ J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 34(10): 772-775.]
- [ 43] 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. Geochronological and geochemical constraint on the Cenozoic extension of Cathaysian lithosphere and tectonic evolution of the border sea basins in East Asia[ J]. Geochimica, 2002, 31(3): 213-221.]
- [ 44] 龚再升, 李思田. 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 Zaideng, LI Sitian. Analysis and Oil/Gas Accumulation of Northern Margin Basins of South China Sea[ M]. Beijing: Science Press, 1997.]
- [ 45] 李思田, 林畅松, 张启明. 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. Dynamic process of the periodic rifting and tectonic events since 10 Ma in the marginal basins north of the South China Sea[ J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(8): 797-810.]
- [ 46] 张健, 熊亮萍. 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. Deep dynamic and evolution mechanism of South China Sea[ J]. *Acta Geophysica Sinica*, 2001, 44(5): 602-610.]
- [47] Lebedev S, Chevrot S, Nolet G, et al. New seismic evidence for a deep mantle origin of the S. China basalts (the Hainan plume?) and other observations in SE Asia[ J]. *EOS Trans. AGU*, 2000, 81: 48-148.
- [48] Lebedev S, Nolet G. Upper mantle beneath Southeast Asia from S velocity tomography[ J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108, doi: 10.1029/2000JB000073.
- [49] Zhao D. Seismic images under 60 hotspots: search for mantle plumes[ J]. *Gondwana Research*, 2007, 12: 335-355.
- [50] Lei J, Zhao D, Steinberger B, et al. New seismic constraints on the upper mantle structure of the Hainan plume[ J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 173: 33-50.
- [51] Burchfiel B C, Stewart J H. 'Pull-apart' origin of the central segment of Death Valley, California[ J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1966, 77: 439-442.
- [52] Barka A, Aykut H S, Cohen H A, et al. Tectonic evolution of the Niksar and Tasova-Erbaa pull-apart basins, North Anatolian Fault Zone; their significance for the motion of the Anatolian block[ J]. *Tectonophysics*, 2000, 322: 243-264.
- [53] 许浚远, 张凌云. 欧亚板块东缘新生代盆地成因: 右行剪切拉分作用[ J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(3): 187-191. [ XU Junyuan, ZHANG Lingyun. Dextral shear splitting: formation mechanism of Cenozoic basins on eastern margin of Euasia plate[ J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(3): 187-191.]
- [54] 许浚远, 张凌云. 西北太平洋边缘及特提斯北缘中生代盆地成因(中): 锁链右行拉分裂谷系统[ J]. *石油与天然气地质*, 2000, 21(3): 185-190. [ XU Junyuan, ZHANG Lingyun. Genesis of Cenozoic basins in northwest Pacific margin(2): linked dextral pull apart basin system[ J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(3): 185-190.]
- [55] 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 South China Sea by dextral splitting of the East Asian continental margin[ J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(2): 180-190.]
- [56] 金性春, 周祖翼, 汪品先. 大洋钻探与中国地球科学[ M]. 上海: 同济大学出版社, 1995: 216-222. [ JIN Xingchun, ZHOU Zuyi, WANG Pinxian. Ocean drilling program and China earth science[ M]. Shanghai: Tongji University Press, 1995: 216-222.]
- [57] 姚伯初, 万玲. 中国南海海域岩石圈三维结构及演化[ M]. 北京: 地质出版社, 2006: 180-221. [ YAO Bochu, WAN Ling. 3D lithosphere structure and evolution of South China Sea[ M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 180-221.]
- [58] 唐鑫. 从板块构造观点论南海的成因[ J]. *地球物理学报*, 1981, 24(4): 427-436. [ TANG Xin. The formation of South China Sea based on tectonic theory. [ J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1981, 24(4): 427-436.]
- [59] 张训华, 李延成, 穆振华, 等. 南海盆地形成演化模式初探[ J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1997, 17(2): 1-6. [ ZHANG Xun-hua, LI Yan-cheng, MU Zhen-hua, et al. An approach to the formation and evolution model of South China Sea Basin[ J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1997, 17(2): 1-6.]
- [60] 林长松, 廖夏军, 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[ J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(1): 67-76.]
- [61] Ru K, Piggot J D. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea[ J]. *AAPG Bull.*, 1986, 70(9): 1136-1155.
- [62] 姚伯初, 曾维军. 南海北部陆缘东部的地壳结构[ J]. *地球物理学报*, 1994, 37(1): 27-35. [ YAO Bochu, ZENG Weijun. The crustal structure in the eastern part of the northern margin of the South China Sea[ J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1994, 37(1): 27-35.]
- [63] 何廉声. 南海的形成、演化与油气资源[ J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1988, 8(2): 15-28. [ HE Liansheng. Formation and petroleum of South China Sea[ J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1988, 8(2): 15-28.]
- [64] 吕文正. 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. [ LU Wenzheng. Magnetic anomalies and structural evolution of the central subbasin of South China Sea[ J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1987, 9(1): 69-78.]
- [65] 何廉声. 南海地质地球物理图集: 南海大地构造图[ M]. 广州: 广东地图出版社, 1987. [ HE Liansheng. Geology and Geophysics Atlas of South China Sea[ M]. Guangzhou: Guangdong Atlas Press, 1987.]
- [66] 梁德华, 刘宗惠. 南海形成机理及其含油气盆地[ C] // 国际地动力学讨论会论文. 1986: 1-8. [ LIANG Dehua, LIU Zonghui. Formation mechanism and petroleum basins of South China Sea[ C] // Symposium of International Workshop on Geodynamics, 1986: 1-8.]
- [67] England P, Houseman G. Finite strain calculations of continental deformation: Comparison with the India-Asia collision zone[ J]. *Geophys. Res.*, 1986, 91(B3): 3664-3676.
- [68] Dewey J, Cande S, Pitman W C. Tectonic evolution of the Indian/Eurasia Collision Zone[ J]. *Eclogae Geol. Helv.*, 1989, 82(3): 717-734.
- [69] Hall R, van Hattum. Impact of India-Asia collision on SE Asia: the record in Borneo[ J]. *Tectonophysics*, 2008, 451(1-4): 366-389.
- [70] Wang P L, Ching-Hua Lo, Sun-Lin Chung, 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.
- [71] Yang Y, Liu M. Crustal thickening and lateral extrusion during the Indo-Asian collision: A 3D viscous flow model[ J]. *Tectonophysics*, 2009, 465: 128-135.
- [72] 崔学军, 夏斌, 张宴华, 等. 地幔活动在南海扩张中的作用数值模拟与讨论[ J]. *大地构造与成矿学*, 2005, 29(3): 334-338. [ CUI Xuejun, XIA Bin, ZHANG Yanhua, et al. A numerical modeling study on the asthenosphere upwelling of South China Sea[ J]. *Geotectonica et Metallogenesis*, 2005, 29(3): 334-

