

doi: 10.12029/gc20200502

李学杰 王哲 姚永坚 高红芳 祝嵩 徐子英. 2020. 南海成因及其演化模式探讨[J]. 中国地质, 47(5): 1310–1322.

Li Xuejie, Wang Zhe, Yao Yongjian, Gao Hongfang, Zhu Song, Xu Ziyong. 2020. The formation and evolution of the South China Sea[J]. Geology in China, 47(5): 1310–1322(in Chinese with English abstract).

南海成因及其演化模式探讨

李学杰, 王哲, 姚永坚, 高红芳, 祝嵩, 徐子英

(广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

摘要: 尽管南海已进行深入的调查与研究, 提出多种成因模型, 包括挤出模型、弧后扩张模型、古南海俯冲拖曳模型等, 但因其所处构造位置特殊, 周边构造环境经历了复杂的改造, 所有成因模式均未能得到广泛的认可。本文从三大板块相互作用入手, 结合南海实测数据, 提出南海形成的弧后扩张—左旋剪切模型。认为南海是古南海往北俯冲的弧后盆地, 菲律宾海板块往北漂移形成的大规模左旋走滑是南海扩张的触发因素。印度—欧亚碰撞产生中南半岛挤出主要影响西南海盆扩张方向, 使得扩张轴从近东西向转为北东向。南海及邻区晚中生代以来的演化可以分为以下阶段: 1) 早白垩世开始澳大利亚板块往北漂移, 新特提斯洋往北俯冲消亡, 导致弧后扩张, 形成古南海; 2) 晚白垩世末—始新世, 古南海往北俯冲, 导致弧后拉张形成陆缘裂谷; 3) 早渐新世, 受菲律宾海板块西缘大型左旋走滑影响, 在原有裂谷的基础上从东往西海底扩张, 形成南海; 4) 渐新世末, 受俯冲后撤的影响, 扩张中心往南跃迁, 同时受西缘断裂左旋活动的影响, 扩张轴从近东西西逐步转为北东向; 5) 早中新世晚期, 南沙地块—北巴拉望地块与卡加延脊碰撞, 南海扩张停止。

关键词: 古南海; 新特提斯; 弧后扩张; 左旋走滑; 海洋地质调查工程; 南海

中图分类号: P736.1; P722.7 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)05-1310-13

The formation and evolution of the South China Sea

LI Xuejie, WANG Zhe, YAO Yongjian, GAO Hongfang, ZHU Song, XU Ziyong

(Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, Guangdong, China)

Abstract: Lots of investigation and research have been carried out in the South China Sea (SCS), and many genetic models, such as extrusion model of Indochina Peninsular, back-arc extension model and subduction and dragging model of Proto-South China Sea (PSCS), have been proposed. However, none of these models is widely accepted because they don't fit with some geological phenomena. Due to its special tectonic location, the surrounding tectonic environment has undergone complex reorganization. Starting with the interaction of the three plates and in combination with the real data of SCS, the authors put forward a back-arc extension-sinistral shear model in this paper. It is considered that the SCS is a back-arc basin of PSCS northward subduction, and was triggered by the large-scale left-lateral strike-slip formed by the northward drift of the Philippine Sea Plate. The left-lateral strike-slip on the western margin of SCS caused by Indo-Eurasian collision changed the direction of spreading axis of the

收稿日期: 2020-04-03; 改回日期: 2020-07-16

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160138、GZH201300502)资助。

作者简介: 李学杰, 男, 1964年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事海洋地质调查与研究; E-mail: xuejieli@yeah.net。

southwest sub-basin from nearly east-west to north-east direction. The evolution of the SCS and its adjacent area since the late Mesozoic can be summarized as the follows: 1) the Australian plate began to drift northward, and the Neotethys subducted northward in the early Cretaceous, leading to back-arc extension and the formation of PSCS; 2) From the end of Cretaceous to Eocene, the PSCS subducted northward, resulting in formation of continental margin rift; 3) In Early Oligocene, the large scale sinistral strike-slip on the western margin of the Philippine Sea plate triggered back-arc extension of SCS from east to west; 4) At the end of Oligocene, the rollback by subduction of PSCS resulted in the spreading axis jumping to the south; accordingly, it shifted from nearly E-W to NW direction by the influence of sinistral strike-slip on the west margin of SCS; 5) In late Early Miocene, SCS spreading was stopped by collision of Nansha - northern Palawan block with Cagayan Ridge.

Key words: Proto-South China Sea; Neotethys; back-arc extension; sinistral strike-slip; marine geological survey engineering; South China Sea

About the first author: LI Xuejie, male, born in 1964, professor, engages in marine geological research and survey; E-mail: xuejieli@yeah.net.

Fund support: Supported by the program of China Geological Survey (No. DD20160138, No. GZH201300502).

1 概述

西太平洋边缘是现今规模最大,构造最复杂的板块边界,形成一系列边缘海。南海处于NE向与NNW向海盆链的转折部位,同时受到欧亚板块、菲律宾海板块与澳大利亚板块共同作用,形成复杂的构造环境(Pubellier et al., 2013; 李学杰等, 2017)。

近几十年来,南海持续受到多方关注,进行了大量的基础地质调查与研究,包括1:100万海洋区域地质调查和各种资源的前期调查,以及3轮ODP-IODP的钻探。2010年开始,国家自然科学基金委资助“南海深海过程演变”重大研究计划,主要聚焦南海北部和海盆区,以多学科、多视角对南海深海过程及其演变进行研究,取得世界瞩目的成果。

南海是西太平洋最大的边缘海,其北缘以伸展为主,形成北部湾、琼东南和珠江口等张性盆地;南缘北部主要为拉张构造,南部为俯冲碰撞区;西缘为走滑-伸展构造,形成琼东南、莺歌海等走滑拉张盆地;东缘为马尼拉俯冲构造带;中央海盆为海底扩张区,拥有较清晰的磁异常条带。IODP 349航次钻探实施后,各海盆的扩张时间问题已得到解决,东部次海盆最早开始扩张时间~33 Ma, 23.6 Ma扩张轴往南跃迁,同时西南次海盆开始扩张,于~15 Ma东部次海盆扩张结束,~16 Ma西南次海盆扩张结束(Li et al., 2014; Li et al., 2015)。

尽管对南海已进行较深入的研究,认为在西太平洋边缘海中,南海的研究程度最高。但由于南海

特殊的构造背景以及多板块的相互作用,同时南海在形成之后,其东缘和南缘构造出现极大的改变,增大了南海成因认识的难度,使得南海的形成与演化至今仍存在很大的争议(Briais et al. 1993; Sun et al. 2006)。

2 已有模型简述

对于南海的形成演化,已提出了许多不同的观点,其中影响较广泛的包括挤出模型(Tapponnier et al., 1990; Briais et al., 1993; Replumaz et al., 2003)、弧后扩张模型(Hilde et al. 1977; Sun, 2016)、大西洋型扩张模型(Ben-Avraham et al., 1973; 姚伯初, 1997)、古南海俯冲拖曳模型(Holloway 1982; Taylor et al., 1982; Hall, 1996)、地幔柱引起的拉张模型(邓晋福等, 1992)、右行走滑拉分模式(许浚远等, 2000; 李三忠等, 2012; 王鹏程等, 2017)、综合作用下的被动扩张(栾锡武等, 2009)、古南海拖曳与印支半岛拖曳结合的模式等(Morley, 2002; 周蒂等, 2002; Sun et al., 2006)。

南海成因的众多模型中,一些模型因与大量地质现象和事实不吻合,没有得到广泛的支持。影响最广的是印支半岛挤出模型和古南海俯冲拖曳模型。

2.1 印支半岛挤出模型

Tapponnier et al. (1982, 1990)、Briais et al., (1993)等根据物理实验,结合地质观测提出,印度与欧亚大陆的碰撞导致印支半岛沿哀牢山-红河左旋断层往南挤出超过700 km,从而使得南海海盆张开。该模型似乎很合理,在国内也得到广泛的引

