

doi: 10.12097/gbc.2022.07.008

从陆缘伸展探讨新生代南海构造演化

梁光河^{1,2}, 张宝林^{1,2}

LIANG Guanghe^{1,2}, ZHANG Baolin^{1,2}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 矿产资源研究重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

1. Key Laboratory of Mineral Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

摘要: 南海的形成和演化是地学界长期争论的问题, 前人给出了多种成因模式, 目前较流行的模式是海底扩张, 但它难以合理解释南海海底扩张中的洋中脊跳跃现象及南海大洋中的大陆残片。基于欧亚东缘的陆缘伸展, 从地幔上涌和陆壳沿莫霍面的重力滑移的新大陆漂移模型出发, 通过横跨南海的几条地震勘探剖面的地质新解释, 研究了南海的形成和演化过程。结果说明, 南海的形成是一种“构造被动挤出+微陆块主动漂移”模式。构造被动挤出是指印度-欧亚碰撞造成的欧亚大陆东南缘的微陆块被大规模挤出, 而由陆缘伸展形成的微陆块在被挤出后发生了主动裂解漂移, 南海的海底扩张现象是诸多微陆块主动漂移的结果。这个新的模式能够合理地解释南海形成过程中的洋中脊跳跃现象及南海中大陆残片的成因机制。进一步恢复了南海演化过程中周边陆块的运动演化历史, 说明欧亚东缘在中生代晚期发生的大规模伸展构造运动是南海形成的基础, 新生代印度-欧亚碰撞是南海形成的直接动力, 微陆块的裂解漂移是南海形成的主要参与者。

关键词: 陆缘伸展; 南海成因; 构造演化; 动力机制; 大陆漂移

中图分类号: P534.6; P736.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)01-0020-13

Liang G H, Zhang B L. Discussion on the Cenozoic tectonic evolution of the South China Sea from continental margin extension. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(1): 20–32

Abstract: The formation and evolution of the South China Sea has been a long-standing debate in the field of geology. Many genetic models have been proposed by predecessors. The most popular model is seafloor spreading model, but it is difficult to reasonably explain the phenomenon of mid-ocean ridge jumping and continental debris in the South China Sea. We based on the stretch of the continental margin of northeast Eurasia, from the new continent drift model driven by mantle upwelling and gravitational slip along the Moho surface, using new geological explanation for several seismic profiles across the South China Sea, to study the process of the formation and evolution of the South China Sea, the result shows that the formation of the South China Sea is a kind of "passive tectonic extrusion + active microcontinents drift" mode. Passive tectonic extrusion was caused by the Indo-Eurasia collision, and the microcontinents formed by the extension of the continental margin drifted actively after extrusion. The seafloor spreading phenomenon in the South China Sea is the result of the active drift of many microcontinents. This new model can reasonably explain the mid-ocean ridge jumping phenomenon during the formation of the South China Sea and the genetic mechanism of the continental debris in the South China Sea. We have further recovered the movement and evolution history of the surrounding continents during the evolution of the South China Sea. It is concluded that the large scale extensional tectonic movement in the eastern margin of Eurasia in the Late Mesozoic was the foundation for the formation of the South China Sea, the India-Eurasia collision in Cenozoic was the direct driving

收稿日期: 2022-07-04; 修订日期: 2023-03-13

资助项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目《青藏高原盐湖资源变化调查与远景评价》(编号: 2019QZKK0805)

作者简介: 梁光河(1965-), 男, 博士后, 副研究员, 从事地球物理与大地构造研究。E-mail: lgh@mail.iggcas.ac.cn

force for the formation of the South China Sea, and the microcontinents drift was the main participant in the formation of the South China Sea. The proposed new continent drift model provides a new dynamic model for plate motion.

Key words: continental margin extension; genesis of South China Sea; tectonic evolution; dynamic mechanism; continental drift

南海整体是一个大海盆, 是中国三大边缘海之一。南海的形成机制是地学界长期争论的问题, 目前国内外至少提出了 5 种演化模式。包括: ①构造挤出模式(Tapponnier et al., 1982; Briaies et al., 1993; Flower et al., 1998; Replumaz et al., 2001; Liu et al., 2004; 谢建华等, 2005), 该模式影响巨大, 认为在逃逸挤出构造的影响下, 印度-欧亚大陆碰撞区及其东南部辐射区的软流圈向着东南方向流动, 导致局部软流圈上涌, 致使华南东南部边缘发生部分小块体的裂离, 从而催生出南海。②海底扩张模式(Karig, 1971; Taylor et al., 1983; Shi et al., 2012; Wu et al., 2016, 2018; Sun, 2017; Ding et al., 2018), 认为华南在中生代受太平洋俯冲作用影响, 发育了安第斯型造山带。而古新世—始新世期间, 西太平洋俯冲带从华南大陆边缘后撤, 形成弧后盆地, 进一步基于弧后盆地通过海底扩张模式形成了南海。③俯冲拖拽模式(Holloway, 1982; Rangin, 1999), 认为古南海向南俯冲于婆罗洲/沙巴之下, 该俯冲对华南边缘的小块体具有拖拽力, 引起华南陆块南缘的拉张伸展, 导致小块体飘离, 形成南海。④地幔柱模式(Zhou et al., 2009; Yan et al., 2014; Zhang et al., 2018), 认为华南南缘在海南地幔柱的作用下, 在晚新生代发育大量大陆溢流玄武岩, 受地幔上涌影响, 地壳张裂致使南海形成。⑤陆缘扩张模式(郭令智等, 1983; 刘昭蜀等, 1983; 陈国达, 1997), 陈国达(1997)明确指出, “陆缘扩张”是新生代以来中国东部陆壳拉伸过程中的主要构造作用。但这一模式很难被大多数学者接受(栾锡武等, 2009)。

以上 5 个演化模式都能找到证据支持, 但也有与事实不符的地方(栾锡武等, 2009)。因为任何单一演化模式都不能充分合理地解释南海的成因, 也不能确定哪种动力机制对南海形成起到关键作用。目前主流的模式主要有 2 种: 一个是海底扩张模式, 认为南海是由传统的海底扩张在新生代形成的。但该模式存在 3 个关键问题没有得到合理解释: ①南海中央海盆地目前至少鉴别出来 3 条洋中脊(MOR), 从北往南分别是 30~28.5 Ma、33~23.6 Ma 和 23.6~15 Ma 期间活动的洋中脊(余梦明, 2018), 意味着南

海洋中脊先从中间破裂, 之后在南海北部产生新破裂, 形成新的洋中脊, 最后在南海南部又形成一个新的洋中脊。也就是说南海的海底扩张存在明显的洋中脊跳跃现象(邵磊等, 2004; Li et al., 2014)。事实上, 南海存在洋中脊跳跃并不是特例, 在北大西洋裂解过程中也存在洋中脊跳跃现象(Schiffer et al., 2015)。但对于洋中脊为什么会发生跳跃并没有给出很好解释, 洋脊跃迁的机制和过程仍然不清晰(邵磊等, 2004)。②在南海大洋区域发现古老大陆残片。中国地质调查局广州海洋局在南海洋中脊附近发现约 110 Ma 的古老花岗岩和变沉积岩(邱燕等, 2008), 这是海底扩张模式难以合理解释的。③南海的磁异常条带之间存在较大的夹角, 同一条带也存在多处弯曲, 这与大西洋是矛盾的(栾锡武等, 2009)。

另一种模式是构造被动挤出模式, 认为印度板块与欧亚板块碰撞及碰撞后的楔入, 导致青藏高原隆升, 同时又引起欧亚大陆东缘的挤出, 致使印支板块向东南方向长距离滑移, 促使加里曼丹地块向南漂移, 引起南海的扩张(Tapponnier et al., 1982, 1986)。该模式也存在 2 个问题: ①近期的研究说明, 南海的扩张表现为“剪刀式”由东向西扩张(汪品先等, 2019), 说明南海东部扩展在先, 如果按照构造挤出模式, 应该南海西部扩展在先。②构造挤出模式只能模拟华南、印支等地块的挤出构造运动, 而不能模拟南海的扩张运动, 印支地块的挤出对南海的打开有怎样的促进作用? 仍需研究。