- 338.]
- [73] 邓希光, 吴庐山, 杜德莉. 南海成因现状[J]. 南海地质研究, 2006, 18: 21-29. [ DENG Xiguang, WU Lushan, DU Deli. Reviews of the formation models of South China Sea[J]. Geological Research of South China Sea, 2006, 18: 21-29.]
- [74] Pigott J D, Ru K. Basin superposition on the northern margin of the South China Sea[J]. Tectonophysics, 1994, 235: 27-50.
- [75] Zhou D, Ru K, Chen H Z. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region[J]. Tectonophysics, 1995, 251: 161-177.
- [76] Lee T Y, Lawver L A. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia[J]. Tectonophysics, 1995, 251: 85-138.
- [77] Morley C K. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia[J]. Tectonophysics, 2002, 347: 189-215.
- [78] 姚伯初. 泛南海构造演化与板块构造动力学背景[C]//见李家彪主编. 中国边缘海形成演化与资源环境效应. 北京: 海洋出版社, 2008: 246-259. [ YAO Bochu. Tectonics and dynamic background of Pan-South China Sea[C]//In: LI J. (eds). Formation and Evolution of China's Marginal Seas and Its Effect on Environment and Natural Resources. Beijing: China Ocean Press, 2008: 246-259.]
- [79] Lister G S, Ethridge M A, Symonds P A. Detachment faulting and the evolution of passive continental margins[J]. Geology, 1986, 14: 246-250.
- [80] Whitmarsh R B, Manatschal G, Minshull T A. Evolution of magma-poor continental margins from rifting to seafloor spreading[J]. Nature, 2001, 413: 150-154.
- [81] Manatschal G, Froitzheim N, Rubenach M, et al. The role of detachment faulting in the formation of an ocean-continent transition: insights from the Iberia Abyssal Plain[C]//In: Nonvolcanic Rifting of Continental Margins: A Comparison of Evidence from Land and Sea. Geological Society, London Special Publications, 2001, 187: 405-428.
- [82] Manatschal G. New models for evolution of magma-poor rifted margins based on a review of data and concepts from West Iberia and the Alps[J]. Int. J. Earth Sci., 2004, 93: 432-466.
- [83] Russell S M, Whitmarsh R B. Magmatism at the west Iberia non-volcanic rifted continental margin: Evidence from analyses of magnetic anomalies[J]. Geophys. J. Int., 2003, 154: 706-730.
- [84] Bullock A D, Minshull T A. From continental extension to seafloor spreading: crustal structure of the Goban Spur rifted margin, southwest of the UK[J]. Geophys. J. Int., 2005, 163 (2): 527-546.
- [85] Lavier L, Manatschal G. A mechanism to thin the continental lithosphere at magma-poor margins[J]. Nature, 2006, 440: 324-328.
- [86] Pinvidic G, Manatschal G. The final rifting evolution at deep magma-poor passive margins from Iberia-Newfoundland: a new point of view[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2008, 244: 458-473.
- [87] 姚永坚, 夏斌. 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, 2005, 1: 1-11. [ YAO Yongjian, XIA Bin. Structure and evolution of southern South China Sea basins[J]. Geological Research of South China Sea, 2005, 1: 1-11.]
- [88] Schlüter H U, Hinz K, Block M. Tectono-stratigraphic terranes and detachment faulting of the South China Sea and Sulu Sea[J]. Marine Geology, 1996, 130: 39-78.
- [89] 吴世敏, 杨恬, 周蒂, 等. 南海南北共轭边缘伸展模型探讨[J]. 高校地质学报, 2005, 11(1): 105-110. [ WU Shimin, YANG Tian, ZHOU Di, et al. Discussion on the extension model for the conjugate continental margin of the South China Sea[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(1): 105-110.]
- [90] 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.]
- [91] 张健, 汪集旸. 南海北部陆缘构造扩张的深部地球动力学特征[J]. 中国科学D辑, 2000, 30(6): 561-567. [ ZHANG Jian, WANG Jiayang. The deep geodynamic background of tectonic spreading of northern South China Sea continental margin[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2000, 30(6): 561-567.]
- [92] Liu B M, Xia B. Southeastern extension of the Red River fault zone (RRFZ) and its tectonic evolution significance in western South China Sea[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2006, 49(8): 839-850.
- [93] Hayes D E, Nissen S S. The South China Sea margins: Implications for rifting contrasts[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 237: 601-616.
- [94] 张翀, 吴世敏, 丘学林. 南海南部海区前陆盆地形成与演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(1): 61-70. [ ZHANG Chong, WU Shimin, QIU Xuelin. Formation of foreland basins in the south of the South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007, 27(1): 61-70.]