用和支持(夏斌等,2004,谢建华等,2005)。通过大量地质调查后,发现该模型存在许多与实测地质不吻合的问题。

(1)南海扩张是华南大陆边缘晚白垩世以来长期裂谷作用的结果。这些裂谷的发育时间比哀牢山—红河断裂开始时间(约40 Ma)(Taylor et al., 1982; Liang et al., 2007)要早得多,而南海海盆开始扩张时间32 Ma,却更晚,因此两者在时间上并不吻合(Sun W, 2016)。

(2)印支半岛沿哀牢山—红河断裂挤出,西缘断裂左旋位移,若是南海扩张的主因,那么扩张应从西往东发展,而实际情况正好相反。

(3)南海西缘断裂左旋运动往南延伸终止于绥和断裂,其南部的万安东断裂变为右旋,而绥和断裂仍处于西南海盆的北侧,显然不足以导致海盆扩张。同时南海西缘走滑拉张盆地的沉积厚度以新近系为主,表明古近纪西缘走滑可能规模不大。

(4)哀牢山—红河断裂带走滑位移量比完全挤出构造模型需求量小得多(Searle, 2006),本身不足以支撑南海的扩张。

(5)Tapponnier et al. (1982)的实验将印支半岛南侧和东侧设为自由边界,这显然与实际情况完全不同。印支半岛以及南海周边有不同板块,且不同板块之间有复杂的构造边界与相互作用,东侧的太平洋、南侧包括已消亡的新特提斯和古南海等。

显然挤出说模型过于简单,难以解释盆地发育的几何形态、时间及其复杂性。西藏—喜马拉雅重力势效应没有往南延伸太远,未及东南亚(Pubellier, et al., 2013)。

2.2 古南海俯冲拖曳模型

古南海俯冲拖曳模型,推测现南海南侧存在古南海,往南向婆罗洲的俯冲拖曳导致其后华南陆缘的拉张和裂谷作用,形成南海(Hall, 1996; 张功成等, 2015)。

由于古南海已俯冲消亡,必须确定古南海的存在与规模,才是支持该假说的关键。纳土纳岛—婆罗洲北部—中南巴拉望岛一线的蛇绿岩套和拉姜—克罗克碰撞增生带支持古南海的存在和对该假说的支持。认为拉姜群和克罗克组是古南海的深海沉积,沿卢帕尔线往南俯冲形成增生楔。致使古南海的存在可以得到证实,但该模型依然存在以下

致命的问题。

(1)婆罗洲西北部沙捞越拉姜群深海沉积结束于中或晚始新世,形成沙捞越造山带(Cullen, 2014)。即南海张开之前,廷贾线以西的古南海已消亡,曾母地块与婆罗洲碰撞隆升。这表明南海扩张与廷贾线以西的古南海无关。

(2)婆罗洲往东北的克罗克组深水沉积可能延至中中新世,表明古南海从西往东逐步消亡,拉姜—克罗克碰撞增生带变新,南海的张开也应该由西往东发展,这也与事实不吻合。

(3)较薄的古海南洋壳往南俯冲如何导致较厚的华南陆壳岩石圈张裂,进而导致南海扩张,其动力学机制是很大的问题,Sun(2016)认为,从现有残留的蛇绿岩分布来看范围有限,不可能拉开很厚的华南岩石圈。

(4)现在层析成像揭示,古南海板片只有部分往南俯冲于婆罗洲之下,大部分往北俯冲于现今南海之下,几乎整个南海区域(Wu et al., 2016, 2018)。

2.3 西南海盆先扩张模型

基于对华南构造的深入研究,华南北东向构造往往老于近东西向构造,姚伯初(1997)及姚伯初等(2004)提出,南海海盆经历两次扩张形成,第一次发生在晚始新世至早渐新世,扩张方向为北西—南东向,产生了南海西南海盆和西北海盆;第二次发生在晚渐新世至早中新世,扩张方向为南北向,产生了南海中央海盆。而且认为南海属大西洋式扩张,经过大陆张裂、大陆分离和海底扩张的全过程。

南海IODP钻探之后,其扩张时间已得到解决,因此西南次海盆先扩张模式与事实不吻合。

2.4 地幔柱导致的拉张

地幔柱模型认为,南海的扩张是地幔柱活动的结果(Xu et al., 2012; 鄢全树等, 2007)。邓晋福等(1992)认为东亚大陆下存在的3个地幔柱形成了南海、日本海、鄂霍茨克海,在这3个边缘海及其西部大陆内形成大面积新生代裂谷玄武岩;李思田等(1998)基于对北部湾盆地、莺歌海盆地、琼东南盆地和珠江口盆地古近纪以来的构造—沉积充填、热及深部背景的研究,认为南海地幔柱及侧向地幔流是今后探讨南海及其边缘盆地的形成演化的首选。

地震层析成像显示,南海下面存在高温异常(Zhao, 2007)。认为海南岛周围之下可能存在地幔

柱,近垂直从浅部向下穿越660 km界面,并延伸到1900 km。鄢全树等(2007)建立海南地幔柱导致南海形成的模式。然而典型地幔柱头特征的大规模岩浆作用,在南海及周边地区不存在,使得该假说未能得到大多数学者的支持。

2.5 弧后扩张

弧后扩张是西太平洋边缘海的主要成因模式,也是认识南海的最早模型之一,早期将南海看作菲律宾海的俯冲的弧后盆地(Ben-Avraham et al., 1973; 郭令智, 1983)。随着对西太平洋认识的提高,发现菲律宾岛弧是随菲律宾海的扩张往北漂移逐步就位的,与南海形成无关。

Hilde et al. (1977)提出南海是澳大利亚与欧亚大陆间新特提斯洋俯冲导致的弧后盆地。根据该模型,新特提斯洋往北俯冲可能始于~125 Ma,南海的拉张始于约100 Ma,这与实际情况不吻合,整个华南在100 Ma时主要为挤压(Li, et al., 2014; Sun, 2016)。

任建业等(2000)认为印度—欧亚大陆碰撞所形成的向东和东南的地幔流可能推动了东亚大陆东侧和南侧俯冲带的后退,并引发弧后扩张作用,形成南海、苏禄海等。Sun(2016)对南海弧后扩张模型进行完善,认为南海形成于澳大利亚与欧亚之间新特提斯洋板块往北俯冲导致的弧后扩张,并提出较完整的模式,认为:(1)澳大利亚与欧亚之间新特提斯洋往北俯冲可能始于~125 Ma。早期的俯冲弧后拉张,可能形成古南海;(2)当特提斯扩张脊开始俯冲时,构造机制从拉张转向挤压,可能触发或促进古南海的俯冲;(3)随着往北俯冲的持续,古南海消亡,同时北部开始南北向的弧后拉张,33 Ma南海开始海底扩张。该模型在前人的基础上,引入古南海概念,具有明显进步,但特提斯洋~125 Ma开始俯冲,为何到33 Ma才开始扩张,而且新特提斯洋离南海扩张轴相距甚远,可否形成弧后扩张,仍有待商榷。

2.6 综合模型

南海张开的综合模型,结合了几种事件,如古南海俯冲/牵引与印度—欧亚大陆碰撞产生的地幔流结合(Sun et al., 2006),古南海俯冲/牵引与印支半岛往南挤出结合(Morley, 2002),多种板块俯冲、剪切与碰撞等。此外,还有其他不同认识与模型(蔡周荣等,

2008; 李三忠等, 2012),甚至认为南海非扩张成因(林长松等, 2006)。但综合模型以及其他不同认识,依然存在诸多问题,没有得到广泛的接受。

3 区域构造特征

南海及其周边新生代主要受三大板块活动与重组事件的影响。西部印度板块不断往北漂移,最后与欧亚大陆碰撞;中部澳大利亚往北漂移与东南亚(巽他)碰撞;东部是古太平洋往北西运动,以及菲律宾海板块的形成及其往北漂移与旋转。南海是此区域构造背景中形成,需要综合考虑这三方面共同作用,才可能更好认识其成因(图1)。