总之, 南海在新生代形成过程中还存在 2 个关键问题, 用现有的模式难以合理解释, 一是洋中脊跳跃问题, 二是南海中央海盆发现的大陆残片问题, 过去大多数研究回避了南海洋壳上发现的大陆残片。针对这些问题, 本文基于大量地质和地球物理资料的综合研究, 在横跨南海南北向的 2 条深反射地震勘探资料综合地质解释的基础上, 提出了“被动挤出+主动漂移”的南海成因机制新模式, 认为欧亚东南缘大陆板块向南东挤出的过程中, 处于板块前部的地幔上涌, 产生伸展构造, 并使得陆块发生裂解, 裂解后的微陆块主动向南漂移, 撕出了新南海。

1 地质背景

南海位于欧亚、太平洋和印澳三大板块汇聚的中心(栾锡武等, 2009)。其大地构造位置非常特殊, 被认为是开展边缘海构造演化研究的天然实验室。南海在地形上呈向东开口的喇叭状, 是一个南西—北东走向的半封闭海。其洋—陆边界(南北区域)均为减薄的大陆地壳(Hayes et al., 2005), 它们构成了一对近似共轭的被动大陆边缘(Taylor et al., 1983)。总体上, 南海洋盆可分为西南次海盆和东部次海盆。该区域最老的地层为中元古界, 古生代、中生代及新生代地层广泛分布。石油勘探结果表明, 南海区域分布约 30 个新生代沉积盆地(张功成等, 2018), 它们在新世代早期多为陆相沉积, 晚期转变为海相沉积。这些盆地基底主要为前中生代地层或变质岩。

关于南海的形成时间, 主要通过磁异常条带和地球物理勘查确定, 在南海洋盆内能够识别出较清晰的磁异常条带(Taylor et al., 1983; 姚伯初等, 2006; Li et al., 2014)。海底磁异常条带表明, 海底扩张时间处于早渐新世—中中新世之间, 并在 23 Ma 左右发生过洋中脊跃迁。事实上, 目前确认南海至少发生过 2 次洋中脊跃迁, 形成了 3 条洋中脊(图 1 中①②③号 MOR)。东部次海盆比西南次海盆较早进入海底扩张阶段, 东部次海盆的海底扩张时间为 33~15 Ma(Briaies et al., 1993; 汪品先, 2012), 而西南次海盆在早中新世发生了初始海底扩张(姚伯初等, 2006), 之前该区域处于大陆拉伸减薄阶段。因此, 西南次海盆比东部次海盆具有更宽广的被动大陆边缘(Hayes et al., 2005)。进一步研究表明, 南海海底扩张速率在约 26 Ma 突然加速至最高水平, 并在约 23.6 Ma 发生洋中脊的向南跃迁和西南次海盆的初始打开事件(Li et al., 2014)。

南海存在 2 次洋中脊跳跃, 说明南海洋壳年龄不符合传统的大西洋型海底扩张模式给出的洋壳年龄从洋中脊向两侧对称线性增加的特征。事实上, 从图 1 中南海火山岩年龄的宏观分布趋势看, 从南海北部到南海南部火成岩年龄逐渐变年轻, 由珠江口盆地北部的大于 33 Ma, 到珠江口盆地南部的小于 23.8 Ma(图 2), 继续往南到①号洋中脊南侧的 14 Ma, 再进一步往南到③号洋中脊上的约 3.5 Ma, 最后

再向南到礼乐滩区域的约 0.5 Ma, 总体呈现单向非对称变化特征。

2 大陆漂移与地震勘探证据

2.1 陆缘伸展与新大陆漂移模型

陆缘伸展和大陆边缘发育的伸展构造密切相关, 伸展构造多表现为正向滑动为主的断层、剪切带和拆离带组合型式, 发育在地壳不同的层次、尺度、区域构造背景和构造演化阶段(朱志澄, 2003)。例如, 在大陆地壳的伸展过程中, 主要表现为伴随地幔物质的上隆, 地热梯度升高, 形成韧塑性的中间滑脱层。隆起高点两侧断块在自身重力作用下形成拉伸作用, 使得地壳厚度变薄。伸展构造往往与断陷盆地、变质核杂岩、拆离断层密切相关。如果拆离断层发育在莫霍面上, 就表现为威尔逊旋回过程大洋形成初期的裂谷阶段(图 3)。

笔者之前的研究已经提出了“新大陆漂移”模式, 认为大陆板块能够在热力驱动下发生漂移(梁光河等, 2022), 类似平底热锅上的奶油会移动。这个驱动力最初来源于大陆裂解中的地幔上涌, 在大陆板块后部的莫霍面产生一个斜坡, 因大陆板块自身重力作用沿倾斜的莫霍面滑脱而移动, 已经移动的大陆板块后部降压, 诱发地幔熔融进一步上涌, 上涌的地幔再进一步造斜, 从而推动板块进一步移动, 这是一个连锁的造斜和重力滑脱过程(图 2), 其结果是大陆板块仰冲在大洋板块之上发生漂移。其中地幔上涌的根源在于大陆移动后在尾部发生降压, 降压导致地幔上涌, 这是关键, 其本质在于降压熔融后地幔物质从高密度变为低密度, 如密度从上地幔的 3.3 g/cm³ 变为洋壳浅部的约 3.0 g/cm³, 密度减小导致体积增加。大陆板块之所以能够克服巨大阻力向前滑移, 很重要的一个原因是大陆板块迎冲在大洋板块上, 很多含水矿物进入俯冲带, 无论陆壳还是洋壳, 在含水情况下的熔融温度可以下降数百摄氏度。因此, 大陆板块俯冲进入下地壳区域时就会发生部分熔融, 形成软弱带, 大陆漂移类似大陆板块不断陷入软泥的过程(图 3)。基于这个新的大陆漂移动力模型, 大陆板块漂移之后, 可能在大洋上散落大陆残片, 也可能留下火山岛(火山爆发), 在特定情况下, 部分地幔上涌能量很大, 可能上升到更高的位置而留下多个洋脊(显示为洋中脊特征), 即发生洋中脊跳跃现象。这个模式也说明, 俯冲带深部发生部分

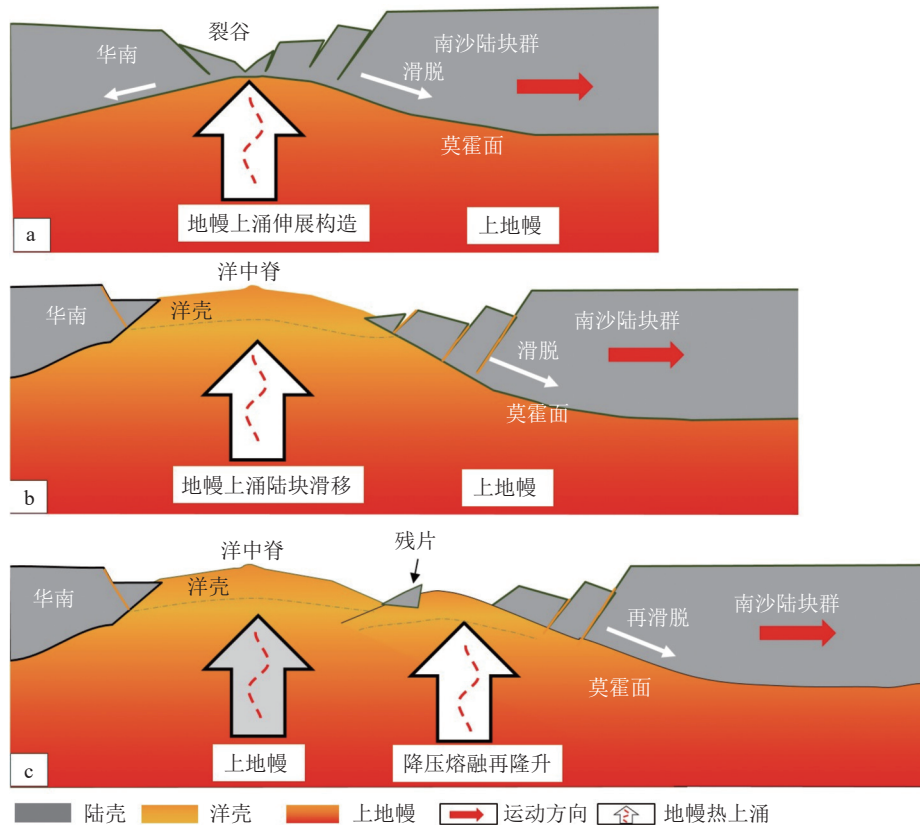


图2 地幔上涌和重力滑移示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mantle upwelling and gravity slip