## TECTONIC EVOLUTION MODES OF SOUTH CHINA SEA: PASSIVE SPREADING UNDER COMPLEX ACTIONS

LUAN Xiwu, ZHANG Liang

(Key Lab of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (IOCAS), Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Because of the location in the convergent hinge of Eurasian plate, India-Australian plate and Pacific plate, the geological processes of South China Sea are very complicated and have so far failed to establish a universally applicable model of tectonic evolution and thus become urgent issue of the South China Sea research to be resolved. In this paper, by summarizing the main modes of South China Sea tectonic evolution and analyzing the proofs and problems of these models, we found it's one-sided to study the formation and evolution of the South China Sea by one power source. Based on the analysis of structural characteristics of South China Sea, combined with foreign research achievements of continental lithosphere rifting, we consider that the main South China Sea basin has experienced a process from passive continental rifting to seafloor spreading. The process might be caused by slab pull of the proto South China Sea subduction, assisted with the southward and southeastward mantle flow. High-speed layer widely found in the northern South China Sea continental margin may be the result of mantle flow underplating along the thinning regions, which differs from the opening of the South China Sea caused by the mantle upwelling. Because of the obstruction from subduction of Pacific plate, the mantle flow generated by Indian plate moved towards south and southeast finally. The extrusion of Indo-China block has an important influence on the rifting of the western South China Sea.

**Key words:** tectonic evolution; seafloor spreading; mantle flow; proto South China Sea; South China Sea