3.1 西部印度板块的运动及其与欧亚板块碰撞

早白垩世(125~130 Ma)开始,印度、澳大利亚板块相继与南极板块分离,往北漂移(Sun, 2016),两者分别往北漂移60°和40°(Mcelhinny, et al., 1974)。西部的印度板块白垩纪裂离南极后迅速往北漂移,始新世(55~34 Ma)(王二七, 2017)与欧亚板块碰撞,该碰撞导致印支地块以及南部地区沿哀牢山—红河断裂带向东南挤出数百千米(Lee et al., 1995; Replumaz, et al., 2003)。根据热年代证据,通常认为哀牢山—红河断裂带左旋运动始于始新世/早渐新世,或始于晚渐新世至中新世(Fyhn et al., 2009)。

哀牢山—红河断裂带的东延进入莺歌海盆地。研究表明,莺歌海盆地边界断裂古近纪存在明显左旋运动与拉张,且其左旋运动量可能相当大(Fyhn, et al., 2009)。该左旋边界断裂往南延伸至中建南盆地,再往南终止于绥和断裂带,其南侧的万安东断裂以右旋为主(Cliff et al., 2008)。

南海西缘发育的一系列受走滑控制的沉积盆地,从北往南,包括莺歌海盆地、琼东南盆地和万安盆地。从南海西部新生代沉积厚度来看,西缘断裂对沉积盆地及沉积厚度的控制作用明显(图2a)。其中古近系厚度较小(图2b),新近系厚度大(图2c),似乎表明西缘断裂对南海影响主要在新近纪。另一方面,印度板块的快速往北运动,新特提斯洋的往北俯冲挤压,使其东部华南陆缘从新生代初开始产生拉张环境。

3.2 中部澳大利亚板块的运动与古南海形成

中部澳大利亚板块大致与印度板块同时裂离

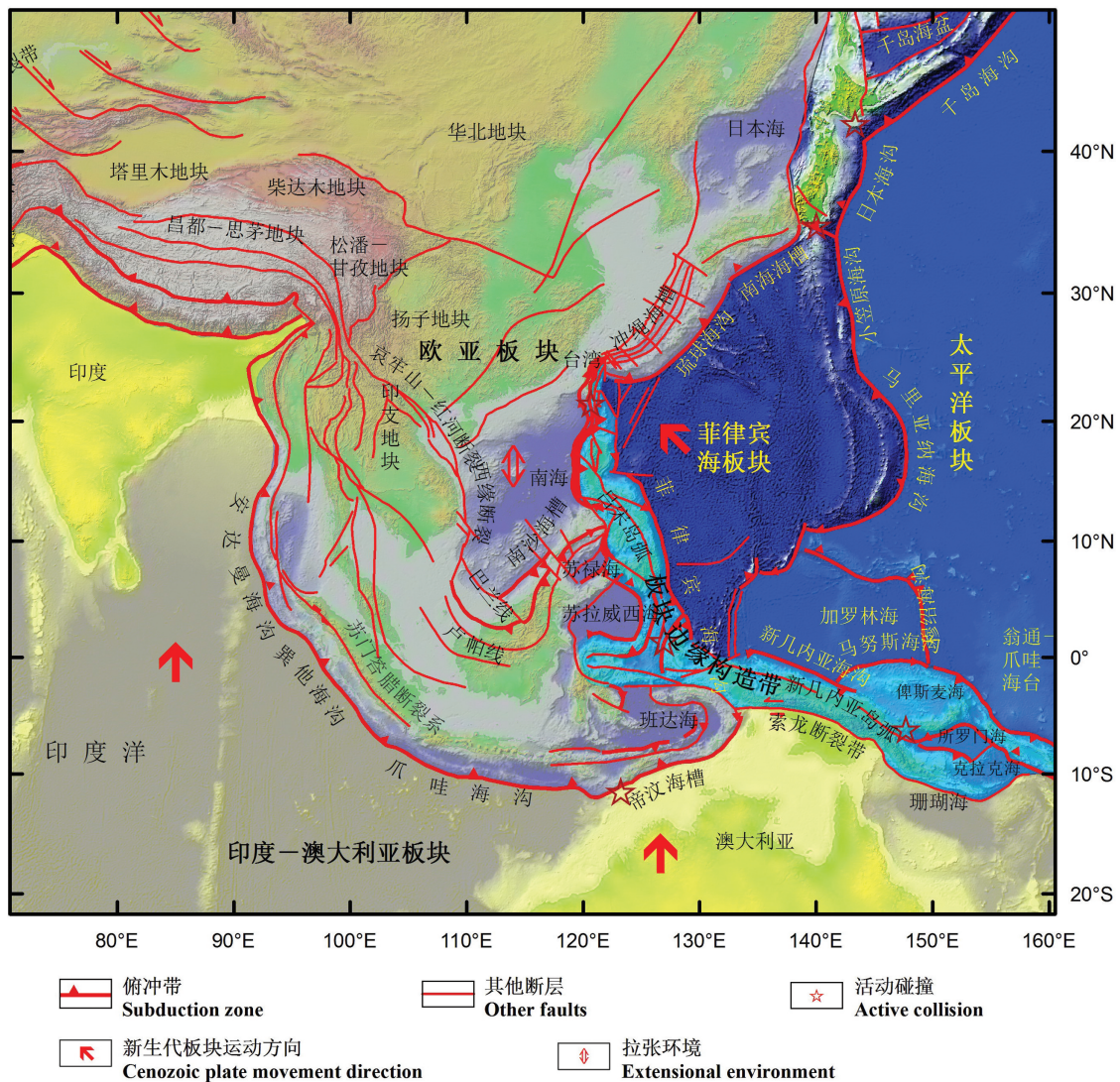


图1 南海及邻区构造背景
 Fig. 1 Map showing the tectonic setting in the South China Sea and its adjacent areas

南极, ~125 Ma 澳大利亚与欧亚之间新特提斯洋开始往北俯冲(Sun, 2016), 但其运动速度印度板块慢得多, 这主要是由于新特提斯洋的往北俯冲于婆罗洲之下, 导致其北测出现弧后拉张, 形成古南海。古南海的扩张, 新特提斯往北俯冲消亡, 两者相互抵消, 使得澳大利亚板块往北运动极为缓慢。

婆罗洲西部具古生代基底, 西南婆罗洲古生界主要为石炭纪至二叠纪的变质岩。西北加里曼丹区, 包括含化石的石炭纪灰岩, 二叠—三叠纪花岗岩、三叠纪海相页岩、侏罗纪含菊石沉积于和白垩纪混杂岩。在沙捞越, 三叠纪植物区系为亲华夏型, 与中南半岛可对比(Hall, et al., 2008; Hall,

2013)。

澳大利亚北侧新特提斯往北俯冲于婆罗洲之下, 在斯瓦纳山形成岛弧, 白垩纪出现花岗侵入岩(Galin, et al., 2017)。Hall(2012)认为, 从西瓜哇至东南婆罗洲梅拉图斯山脉NE-SW 梅拉图斯缝合线(图3), 是白垩纪巽他陆壳的东南边界。该线东南的爪哇和东南婆罗洲为蛇绿岩、岛弧地层及高压-低温变质岩, 代表了早白垩世新特提斯往巽他俯冲形成的俯冲带。碰撞-增生体包括海底扩张、岛弧火山、大洋与弧前沉积以及变质作用等构造单元(Wakita, 2000)。中爪哇Luk Ulo 杂岩包括蛇纹石化的超基性岩、玄武岩、燧石、石灰岩、硅质页岩、页