a—地幔上涌形成伸展构造; b—地幔上涌造成重力滑移; c—陆块重力滑移后, 在后面降压造成地幔熔融再次上涌和重力再次滑移

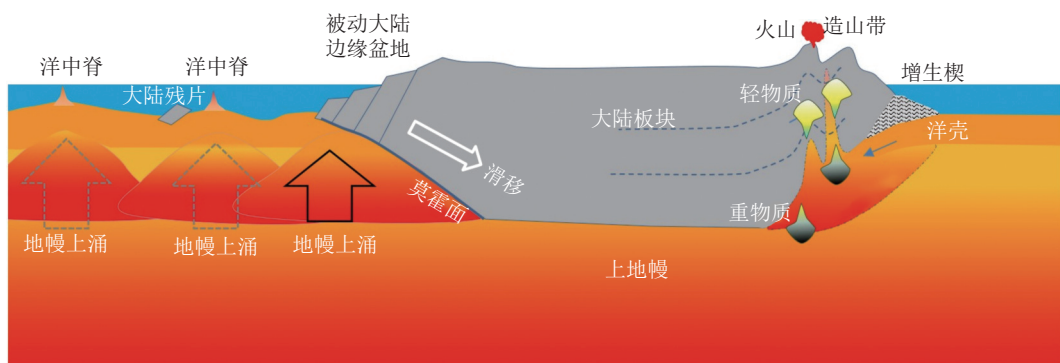


图3 地幔上涌和重力滑移双驱动新大陆漂移模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the new continent drift model, demonstrating the process is driven by mantle upwelling and gravitational slip

面产生了大陆漂移, 那么岩石圈地幔就会类似传送带一样搭载着洋壳和陆壳以同样的速度运动, 那样就不能合理解释大洋中的大陆残片形成。这说明, 重力滑移运动仅发生在莫霍面上, 因为陆壳厚度远大于洋壳厚度, 其自重更大, 相比洋壳产生的重力滑移力, 陆壳可以产生更大的滑移驱动力。本文强调

的大陆板块指的是大陆地壳, 提出的新大陆漂移模型与一百年前魏格纳提出的大陆漂移一样(Wegener, 2001), 都认为较轻硅铝质的大陆块漂浮在较重的黏性硅镁层之上, 然后发生漂移。不同点是, 驱动大陆漂移的动力机制与魏格纳不同。因此, 本文给出了“新大陆漂移”模型, 以区别于传统的“大陆漂移”模型。

2.2 两条地震勘探长剖面控制的南海构造格架

横穿南海的 2 条反射波法地震勘探剖面揭示了南海的构造格架和变化特征(图 4), 其中 A-B 剖面是横穿南海的 GHD1 地震勘探大剖面, 而 C-D 剖面是 GHD2 地震勘探大剖面(雷超, 2012)。对这 2 条大剖面的宏观构造格架进行了新的地质解释。从莫霍面的曲线形态推测地壳的运动方向, 莫霍面倾斜方向代表其上大陆地块的运动方向和状态。从 C-D 剖面两侧地块看, 它们都存在重力滑移驱动力作用下向两侧运动的驱动力。而从 A-B 剖面看则有所不同, 说明在该区域加里曼丹地块存在向北运动的驱动力, 同时也说明, 加里曼丹地块存在左旋运动, 而西北侧相邻的巴拉望陆块却向南东方向漂移。A-B 剖面的 B 端反映了南沙地块的运动状态, 本文之所以给出运动方向为北北西方向, 能够从更详细的地震勘探剖面特征看出来。在平面图上给出了各个陆块当前的运动方向(以洋壳不动为参照系)。

图 4 说明, 南海周边不同区域运动方向存在差异, 大陆板块非完全刚性, 更多地表现为黏塑性特征。例如, 印度大陆现在已经和欧亚大陆碰撞拼合, 但欧亚大陆不同区域运动方向差异巨大, 印度大陆向北, 而欧亚东缘向东运动, 东南亚向南东运动。特别是华南大陆的运动状态, 通过 GPS 观测, 整体向南东方向运动, 似乎与本文给出的向北北东方向运动矛盾。其实这是参照系的问题, GPS 观测是以西伯利亚地台为参照系, 本文是以洋中脊(或洋壳)为参照系, 而实际上西伯利亚地台相对于洋壳在印度大陆北漂的推挤下也存在向北的运动, 因此, 华南大陆相对于洋壳的运动状态完全可能是北北东方向。至于南海东部和东南部的菲律宾地块、台湾地块和巴拉望微地块, 其当前的运动方向能够得到 GPS 及地震观测的印证(孙金龙等, 2014)。

前人研究表明, 南海洋壳是 33~15 Ma 形成的。在 C-D 剖面中, 洋壳南北宽度约 1000 km, 意味着在

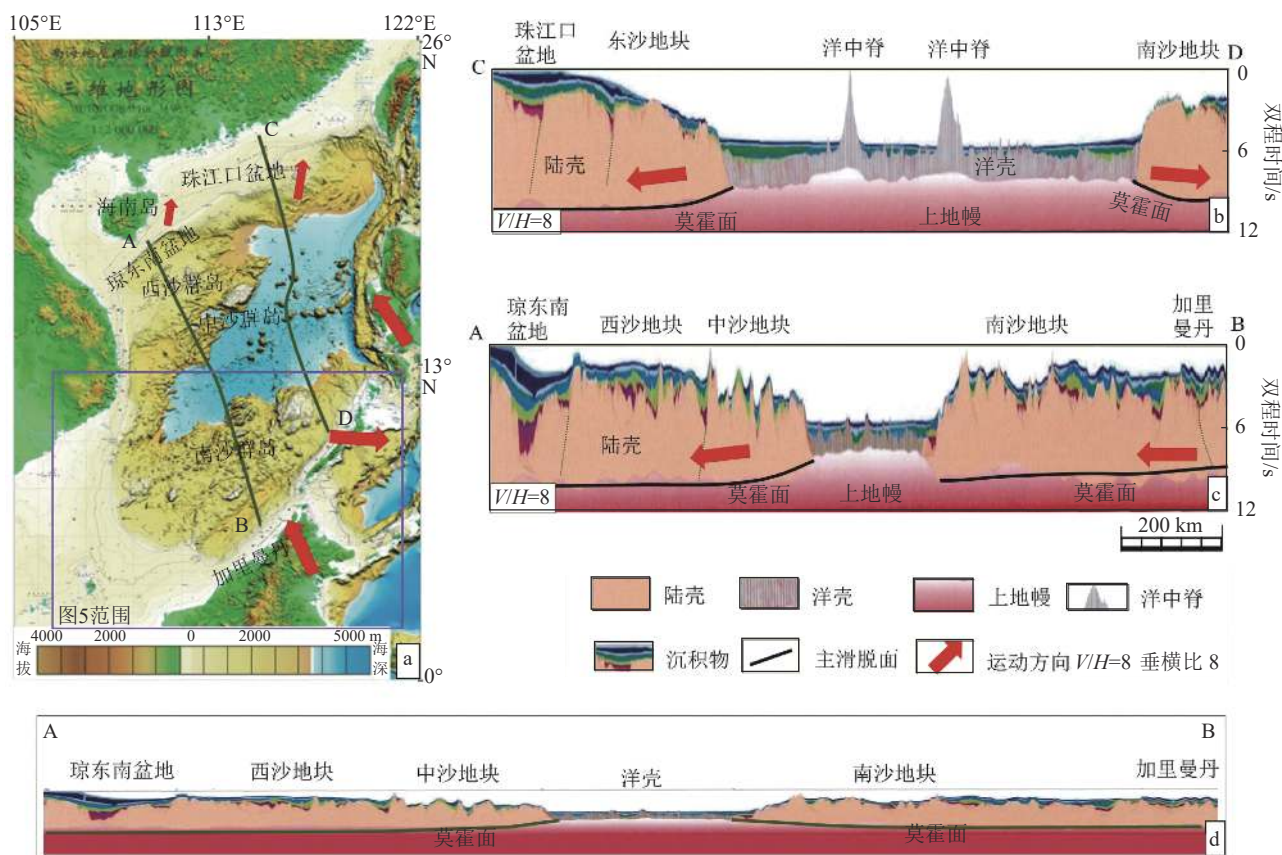


图 4 横穿南海的 2 条地震勘探剖面特征及地质解释(据雷超, 2012 修改)(图中箭头指示推测的陆壳相对洋壳运动方向和大小)