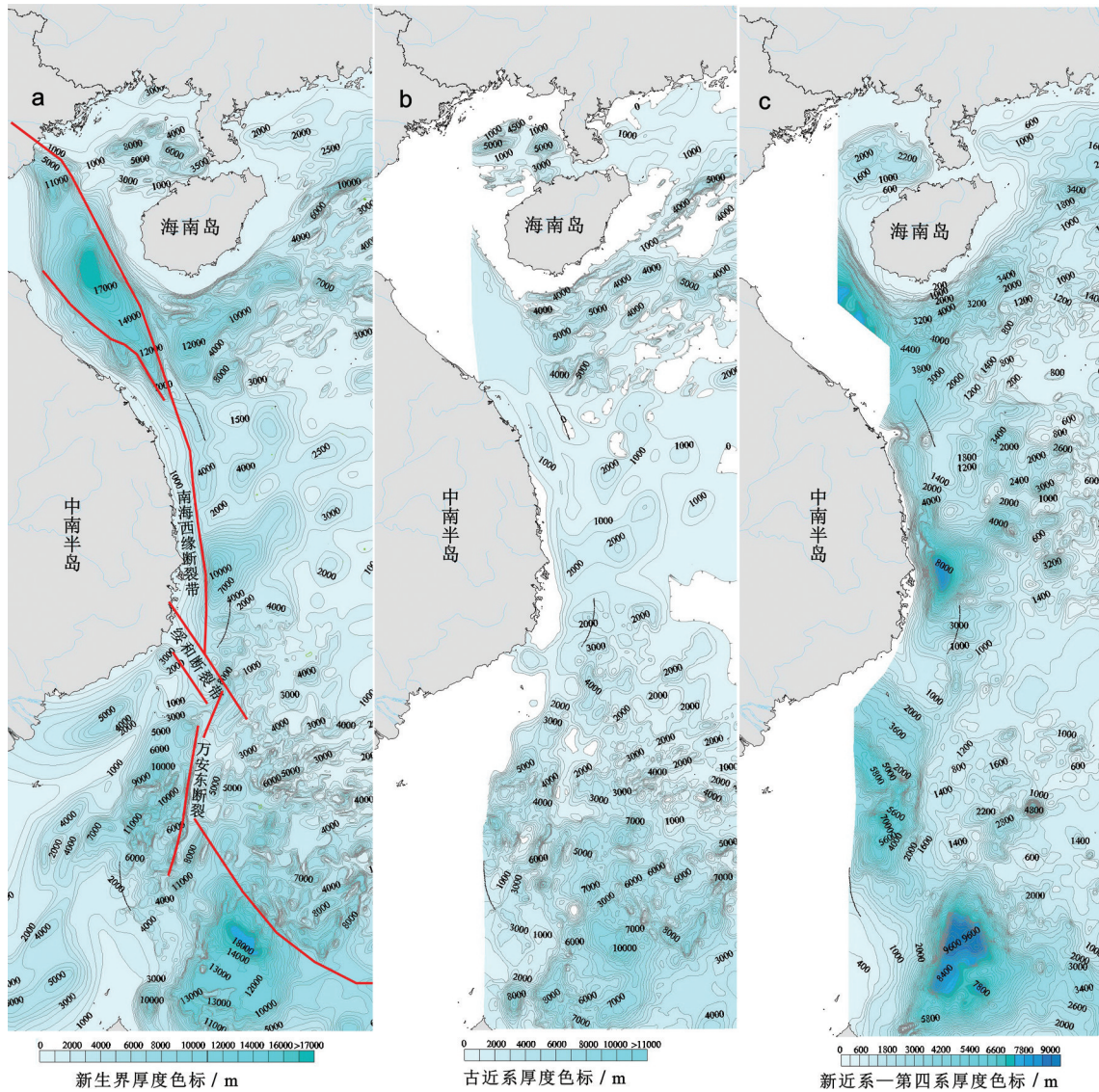


图2 南海西缘断裂与沉积厚度

a—新生界厚度;b—古近系厚度;c—新近系—第四系厚度

Fig. 2 Fracture of western margin of South China Sea and sedimentary thickness

a—Cenozoic thickness; b—Paleogene thickness; c—Neocene—Quaternary thickness

岩、火山角砾岩、低温超高压变质岩等(Wakita, 2000)。

该缝合的年龄,根据爪哇变质岩的K-Ar年龄测定,高压-低温变质作用时间为117~124 Ma, Luk Ulo 枕状熔岩相关的放射虫为早白垩世(Hall, 2012)。该缝合线应是新特提斯洋消亡的产物,俯冲导致其北侧早白垩世末一晚白垩世初弧后扩张形成古南海。

以往通常认为古南海往南俯冲(Clift et al., 2008; Hutchison, 2010),现根据层析成像揭示,古南

海存在往南和往北的双向俯冲,与现在的马鲁古海板块往东西两侧双向俯冲类似。古南海板片南北长度达1600 km(Wu, et al., 2016),其西南部分(古南海南板片)沿卢帕尔线往南俯冲于北婆罗洲之下,其消亡导致曾母地块与北婆罗洲碰撞。

古南海往南沿卢帕尔俯冲消亡,得到婆罗洲北部广泛分布的增生体、蛇绿岩侵位、火山活动、挤压变形、隆起、地壳增厚的证实(Fyhn et al., 2009; Madon et al., 2013)。卢帕尔线蛇绿岩及蛇绿混杂岩出露于纳土纳岛—加里曼丹岛北部—巴拉望岛

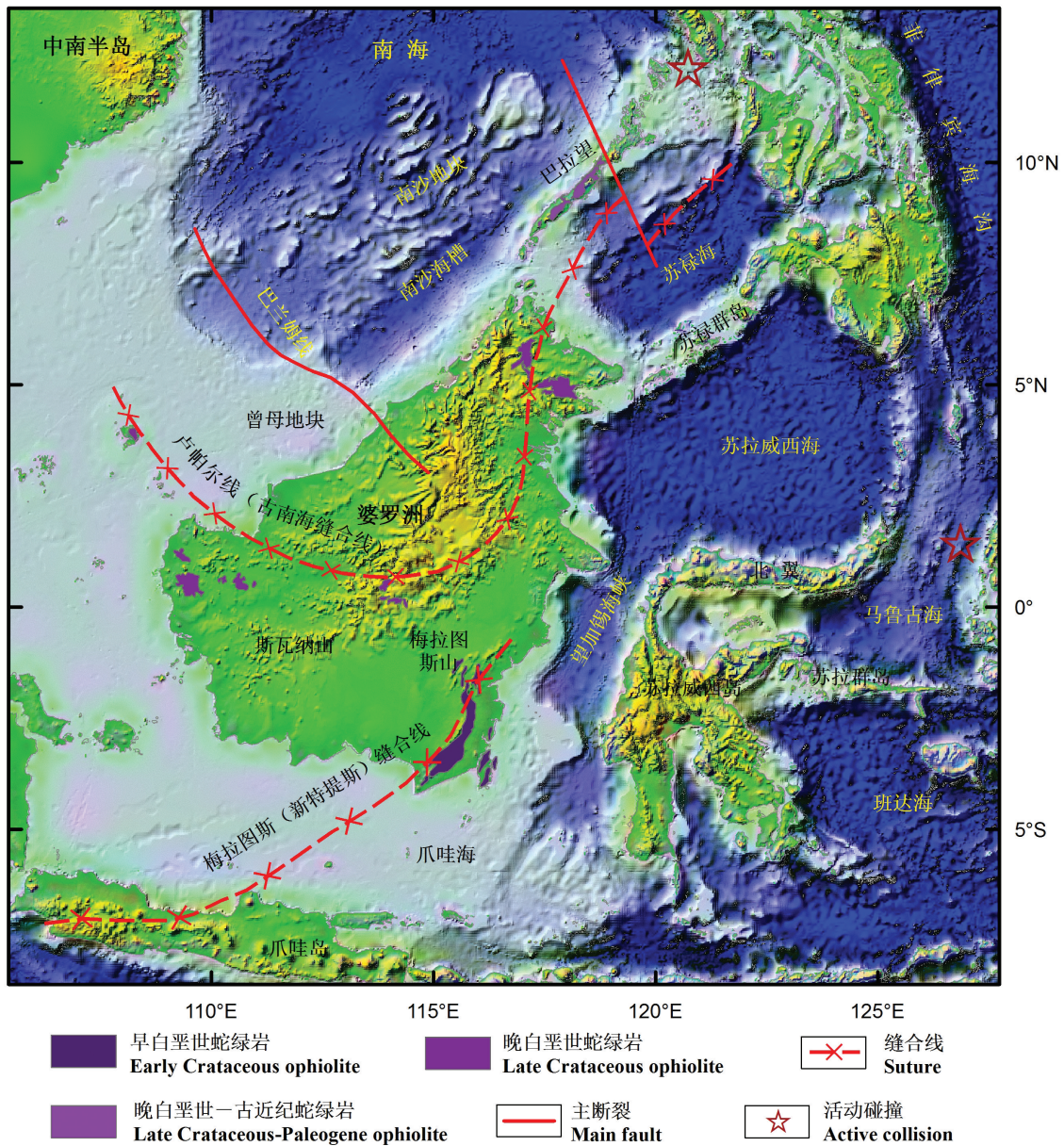


图3 南海南部蛇绿岩与缝合线分布

(据 Pubellier, et al., 2004; Hall, et al., 2008; MGBP, 2010; Hutchison, 2010; Hall, 2013; Aurelio, et al., 2014; 鲁宝亮等, 2014; Galin, et al., 2017; 编制)

Fig.3 Distribution of ophiolite and suture belts in southern South China Sea

(after Pubellier, et al., 2004; Hall, et al., 2008; MGBP, 2010; Hutchison, 2010; Hall, 2013; Aurelio, et al., 2014; Lu Baoliang et al., 2014; Galin, et al., 2017)

南部一线分布(图3)。始新世,约43 Ma,曾母地块与婆罗洲碰撞隆升,形成沙捞越造山带(鲁宝亮等, 2014)。在海域也有明显表现, T₈不整合面,被命名为西卫运动(杨木壮等, 1996)。

另一方面,古南海北板片大致于始新世开始往北俯冲南沙和北巴拉望之下,该几乎整个南海海域

之下存在古南海俯冲板片(长度达900 km),而且南海与古南海俯冲板片的东缘基本吻合,表明两者关系密切。因此,可以推测,古南海的往北俯冲导致其弧后扩张,形成现今的南海(Wu et al., 2016; 2018)。

巴拉望岛由北巴拉望和中南巴拉望,北巴拉望

最老地层为二叠系,三叠系至侏罗系为深水沉积的燧石硅质岩。礼乐滩拖网采集的最老岩石为中三叠世灰黑色纹层致密的硅质岩,可与巴拉望北部、卡拉棉岛出露的中三叠世燧石条带中所含的放射虫对比。通常认为北巴拉望是与南沙地块是随着南海扩张裂离华南的微陆块(Yumul et al., 2008; Aurelio et al., 2012)。

中南巴拉望主要是由蛇绿岩和混杂岩所组成的造山带,源于白垩纪期间开始形成的洋盆(Rangin et al., 1990)。中巴拉望,蛇绿岩的年龄定为40~42 Ma(Raschka et al.1985)。南巴拉望枕状玄武岩³⁹Ar/⁴⁰Ar年龄为34 Ma(Encarnación, 2004)。中南巴拉望发育蛇绿岩逆冲构造是卡加延脊和南沙—北巴拉望地块之间俯冲碰撞的结果(Liu, et al., 2014),蛇绿岩时代为渐新世,33~23 Ma,逆冲至浊积岩之上(Aurelio et al., 2014)。

中南巴拉望碰撞造山带,是沙巴造山带的东延,其西北部边界是位于巴拉望陆架边缘的锋缘逆冲断裂带,东南部边界为卡加延弧与南沙地块之间的弧—陆碰撞缝合线,该缝合线向NE方向延伸逐渐接近卡拉棉微陆块并在菲律宾活动带南侧交会。该缝合线往西与卢帕尔会合,构成完整古南海消亡的缝合线。

3.3 东部古太平洋板块俯冲消亡与菲律宾海板块的形成演化

菲律宾海板块是地球第十大岩石圈板块,四周以俯冲带为界,其北部沿琉球海沟和南海海槽俯冲于欧亚板块之下,西部沿菲律宾海沟往菲律宾岛弧俯冲;东部为马里亚纳海沟和伊豆—小笠原海沟;西南为雅浦海沟(图1)。

菲律宾海板块由几个新生代次海盆组成,包括西菲律宾海盆、四国和帕里西维拉海盆和马里亚纳海盆。其中西菲律宾海盆海底扩张始于早新生代,约58~51 Ma(Hilde et al., 1984; Deschamps et al., 2002; Ishizuka et al., 2013),结束于34~36 Ma,或33~30 Ma(Deschamps et al., 2002)。四国与帕里西维拉海盆在~30 Ma开始扩张,持续至~15 Ma(Sdrolia et al., 2004)。马里亚纳海槽海底始于中新世末,约7 Ma,持续至现在,形成马里亚纳海盆(Yamazaki et al., 2003; Wu et al., 2016)。

古地磁研究表明,菲律宾海板块过去存在大规

模的北移和顺时针旋转(Hall et al., 1995; Hall, 2002)。菲律宾海形成初期位于赤道附近,至今往北位移约20°纬度(Queano et al., 2007; Yamazaki, et al., 2010)。40 Ma以来,印度—澳大利亚和菲律宾海往北运动速率相当。北菲律宾海古纬度研究表明,菲律宾海往北运动主要出现在25 Ma以前,以及15 Ma后的少量往北运动(Wu et al., 2016)。

Hall(2002)认为55~45 Ma,菲律宾海板块旋转约50°;40~25 Ma,没有明显旋转;25~5 Ma,顺时针旋转34°;5~0 Ma,顺时针旋转5.5°。这表明帕里西维拉和四国海盆形成于菲律宾海板块不旋转时期(28~25 Ma)至顺时针旋转(25 Ma)时期,扩张停止于15 Ma(Sdrolia et al., 2004)。

菲律宾海板块形成后,大规模往北运动,在其西缘形成大规模的左旋走滑断裂(图4)。在弧后大拉张环境中,该走滑断裂将触发由西往东的南北拉张,导致海底扩张。对比菲律宾海盆的旋转,南海扩张期与主要菲律宾海板块没有明显旋转期吻合,可能纯平移剪切更易于导致拉张。

4 弧后扩张—左旋剪切模型

以上分析表明,现有的许多南海成因模型均存在明显的缺陷,与实际观测不吻合。笔者认为南海

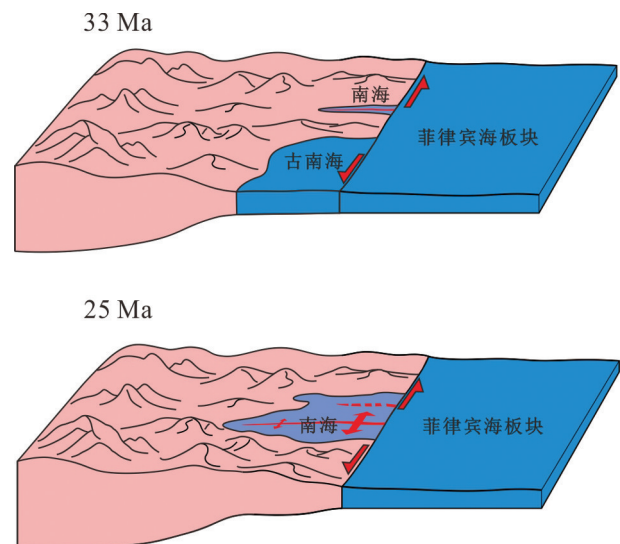


图4 南海东缘走滑边界示意图
Fig.4 Schematic diagram of strike-slip boundary in the eastern part of the South China Sea

的形成主要受三大因素影响:西部印度板块往北漂移及其导致的印支地块挤出;中部澳大利亚板块往北运动,新特提斯俯冲消亡导致其后华南地区形成张性环境;东部始新世后菲律宾海板块形成与北移导致其西缘形成大规模的左旋走滑活动。结合现有资料,综合分析,笔者认为古南海俯冲导致的弧后扩张是南海形成的关键,菲律宾板块北移形成的

左旋剪切是扩张的触发因素,印—亚碰撞中南半岛挤出左旋走滑导致南海西南海盆扩张轴从近东西向转为北东向。具体演化模式如下(图5):

(1)澳大利亚板块于早白垩世,~125 Ma 裂离南极,向北漂移,澳大利亚与欧亚之间新特提斯洋往北沿梅拉图斯线俯冲消亡,导致其北侧弧后扩张,形成古南海;因此推测古南海可能形成于晚白垩世