Fig. 4 Characteristics and geological interpretation of two seismic exploration profiles across the South China Sea

a—地震勘探剖面位置; b—地震勘探剖面 C-D 及地质解释; c—地震勘探剖面 A-B 及地质解释;
d—地震勘探剖面 A-B 的纵横实际比例显示

这个时间段, 华南大陆必须往北运动约 500 km 才能与之匹配。这也为郿庐断裂带的运动提供了动力机制, 而且目前华南仍在向北东运动, 其动力机制也是沿莫霍面的陆壳重力滑移力。南海东侧张开宽度大于西侧, 说明华南南部向北的陆壳重力滑移驱动力东侧大于西侧, 因此总体上华南向北运动的过程中, 伴随着左旋运动(梁光河, 2018)。值得注意的是, 该剖面经过了 2 个洋中脊。

2.3 南海南部大陆边缘的地震勘探细节特征

为了从细节上说明南海南部大陆边缘当前所处的构造环境是挤压环境还是伸展环境, 笔者通过图 5 给出了前人所做的 3 条典型地震勘探剖面, 其中剖面 1 中沉积层以正断层为主, 表明该区域为伸展构造环境, 说明该剖面上的长条形巴拉望(Palawan)地块正在向南东方向运动。参考该区地块总体运动趋势, 推测其正向南东方向缓慢运动。从该剖面

看, 莫霍面斜坡较缓, 因此滑移动力较小。剖面 2 为逆冲断裂发育区, 说明该区南沙地块和加里曼丹地块正在向北西方向运动, 对该区域产生挤压, 形成挤压环境。剖面 3 表现为以正断层为主, 反映伸展构造特征, 说明该区加里曼丹正在向南东方向漂移, 对该区域产生拉伸。图 5 中负花状断裂系统发育, 说明拉伸中还存在走滑运动。综合以上构造特征推断, 加里曼丹正在发生逆时针旋转, 而其北东侧地块正在向北西方向漂移, 如图 5-a 中红色箭头所示。

3 讨论

3.1 南海成因机制

新的大陆漂移模型可以合理地解释南海的成因机制。地球上相邻大陆板块或微陆块之间发生漂移是相互影响的, 只有跳出南海看南海, 才能更准确地

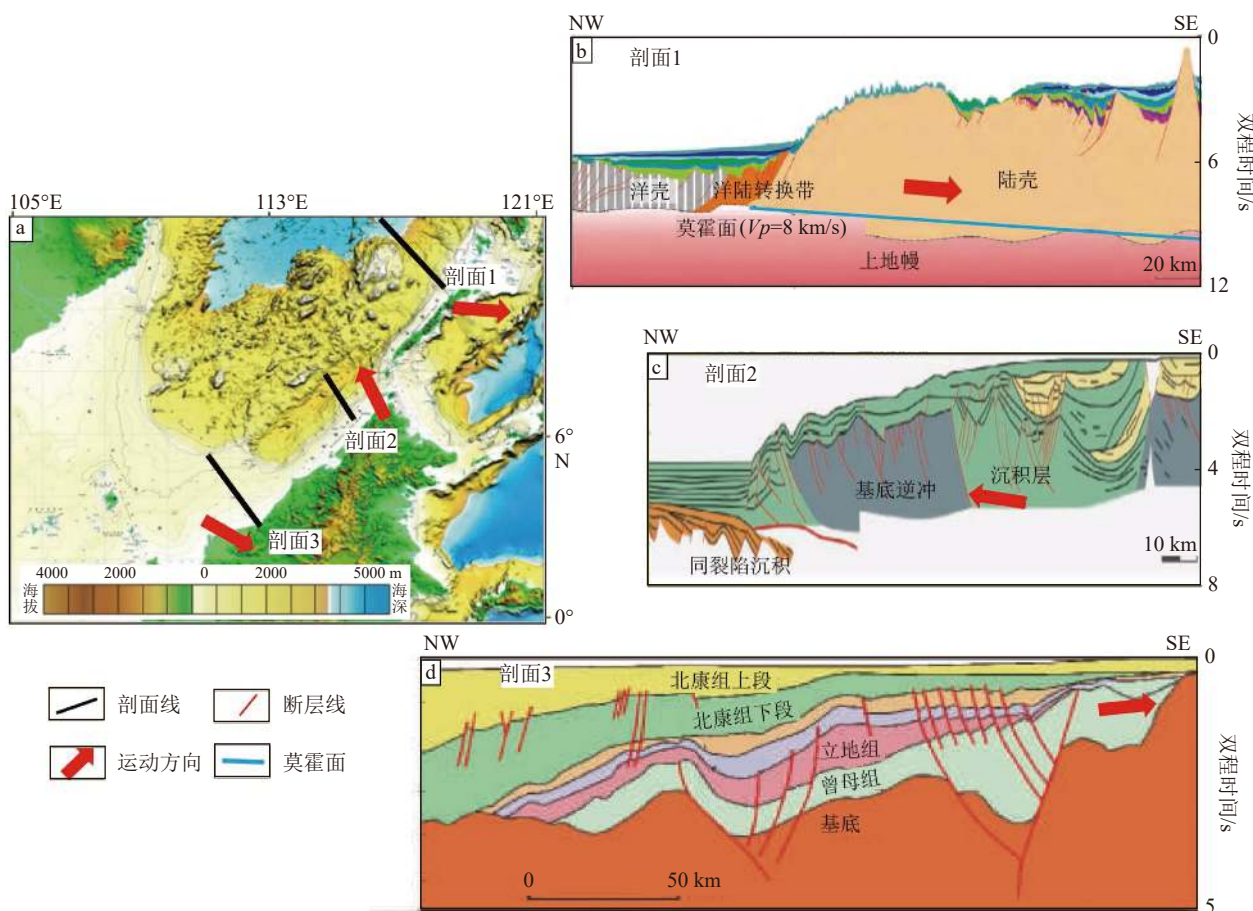


图 5 南海南部 3 条地震勘探剖面特征及地质解释(据施秋华等 2013; 雷超等, 2015 修改)

Fig. 5 Characteristics and geological interpretation of three seismic exploration profiles in the southern South China Sea

a—地震勘探剖面位置图; b—地震勘探剖面 1 及地质解释; c—地震勘探剖面 2 及地质解释; d—地震勘探剖面 3 及地质解释

理解南海的形成和演化过程。从全球地形图可以非常清晰地看出,大陆板块在漂移后留下了明显的尾迹,由此可以通过这些尾迹追踪各个陆块的来源(图 6)。大陆漂移的证据除传统的古地磁标志外,最重要的是大陆漂移的尾迹证据,尾迹主要反映为岛弧(岛链),而岛弧(岛链)主要由火山岩和大陆残片及(断裂)构造带组成。