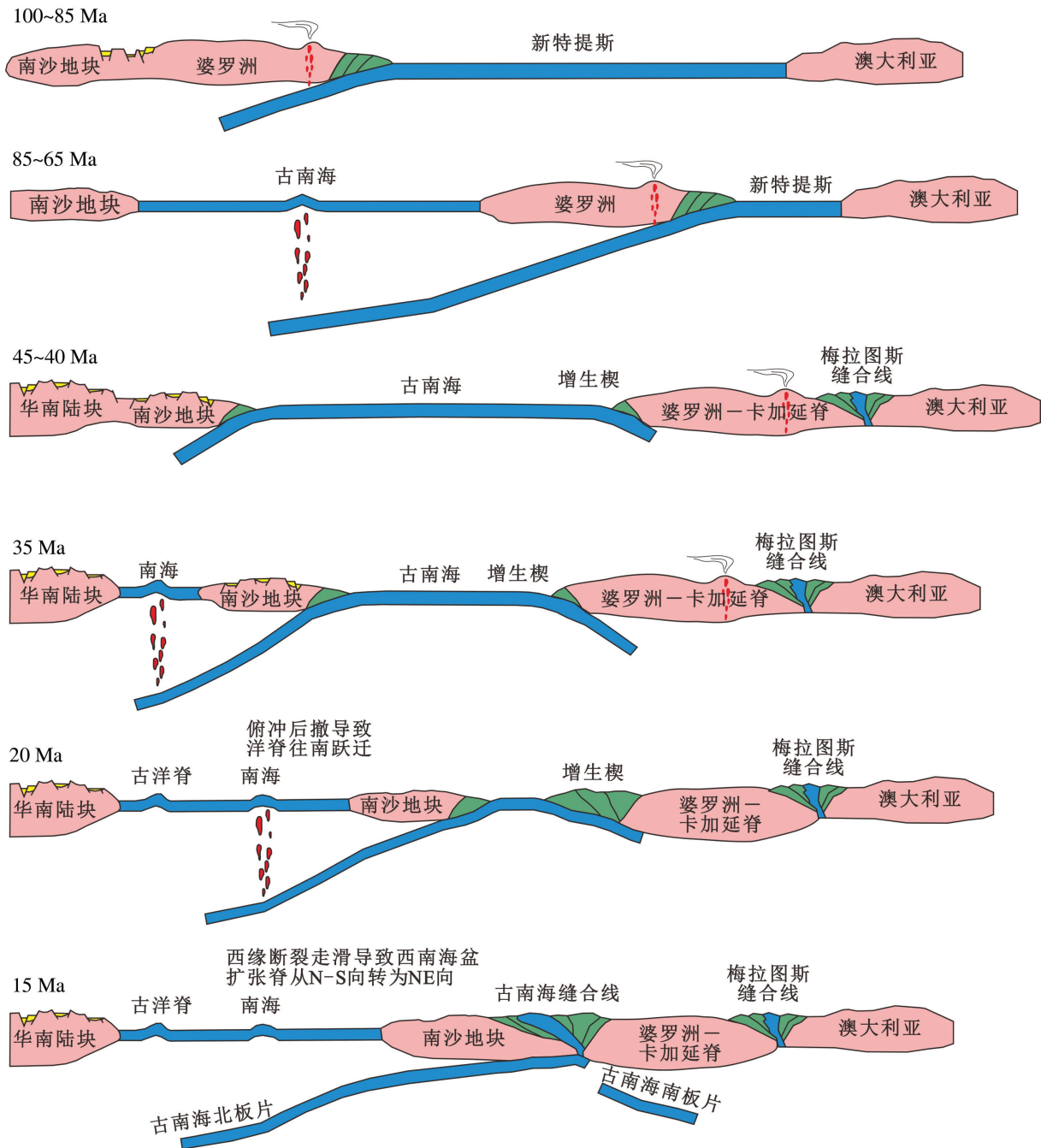


图5 南海演化模式图

Fig.5 Evolution model of the South China Sea

初期至古新世,约100~60 Ma,这与婆罗洲北部卢帕尔断裂带发现的蛇绿岩大致相当(Wakita et al., 1994; Hall, 2012)。

(2)晚白垩世末—始新世,随着澳大利亚往北俯冲的持续,其北侧开始出现挤压,古南海开始先后往南北俯冲。古南海西南部主要往南沿卢帕尔线俯冲于北婆罗洲之下;廷贾线以东古南海大部往北俯冲于南沙—北巴拉望地块之下,导致华南陆缘处于弧后拉张环境,形成陆缘裂谷。

(3)中晚始新世,约45 Ma,印度与欧亚碰撞,导致中南半岛挤出,同时太平洋板块向东亚陆缘俯冲方向由NNW转向NWW,两侧挤压结果华南地区南北拉张增强。随后古南海的往南俯冲消减,于43~38 Ma,曾母地块与北婆罗洲沿卢帕尔缝合带有西往东碰撞缝合,形成沙捞越造山带,海域表现为西为运动。

(4)始新世之后,东部的菲律宾海板块形成,往北运动,同时伴随右旋(Hall, 1995),使得其东缘形成大规模左旋走滑。结果导致早渐新世,32~33 Ma,在原有裂谷的基础上形成海底扩张,南海从东往西呈剪刀式张开。

(5)随着南海扩张向西部发展渐新世末,同时受俯冲后撤的影响,约24 Ma,扩张中心往南跃迁。同时受印度—欧亚碰撞产生中南半岛挤出影响,扩张方向从近东西逐步转为北东向。

(6)早中新世晚期,约16 Ma,南海南缘南沙地块—北巴拉望地块与卡加延脊碰撞碰撞受阻,南海扩张停止。

5 结 论

由于南海所处构造位置特殊,在形成之后,周边构造环境有经历了复杂的演化,使得南海的成因成为长期争论的焦点。近年来对南海已进行了大量的调查,积累海量的调查数据,也从不同角度进行了深入的研究,提出了多种成因演化模型,但所有成因模式均未能得到广泛的认可。

本文从晚中生代以来三大板块相互作用入手,结合南海实测数据,提出南海形成的弧后扩张—左旋剪切模型。认为古南海俯冲导致的弧后扩张是南海形成的关键,菲律宾板块北移形成的左旋剪切是扩张的触发因素,印—亚碰撞中南半岛挤出左旋

走滑导致南海西南海盆扩张轴从近东西向转为北东向。

References

- Aurelio M A, Peña R E, Taguibao K J L. 2012. Sculpting the Philippine archipelago since the cretaceous through rifting, oceanic spreading, subduction, obduction, collision and strike-slip faulting: contribution to IGMA5000[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 102–107.
- Aurelio M A, Forbes M T, Taguibao K J L, Savella R B, Bacud J A, Franke D, Pubellier M, Savva D, Meresse F, Steurer S, Carranza C D. 2014. Middle to Late Cenozoic tectonic events in south and central Palawan (Philippines) and their implications to the evolution of the southeastern margin of South China Sea: Evidence from onshore structural and offshore seismic data[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 658–673.
- Ben-Avraham Z, Uyeda S. 1973. The evolution of the China basin and the Mesozoic paleogeography of Borneo[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 18(2): 365–376.
- Briaux A, Patriat P, Tapponnier P. 1993. Updated interpretation of magnetic-anomalies and sea-floor spreading stages in the South China Sea—implications for the tertiary tectonics of southeast-Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 98(B4): 6299–6328.
- Cai Zhourong, Zhang Yi, Liu Weiliang, Wan Zhifeng, Liu Ping. 2008. Relationship between the formation and evolution of the South China Sea and reactivation of the Neo-Tethys[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 28(3): 21–24 (in Chinese with English abstract).
- Clift P D, Lee G H, Duc N A, Barckhausen U, Long H V, Sun Z. 2008. Seismic reflection evidence for a dangerous grounds miniplate: no extrusion origin for the South China Sea[J]. *Tectonics*, 27(3): 1–16.
- Cullen A. 2014. Nature and significance of the West Baram and Tinjar Lines, NW Borneo[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 51: 197–209.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Wu Zongxu, Lai Shaocong, Luo Zhaohua, Mo Xuanxue. 1992. A mantle plume beneath the north part of china continent and lithosphere motion[J]. *Geoscience*, 6(3): 267–274 (in Chinese with English abstract).
- Deschamps A, Lallemand S. 2002. The West Philippine Basin: An Eocene to early Oligocene back arc basin opened between two opposed subduction zones[J]. *Journal of Geophysical Research*, 107 (B12): 2322.
- Encarnación J. 2004. Multiple ophiolite generation preserved in the northern Philippines and the growth of an island arc complex[J]. *Tectonophysics*, 392(1): 103–130.
- Fyhn M B W, Boldreel L O, Nielsen L H. 2009. Geological development of the Central and South Vietnamese margin: Implications for the establishment of the South China Sea,

- Indochinese escape tectonics and Cenozoic volcanism[J]. *Tectonophysics*, 478(3): 184–214.
- Galín T, Breitfeld H T, Hall R, Sevastjanova I. 2017. Provenance of the Cretaceous–Eocene Rajang Group submarine fan, Sarawak, Malaysia from light and heavy mineral assemblages and U–Pb zircon geochronology[J]. *Gondwana Research*, 51: 209–233.
- Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Ma Ruishi. 1983. On the formation and evolution of the Mesozoic–Cenozoic active continental margin and island arc tectonics of the western Pacific Ocean[J]. *Acta Geologica Sinica*, 57(1): 11–21 (in Chinese with English abstract).
- Hall R. 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer–based reconstructions, model and animations[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(4): 353–431.
- Hall R, Ali J R, Anderson C D. 1995. Cenozoic motion of the Philippine Sea plate: Paleomagnetic evidence from eastern Indonesia[J]. *Tectonics*, 14(5): 1117–1132.
- Hall R. 1996. Reconstructing Cenozoic SE Asia[J]. In: Hall R, Blundell D J (Eds.), *Tectonic Evolution of SE Asia*. Geological Society London Special Publication, 106(1): 153–184.
- Hall R, Van Hattum M W A, Spakman W. 2008. Impact of India–Asia collision on SE Asia: The record in Borneo[J]. *Tectonophysics*, 451(1): 366–389.
- Hall R. 2012. Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean[J]. *Tectonophysics*, 570: 1–41.
- Hall R. 2013. Contraction and extension in northern Borneo driven by subduction rollback[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76: 399–411.
- Hilde T W C, Uyeda S, Kroenke L. 1977. Evolution of the western Pacific and its margin[J]. *Tectonophysics*, 38: 145–165.
- Hilde T W C, Lee C S. 1984. Origin and evolution of the West Philippine Basin: A new interpretation[J]. *Tectonophysics*, 102(1): 85–104.
- Holloway N H. 1982. North Palawan Block, Philippines—its relation to Asian Mainland and role in evolution of South China Sea[J]. *AAPG Bull.*, 66(9): 1355–1383.
- Hutchison C S. 2010. Oroclines and paleomagnetism in Borneo and South–East Asia[J]. *Tectonophysics*, 496(1): 53–67.
- Ishizuka O, Taylor R N, Ohara Y, Yuasa M. 2013. Upwelling, rifting, and age–progressive magmatism from the Oki–Daito mantle plume[J]. *Geology*, 41(9): 1011–1014.
- Lee T Y, Lawver L A. 1995. Cenozoic plate reconstructions of the Southeast Asia[J]. *Tectonophysics*, 251: 85–138.
- Li C F, Xu X, Lin J, Sun Z, Zhu J, Yao Y J, Zhao X X, Liu Q S, Kulhanek D K, Wang J. 2014. Age 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.
- Li C F, Li J B, Ding W W, Franke D. 2015. Seismic stratigraphy of the central South China Sea basin and implications for neotectonics[J]. *Journal of Geophysical Research*, 120(3): 1377–1399.
- Li Sanzhong, Suo Yanhui, Liu Xin, Dai Liming, Yu Shan, Zhao Shujuan, Ma Yun, Wang Xiaofei, Cheng Shixiu, Xue Youchen, Xiong Lijuan, An Huiting. 2012. Basic structural pattern and tectonic models of the south China sea: problems, advances and controversies[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(6): 35–53 (in Chinese with English abstract).
- Li Sitian, Lin Changsong, Zhang Qiming, Yang Shigong, Wu Peikang. 1998. The dynamic process of episodic basin rifting on the northern continental margin of South China Sea and tectonic events since 10 Ma[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(8): 797–810 (in Chinese).
- Li Xuejie, Wang Zhe, Yao Yongjian, Gao Hongfang, Li Bo. 2017. The tectonic features and evolution of the west Pacific margin[J]. *Geology in China*, 44(6): 1102–1114 (in Chinese with English abstract).
- Liang H Y, Campbell I H, Allen C M, Sun W D, Yu H X, Xie Y W, Zhang Y Q. 2007. The age of the potassic alkaline igneous rocks along the Ailao Shan–Red River shear zone: Implications for the onset age of left–lateral shearing[J]. *The Journal of Geology*, 115(2): 201–204.
- Lin Changsong, Yu Xiajun, He Yonghua, Tan Yonghua. 2006. Question on the spreading of the South China Sea Basin[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 28(1): 67–76 (in Chinese with English abstract).
- Liu W N, Li C F, Li J B, Fairhead D, Zhou Z Y. 2014. Deep structures of the Palawan and Sulu Sea and their implications for opening of the South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 721–735.
- Lu Baoliang, Wang Pujun, Liang Jianshe, Sun Xiaomeng, Wang Wanyin. 2014. Structural Properties of Paleo–South China Sea and their relationship with the Tethys and the Paleo–Pacific tectonic domain[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(5): 1441–1450 (in Chinese with English abstract).
- Luan Xiwu, Zhang Liang. 2009. Tectonic evolution modes of South China Sea: Passive spreading under complex actions[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(6): 59–74 (in Chinese with English abstract).
- Madon M, Kim C L, Wong R. 2013. The structure and stratigraphy of deepwater Sarawak, Malaysia: Implications for tectonic evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76: 312–333.
- McElhinny M W, Haile N S, Crawford A R. 1974. Paleomagnetic evidence shows Malay Peninsula was not a part of Gondwanaland[J]. *Nature*, 252(5485): 641–645.
- Mine and Geosciences Bureau of Philippines (MGBP). 2010. *Geologic and Tectonic Map of the Philippines* (third edition).
- Morley C K. 2002. A tectonic model for the tertiary evolution of strike–slip faults and rift basins in SE Asia[J]. *Tectonophysics*, 347