从南海及周边的地貌特征也可以看出,印支地块、马来西亚和印度尼西亚是印度-欧亚碰撞后被挤出来的,菲律宾、台湾、加里曼丹等陆块也在这个大碰撞过程中从华南裂解开来,并发生大规模漂移。在碰撞-挤出-漂移过程中,撕出了南海海盆。

3.2 欧亚东南缘新生代构造演化

越来越多的证据说明,仅通过一种动力模式研究南海的形成和演化史是片面的(栾锡武等, 2009)。由此提出南海形成的“被动挤出+主动漂移”模式。这个模式有 2 个动力源,分别是被动源和主动源。

被动源来自印度板块的北漂及印度与欧亚的碰撞。主动源是被挤出裂解后的微陆块主动漂移,其动力机制是新大陆漂移模式,即在热上涌动力驱动下的主动滑移漂移。

印度大陆最早于古新世—早始新世(50~70 Ma)开始与欧亚大陆发生软碰撞(Yin et al., 2000),引起软流圈向东—南东侧向流动,致使华南和华东陆缘处于伸展状态(Flower et al., 1998; Liu et al., 2004)。更多的研究说明,南海陆缘基底在扩张前至少经历了早白垩世和早新生代 2 个伸展阶段,导致南海陆缘减薄(Sun et al., 2021)。

由此可以梳理出南海的形成过程: 新生代初期,海南岛、日本、菲律宾、南沙、加里曼丹、马来西亚、印度尼西亚等陆块都拼贴在欧亚东南缘。首先,在印度欧亚碰撞和欧亚整体东漂的过程中(图 7-a),欧亚大陆东南缘的前缘部分受到洋壳俯冲挤压,含水的大洋板块在俯冲带深部发生部分熔融,造成地幔

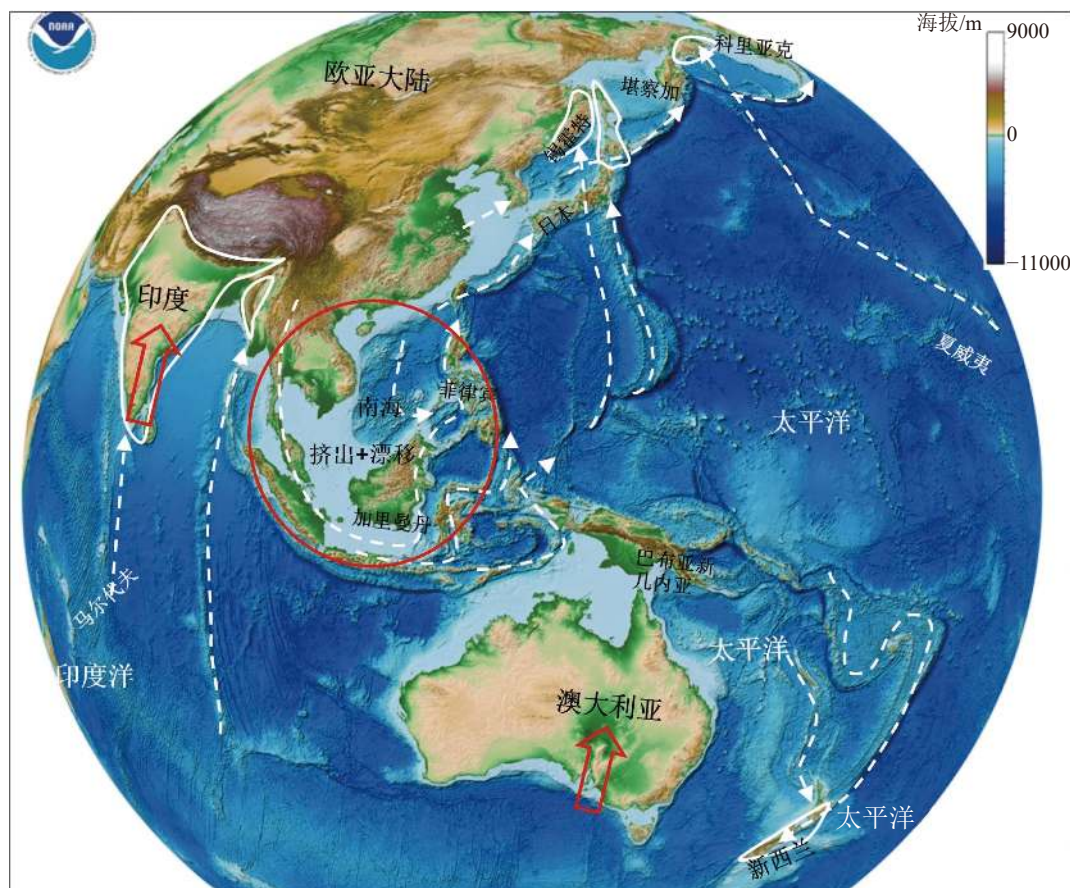


图 6 新大陆漂移世界观和南海“挤出+漂移”模式
(白色虚线指示陆块漂移轨迹和方向)

Fig. 6 Worldview of the new continent drift and "extrusion + drift" model of the South China Sea

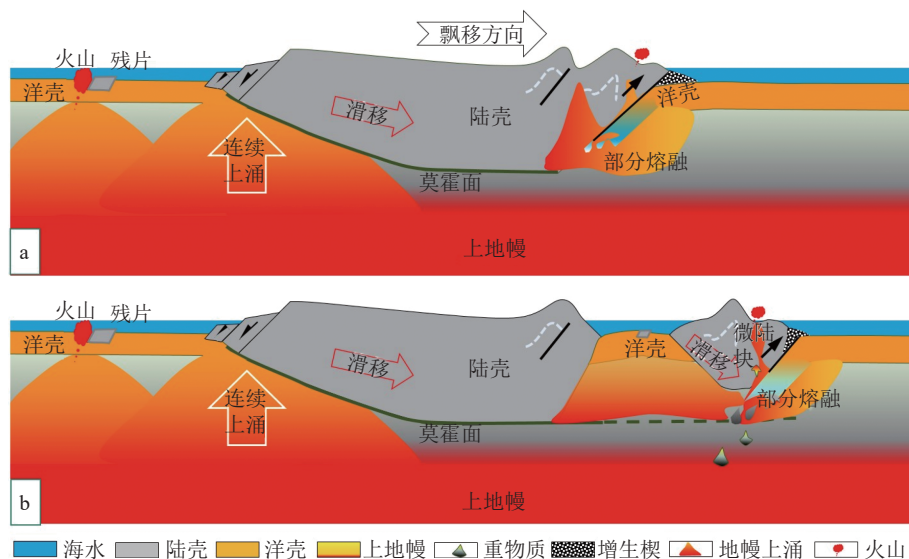


图7 陆缘裂解单向拉伸漂移模式

Fig. 7 One-direction stretching drift model of continental margin cracking

a—大陆漂移的初始状态; b—陆缘裂解后的微陆块漂移

上涌形成伸展构造,发生陆缘大规模裂解,形成微陆块;之后,微陆块发生主动漂移(图7-b),随着这些陆块的撕开,南海形成了洋盆;最后,陆块在澳大利亚北漂的作用下整体左旋转向北漂,对南海产生挤压,南海停止扩张。这一过程与南海最新的研究结果吻合(汪品先等,2019),证明南海是“板缘破裂”而不是大西洋型“板内破裂”。也即南海的成因是“挤-拉-挤”模式,而不同于大西洋成因的“拉-拉-拉”模式(汪品先等,2019)。

新的成因机制可以合理地解释南海的所有地质现象,包括在南海洋壳发现的古大陆残片,应该是菲律宾、南沙和加里曼丹地块在主动漂移过程中撒落下来的残片。洋中脊跳跃现象,是在大陆漂移过程中,地幔上涌到更高处形成的。南海的形成是板块单向拉张的结果,南海中的磁条带应是不同时期岩浆沿断裂多次侵入造成的,而与海底扩张无关(张训华,1997)。中国海陆各块体的演化与欧亚板块、太平洋板块和印度板块的相互作用密切相关(张训华等,2014)。

地球化学研究说明,南海的形成是岩石圈自北向南主动伸展扩张的结果(徐义刚等,2002)。这与本文提出的大陆主动漂移模式一致。事实上,如果以华南固定不动为参照系,那么南海的形成就是大陆漂移单向拉张形成的;如果以南海洋中脊固定不动为参照系,那么南海就是由标准的海底扩张双向

拉张形成的。

中国东部新生代陆缘裂解的动力机制是2个方面综合作用的结果:一方面,在新生代早期欧亚板块向东漂移造成的陆缘地壳流上涌,形成伸展构造,使得欧亚东缘发生初始裂解。另一方面,在新生代中晚期,印度大陆俯冲到欧亚板块之下,总体抬高了欧亚板块在青藏高原区域的莫霍面。伴随着青藏高原的隆升,欧亚东缘发生了造山后的重力垮塌,陆缘最外侧地块裂解后漂移,撕开了渤海、黄海、东海及南海(图8、图9)。更细致的地震勘探资料也证实(Camanni et al., 2021),当前南海北部大陆边缘的莫霍面整体向北倾斜(图10,剖面位置见图8),与图9给出的横跨南海的构造格架一致,进一步支持了上述观点。其中图9-a中上部箭头分别表示不同区域的运动方向和速度,图9-b中右侧台湾陆块仰冲在欧亚大陆之上向左漂移,图9-c中右侧加里曼丹陆块上部的2个箭头,分别指早期向右漂移运动,后期又向左运动(左旋运动)。

3.3 南海及周边地块新生代演化过程

越来越多的地质证据说明,早古近纪以来,南海的扩张与太平洋板块并没有直接关系,而与加里曼丹等微陆块的向南东漂移密切相关(Taylor et al., 1983)。古地磁研究说明,南海发生海底扩张期间,菲律宾地块和菲律宾海板块位于赤道附近,它们在新世代晚期才到达当前位置(姚伯初等,2006)。进

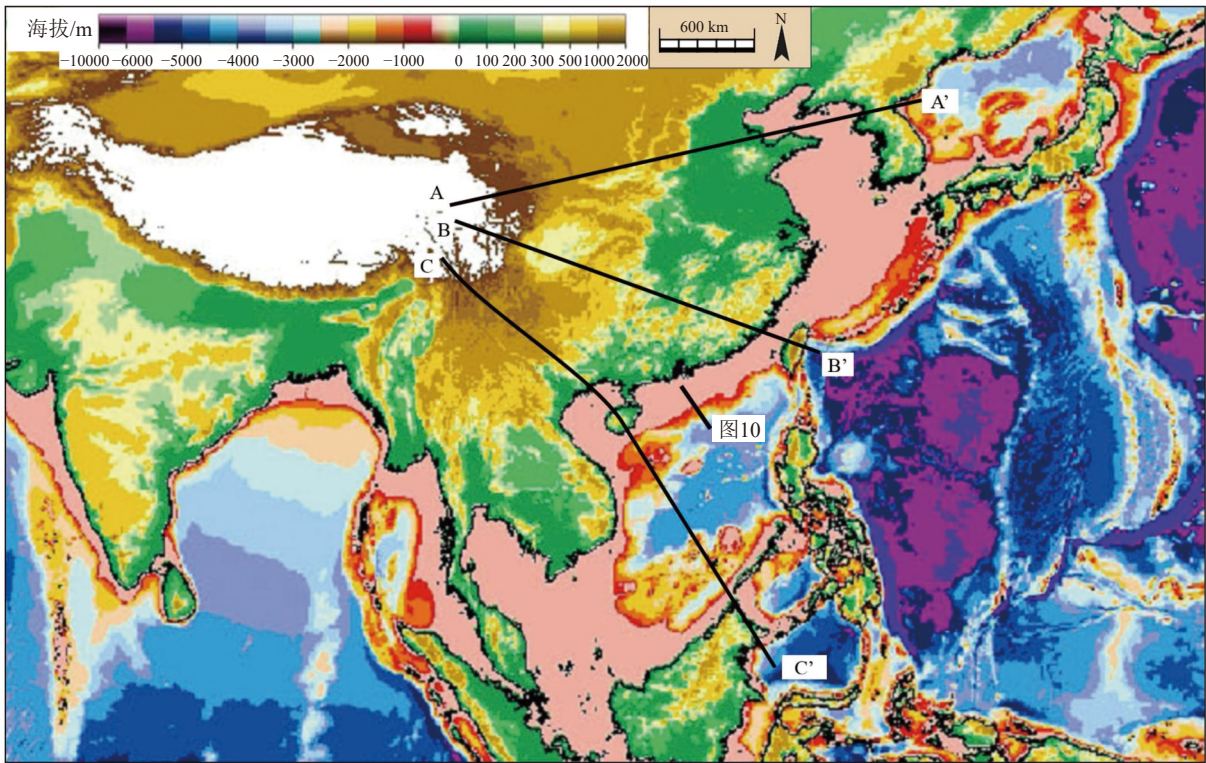


图 8 欧亚东南缘地形地貌图及 3 条剖面位置图(底图据 NOAA)

Fig. 8 Topography and geomorphology map of southeastern margin of Eurasia and location map of three profile lines

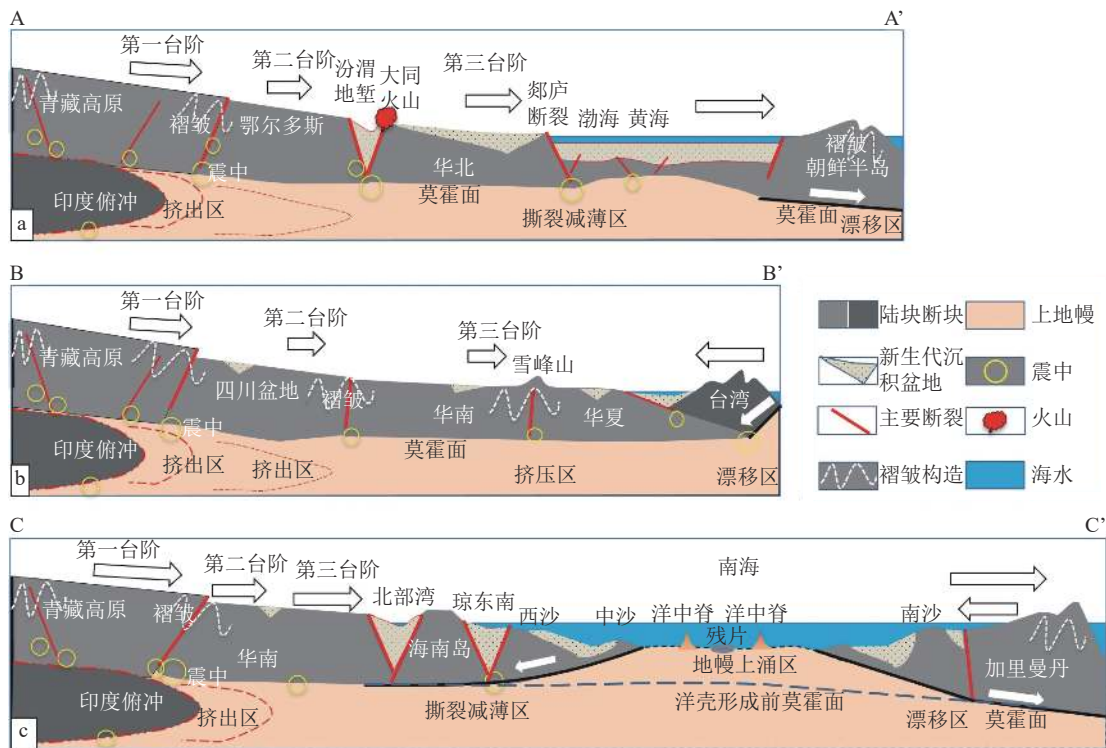


图 9 欧亚东南缘三条剖面线构造格架示意图

Fig. 9 Structural framework of three profile lines in southeast Eurasian margin

a—剖面 A-A' 的构造格架; b—剖面 B-B' 的构造格架; c—剖面 C-C' 的构造格架

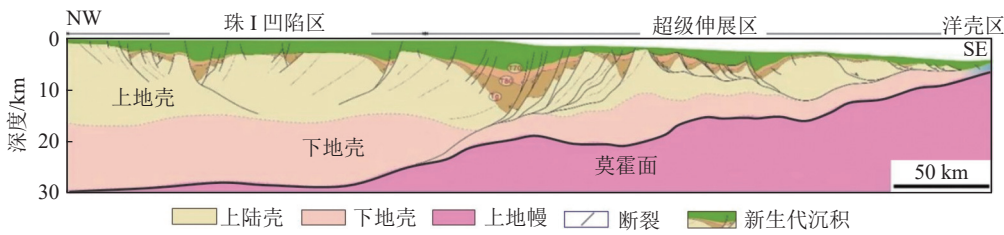


图 10 南海北部大陆边缘构造格架(据 Camanni et al., 2021)