- (4): 189–215.
- Pubellier M, Monnier C, Maury R, Tamayo R. 2004. Plate kinematics, origin and tectonic emplacement of supra-subduction ophiolites in SE Asia[J]. *Tectonophysics*, 392(1): 9–36.
- Pubellier M, Meresse F. 2013. Phanerozoic growth of Asia: Geodynamic processes and evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 118–128.
- Queano K L, Ali J R, Milsom J, Aitchison J C, Pubellier M. 2007. North Luzon and the Philippine Sea Plate motion model: Insights following paleomagnetic, structural, and age-dating investigations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 112: B05101.
- Rangin C, Bellon H, Benard F, Letouzey J, Muller C, Sanudin T. 1990. Neogene arc-continent collision in Sabah, Northern Borneo (Malaysia)[J]. *Tectonophysics*, 183: 305–319.
- Raschka H, Nacario E, Rammlmair D. 1985. Geology of the ophiolite of central Palawan Island, Philippines. *Ofoliti*, 10: 375–390.
- Ren Jianye, Li Sitian. 2000. Spreading and dynamic setting of marginal basins of the western Pacific[J]. *Earth Science Frontiers*, 7(3):203–213 (in Chinese with English abstract).
- Replumaz A, Tapponnier P. 2003. Reconstruction of the deformed collision zone between India and Asia by backward motion of lithospheric blocks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 108(B6): 2285.
- Sdrolias M, Roest W R, Müller R D. 2004. An expression of Philippine Sea plate rotation: The Parece Vela and Shikoku Basins[J]. *Tectonophysics*, 394(1): 69–86.
- Searle M P. 2006. Role of the Red River Shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia[J]. *Journal of the Geological Society of London*, 163(6): 1025–1036.
- Sun Z, Zhou D, Zhong Z H, Xia B, Qiu X L, Zeng Z X, Jiang J Q. 2006. Research on the dynamics of the South China Sea opening: Evidence from analogue modeling[J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 49(10): 1053–1069.
- Sun W D. 2016. 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, Armijo R, Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 10(12): 611–616.
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, Schärer U, Zhong D L, Wu H W, Liu X H, Ji S C, Zhang L S, Zhong J Y. 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China[J]. *Nature*, 343(6257): 431–437.
- Taylor B, Hayes D E. 1982. Origin and history of the South China Sea Basin[C]//Hayes D E (Ed.). *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Part 2*. 27: 23–56.
- Wakita K. 2000. Cretaceous accretionary-collision complexes in central Indonesia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6): 739–749.
- Wang E Q. 2017. A discussion on the timing of the initial collision between the Indian and Asian continents[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 47: 284–292 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pengcheng, Li Sanzhong, Guo Lingli, Zhao Shujuan, Li Xiyao, Wang Yongming, Hui Gege, Wang Qian. 2017. Opening of the South China Sea(SCS): A joint effect of dextral strike-slip pull-apart and proto-SCS slab pull[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(7): 294–319 (in Chinese with English abstract).
- Wu J, Suppe J, Lu R, Kanda R V S. 2016. Philippine Sea and East Asian plate tectonics since 52 Ma constrained by new subducted slab reconstruction methods[J]. *Journal of Geophysical Research*, 121(6): 4670–4741.
- Wu J, Suppe J. 2018. Proto-South China Sea Plate tectonics using subducted slab constraints from tomography[J]. *Journal of Earth Science*, 29(6): 1304–1318.
- Xia Bin, Cui Xuejun, Xie Jianhua, Wang Ran. 2004. Thinking about the dynamics mechanism study on formation and evolution of south china sea[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(3): 221–227 (in Chinese with English abstract).
- Xie Jianhua, Xia Bin, Zhang Yanhua, Wang Xicheng. 2005. Study on formation and evolution of the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 23(2): 212–218 (in Chinese with English abstract).
- Xu Junyuan, Zhang Linyun. 2000. Genesis of Cenozoic basins in northwest Pacific margin(2): Linked dextral pull-apart basin system[J]. *Oil & Gas Geology*, 21(3):185–190 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y G, Wei J X, Qiu H N, Zhang H H. 2012. Opening and evolution of the South China Sea constrained by studies on volcanic rocks: Preliminary results and a research design[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(24): 3150–3164.
- Yamazaki T, Seama N, Okino K, Kitada K, Joshima M, Oda H, Naka J. 2003. Spreading process of the northern Mariana Trough: Rifting-spreading transition at 22° N[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4(9): 1075.
- Yamazaki T, Takahashi M, Iryu Y, Sato T, Oda M, Takayanagi H, Chiyonobu S, Nishimura A, Nakazawa T, Ooka T. 2010. Philippine Sea Plate motion since the Eocene estimated from paleomagnetism of seafloor drill cores and gravity cores[J]. *Earth, Planets and Space*, 62(6): 495–502.
- Yan Quanshu, Shi Xuefa. 2007. Hainan mantle plume and the formation and evolution of the South China Sea[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 311–322 (in Chinese with English abstract).
- Yang Muzhuang, Wu Jinmin, Yang Rui, Duan Weiwu. 1996. Stratigraphic division and nomenclature of the southwestern Nansha Sea area[J]. *Geological Research of South China Sea*, 8: 37–47 (in Chinese with English abstract).
- Yao Bochu. 1997. The sea floor spreading in the SW subbasin of South China Sea and its tectonic significance[J]. *Geological Research of South China Sea*, 9: 20–36 (in Chinese with English abstract).

- Yao Bochu, Wan Lin, Wu Nengyou. 2004. Cenozoic plate tectonic activities in the Great South China Sea area[J]. *Geology in China*, 31(2): 113–122 (in Chinese with English abstract).
- Yumul G P, Dimalanta C B, Maglambayan V B, Marquez E J. 2008. Tectonic setting of a composite terrane: A review of the Philippine island arc system[J]. *Geosciences Journal*, 12(1): 7–17.
- Zhang Gongcheng, Wang Pujun, Wu Jingfu, Liu Shixiang, Xie Xiaojun. 2015. Tectonic cycle of marginal oceanic basin: A new evolution model of the South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 27–37 (in Chinese with English abstract).
- Zhao D P. 2007. Seismic images under 60 hotspots: Search for mantle plumes[J]. *Gondwana Research*, 12(4): 335–355.
- Zhou Di. 2002. Mesozoic strata and sedimentary environment in SW Taiwan basin of NE South China Sea and Peikang high of western Taiwan[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 21(2): 50–57 (in Chinese with English abstract).
- 林长松, 虞夏军, 何拥军, 谭勇华. 2006. 南海海盆扩张成因质疑[J]. *海洋学报*, 28(1): 67–76.
- 鲁宝亮, 王璞珺, 梁建设, 孙晓猛, 王万银. 2014. 古南海构造属性及其与特提斯和古太平洋构造域的关系[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(5): 1441–1450.
- 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.
- 任建业, 李思田. 2000. 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*, 7(3): 203–213.
- 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: 284–292.
- 王鹏程, 李三忠, 郭玲莉, 赵淑娟, 李玺瑶, 王永明, 惠格格, 王倩. 2017. 南海打开模式: 右行走滑拉分与古南海俯冲拖曳[J]. *地学前缘*, 24(7): 294–319.
- 夏斌, 崔学军, 谢建华, 王冉. 2004. 关于南海构造演化动力学机制研究的一点思考[J]. *大地构造与成矿学*, 28(3): 221–227.
- 谢建华, 夏斌, 张宴华, 王喜臣. 2005. 南海形成演化探究[J]. *海洋科学进展*, 23(2): 212–218.
- 许浚远, 张凌云. 2000. 西北太平洋边缘新生代盆地成因(中): 连锁右行走滑裂谷系统[J]. *石油与天然气地质*, 21(3): 185–190.
- 鄢全树, 石学法. 2007. 海南地幔柱与南海形成演化[J]. *高校地质学报*, 13(2): 311–322.
- 杨木壮, 吴进民, 杨锐, 段威武. 1996. 南沙海域西南部地层划分及命名[J]. *南海地质研究*, 8: 37–47.
- 姚伯初. 1997. 南海西南海盆的海底扩张及其构造意义[J]. *南海地质研究*, 9: 20–36.
- 姚伯初, 万玲, 吴能有. 2004. 大南海地区新生代板块构造活动[J]. *中国地质*, 31(2): 113–122.
- 张功成, 王璞珺, 吴景富, 刘世翔, 谢晓军. 2015. 边缘海构造旋回: 南海演化的新模式[J]. *地学前缘*, 22(3): 27–37.
- 周蒂. 2002. 台西南盆地和北港隆起的中生界及其沉积环境[J]. *热带海洋学报*, 21(2): 50–57.

附中文参考文献

- 蔡周荣, 张毅, 刘维亮, 万志峰, 刘平. 2008. 南海的形成演化与新特提斯在南海的重新活化[J]. *沉积与特提斯地质*, 28(3): 21–24.
- 邓晋福, 赵海玲, 吴宗絮, 赖绍聪, 罗照华, 莫宣学. 1992. 中国北方大陆下的热幔柱与岩石圈运动[J]. *现代地质*, 6(3): 267–274.
- 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): 11–21.
- 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 戴黎明, 余珊, 赵淑娟, 马云, 王霄飞, 程世秀, 薛友辰, 熊莉娟, 安慧婷. 2012. 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*, 32(6): 35–53.
- 李思田, 林畅松, 张启明, 杨士恭, 吴培康. 1998. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及10 Ma以来的构造事件[J]. *科学通报*, 43(8): 797–810.
- 李学杰, 王哲, 姚永坚, 高红芳, 李波. 2017. 西太平洋边缘构造特征及其演化[J]. *中国地质*, 44(6): 1102–1114.