Fig. 10 Tectonic framework of the northern continental margin of the South China Sea

一步的研究表明(孙金龙等, 2014), 南海东部在晚中新世以来具有西部被动、东部主动的特征。

新生代, 在亚洲东南部主要板块的汇聚过程中, 发生了许多重要的伸展事件, 形成海洋盆地, 并在大陆区域内引起沉降。东亚大陆边缘伸展分为 2 个阶段: 第一阶段是在 65~35 Ma, 形成东西向宽度为 500~800 km 的伸展构造; 第二阶段是在 32~17 Ma,

由于扩张中心的发展形成弧后盆地(Yin, 2010)。

由此, 本文梳理出南海形成的更详细的“被动挤出+主动漂移”过程(图 11): 欧亚东缘在中生代晚期的造山作用之后发育了伸展构造, 产生一系列裂谷盆地和先存断裂。在新生代初期(65 Ma), 分布在南海周边的陆块拼贴在欧亚大陆东南缘, 它们之间被裂谷盆地所间隔。此时, 印度和欧亚大陆还没有发

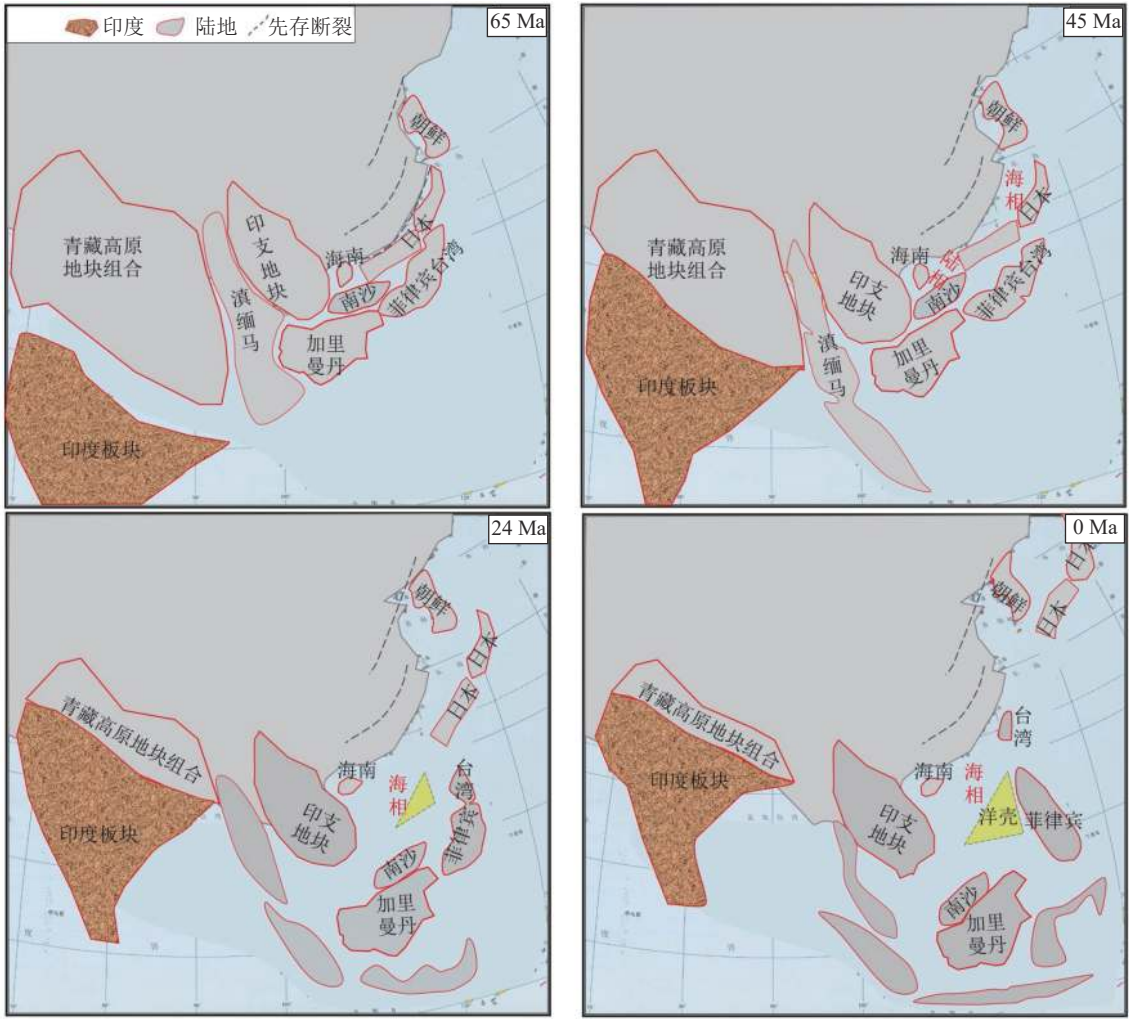


图 11 南海大地构造演化过程示意图

Fig. 11 Schematic diagrams of tectonic evolution in the South China Sea

生硬碰撞,但发生了软碰撞,使得欧亚大陆东缘陆块之间的脆性上地壳发生初始破裂,产生裂解,这个构造运动过程相当于“神狐运动”。在约 45 Ma,印度和欧亚大陆发生硬碰撞(王二七,2017),南海和东海进一步裂开,这时边缘海裂谷盆地以陆相沉积为主,东海盆地北部先裂开,形成海相沉积。随着印度板块继续向北漂移,其前部的地壳流挤入青藏高原,青藏高原开始隆升,伴随着重力势能,推动华南前缘地壳流大规模挤出,使得裂解的陆块发生漂移,南海东部先裂开,西部后裂开,这个构造运动过程相当于“琼珠运动”。

随着印度-欧亚大陆碰撞的加剧,欧亚大陆东部裂解出来的微陆块发生大规模漂移,在 33 Ma 拉出南海初始洋壳,在 24 Ma 左右,青藏高原发生重力垮塌,微陆块快速漂移,南海被快速撕裂拉开。南海北部的边缘海盆地都为海相沉积。该构造运动过程相当于“南海运动”。24~16 Ma,受南部澳大利亚大陆北漂的影响,裂解的微陆块大规模左旋转向,继续漂移,形成南海及周边目前的格局。

4 结 论

(1) 伴随着印度-欧亚大陆碰撞和碰撞造成的欧亚大陆东南缘的挤出,在欧亚大陆东南缘产生了陆缘伸展和裂解,陆缘裂解形成一系列微陆块,这些裂解后的微陆块发生了主动向南漂移,撕出了新南海。

(2) 南海形成的动力机制是“被动挤出+微陆块主动漂移”模式。被动挤出模式一方面提供了初始动力,另一方面把陆块挤碎,成为多个微陆块。后期超出挤出直接作用力范围时,各个微陆块都是自己漂移的。

(3) 本文提出的新大陆漂移模式很好地解释了南海发生的洋中脊跳跃和大陆残片问题。南海是诸多微陆块漂移形成的,它们的漂移也形成了南海诸多含油气盆地。南海南部大陆边缘的地震勘探剖面也从细节上说明,同一个陆块不同区域当前所处的构造环境不同,因此会在构造运动过程中发生旋转和变形。

致谢: 非常感谢审稿专家对本文提出的中肯建议和宝贵意见,两次有益的审稿意见使得本文增色甚多;更要感谢编辑在最后出版之前再次提出诸多修改意见,使得文章更完善,逻辑更通顺。

参考文献

- 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.
- Camanni G, Ye Q. 2021. The significance of fault reactivation on the Wilson cycle undergone by the northern South China Sea area in the last 60 Myr[J]. *Earth-Science Reviews*, 225: 103893.
- Ding W W, Sun Z, Kelsie D, et al. 2018. Structures within the oceanic crust of the central South China Sea basin and their implications for oceanic accretionary processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 488: 115–125.
- Flower M, Tamaki K, Hoang N. 1998. Mantle extrusion: A model for dispersed volcanism and Dupal - like asthenosphere in East Asia and the Western Pacific[M]. Washington, DC: American Geophysical Union: 67–88.
- Hales A L. 1969. Gravitational sliding and continental drift[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 6: 31–34.
- Hayes D E, Nissen S S. 2005. The South China sea margins: Implications for rifting contrasts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(3/4): 601–616.
- Holloway N H. 1982. North Palawan block, Philippines-Its relation to Asian mainland and role in evolution of South China Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 66(9): 1355–1383.
- Hubbert M K, Rubey W W. 1959. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 70: 115–166.
- Jacoby W R. 1970. Instability in the upper mantle and global plate movements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 75: 5671–5680.
- Karig D E. 1971. Origin and development of marginal basins in the western Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research*, 76(11): 2542–2561.
- Li C F, Xu X, Lin J, et al. 2014. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(12): 4958–4983.
- Liu M, Cui X, Liu F. 2004. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: a mantle dynamic link to the Indo-Asian collision?[J]. *Tectonophysics*, 393(1/4): 29–42.
- Rangin C, Spakman W, Pubellier M, et al. 1999. Tomographic and geological constraints on subduction along the eastern Sundaland continental margin (South-East Asia)[J]. *Bulletin de la Société géologique de France*, 170(6): 775–788.
- Replumaz A, Lacassin R, Tapponnier P, et al. 2001. Large river offsets and Plio-Quaternary dextral slip rate on the Red River fault (Yunnan, China)[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 106(B1): 819–836.
- Schiffer C, Stephenson R A, Petersen K D, et al. 2015. A sub-crustal piercing point for North Atlantic reconstructions and tectonic implications[J]. *Geology*, 43(12): 1087–1090.

- Shi H, Li C F. 2012. Mesozoic and early Cenozoic tectonic convergence-to-rifting transition prior to opening of the South China Sea[J]. *International Geology Review*, 54(15): 1801–1828.
- Sun L H, Sun Z, Zhang Y Y, et al. 2021. Multi-stage carbonate veins at IODP Site U1504 document Early Cretaceous to early Cenozoic extensional events on the South China Sea margin[J]. *Marine Geology*, 422: 106656.
- Sun W D. 2017. Initiation and evolution of the South China Sea: an overview[J]. *Acta Geochimica*, 35(3): 215–225.
- Tapponnier P, Peltzer G, Dain A Y L, et al. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia New Insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 10: 611–616.
- Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia.[C]//Coward M, Ries A. Collision tectonics. Geological Society of London Special Publication, 19: 115–157.
- Taylor B, Hayes D E. 1983. Origin and history of the South China Basin[C]// Hayes D E. The tectonics and geologic evolution of Southeast Asian Seas and islands: Part 2. Geophysical Monograph Series. Washington, DC: American Geophysical Union, 27: 23–56.
- Wu J, Suppe J, Lu R, et al. 2016. Philippine Sea and East Asian plate tectonics since 52 Ma constrained by new subducted slab reconstruction methods.[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 121(6): 4670–4741.
- Wegener A. 2001. The origins of the continents[J]. *Journal of Geodynamics*, 32: 31–63.
- Wu J, Suppe J. 2018. Proto-South China Sea plate tectonics using subducted slab constraints from tomography[J]. *Journal of Earth Science*, 29(6): 1–15.
- Yan Q, Shi X, Castillo P R. 2014. The late Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the South China Sea: A petrologic perspective[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 85: 178–201.
- Yin A, Harrison M. 2000. Geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogeny[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211–280.
- Yin A. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis[J]. *Tectonophysics*, 488(1/4): 293–325.
- Zhang G L, Luo Q, Zhao J, et al. 2018. Geochemical nature of sub-ridge mantle and opening dynamics of the South China Sea[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 489: 145–155.
- Zhou H, Xiao L, Dong V, et al. 2009. Geochemical and geochronological study of the Sanshui basin bimodal volcanic rock suite, China: Implications for basin dynamics in southeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(2): 178–189.
- 陈国达. 1997. 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*, 21(4): 285–293.
- 郭令智, 施央申, 马瑞士. 1983. 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*, 57(1): 13–23.
- 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]. 中国地质大学博士学位论文.
- 梁光河, 杨巍然. 2022. 从南大西洋裂解过程解密大陆漂移的驱动力[J]. *地学前缘*, 29(1): 1–14.
- 梁光河. 2018. 郯庐断裂带的几个关键问题探讨[J]. *黄金科学技术*, 26(5): 543–558.
- 刘昭蜀, 杨树康, 何善谋, 等. 1983. 南海陆缘地堑系及边缘海的演化旋回[J]. *热带海洋*, 2(4): 3–11.
- 栾锡武, 张亮. 2009. 南海构造演化模式: 综合作用下的被动扩张[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 29(6): 59–74.
- 邱燕, 陈国能, 刘方兰, 等. 2008. 南海西南海盆花岗岩的发现及其构造意义[J]. *地质通报*, 27(12): 2104–2107.
- 邵磊, 李献华, 汪品先, 等. 2004. 南海渐新世以来构造演化的沉积记录——ODP1148 站深海沉积物中的证据[J]. *地球科学进展*, (4): 539–544.
- 施秋华, 万志峰, 夏斌. 2013. 婆罗洲地质构造特征及其对南海南部盆地的影响[J]. *海洋地质前沿*, 29(1): 11–16.
- 孙金龙, 曹敬贺, 徐辉龙. 2014. 南海东部现时地壳运动、震源机制及晚中新世以来的板块相互作用[J]. *地球物理学报*, 57(12): 4074–4084.
- 汪品先, 翦知潜. 2019. 探索南海深部的回顾与展望[J]. *中国科学:地球科学*, 49(10): 1590–1606.
- 汪品先. 2012. 追踪边缘海的生命史: “南海深部计划”的科学目标[J]. *科学通报*, 57(20): 1807–1826.
- 王二七. 2017. 关于印度与欧亚大陆初始碰撞时间的讨论[J]. *中国科学:地球科学*, 47(3): 284–292.
- 谢建华, 夏斌, 张宴华, 等. 2005. 印度-欧亚板块碰撞对南海形成的影响研究: 一种数值模拟方法[J]. *海洋通报*, 24(5): 47–53.
- 徐义刚, 黄小龙, 颜文, 等. 2002. 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*, 3: 230–242.
- 姚伯初, 万玲. 2006. 中国南海海域岩石圈三维结构及演化[M]. 北京: 地质出版社: 180–221.
- 余梦明. 2018. 南海的形成与消亡: 南海及其周缘新生代火成岩之地球化学限定[D]. 中国科学院大学 (中国科学院广州地球化学研究所) 博士学位论文.
- 张功成, 贾庆军, 王万银, 等. 2018. 南海构造格局及其演化[J]. *地球物理学报*, 61(10): 4194–4215.
- 张训华, 王忠蕾, 侯方辉, 等. 2014. 印支运动以来中国海陆地势演化及阶梯地貌特征[J]. *地球物理学报*, 57(12): 3968–3980.
- 张训华. 1997. 单向拉张与南海海盆的形成[J]. *海洋地质动态*, (5): 1–3.
- 朱志澄. 2003. 构造地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 164–165.