

试论南中国海盆地新生代板块构造 及盆地动力学*

张功成¹ 王良书² 唐显春^{2,3} 张开均²
刘绍文⁴ 赵志刚¹ 王鹏¹ 钟锴¹

(1. 中海油研究总院 北京 100027; 2. 南京大学地球科学与工程学院 南京 210093; 3. 中国科学院广州地球化学研究所 广州 510640; 4. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室 南京 210093)

摘要 南海地处欧亚、印度—澳大利亚和菲律宾海板块的交互带,是西太平洋地区面积最大的边缘海之一,其成因机制和演化过程对探讨特提斯构造域和太平洋构造域相互作用及油气勘探等问题具有重要意义,虽备受关注但仍存争议。综合目前该区及外围已有的大地构造等方面的资料,本文从探讨南海外围的构造格架及中-新生代演化过程入手,分析了南海及外围板块构造早第三纪、晚第三纪和第四纪期间的板块演化序列及相应的沉积过程,以期对南海盆地的成盆动力学过程提供约束和启示。此外,还进一步概括了南海北、西和南部大陆边缘性质及其相应的盆地变形特征。

关键词 走滑—拉分作用 伸展盆地 构造体制 南海

中图分类号: P542, P618 **文献标识码:** A **文章编号:** 0563-5020(2011)03-638-15

南海是西太平洋地区面积最大的边缘海之一,它位于欧亚、印度—澳大利亚和菲律宾海板块相互衔接部位,自中生代以来就一直受到上述几大板块的相互作用,它是研究特提斯构造域和太平洋构造域相互作用的关键地区。此外,南海大陆架地区还蕴含丰富的石油、天然气和水合物等资源,也是我国重要的能源基地之一。作为典型的海—陆交互区,南海在东亚季风重建、西太平洋全球变化响应等环境演化问题上同样也具有重要意义。研究南海的形成机制和演化过程是理解上述资源、环境等问题的关键因素之一,因此备受关注 and 争议。

南海成因机制代表性观点可概括为:1)印度—欧亚碰撞引起的渐进挤出模式(Tapponnier et al., 1990; Briais et al., 1993; Leloup et al., 1995, 2001),强调印度—欧亚大陆碰撞和其后持续的挤入,造成印支地块向东南侧挤出,伴随红河断裂长距离左旋走滑,导致加里曼丹地块南移,南海由此拉开;2)弧后扩张机制(Karig, 1971; Ben-Avraham and Uyeda, 1973; 郭令智等, 1983),认为南海是菲律宾岛弧的弧后盆地,与西太平洋中脊俯冲作用有关;3)与深部地幔动力过程有关的主动扩张模式(Tamaki, 1995; Flower et al., 1998),如地幔物质的侧向流动引发了南海的扩张(Tamaki, 1995; Flower et al., 1998),这

* 国家重大基础研究“973”项目“南海深水盆地油气资源形成与分布基础性研究”(编号:2009CB219400)和国家科技重大专项大型油气田及煤层气开发专项“海洋深水油气勘探关键技术”(编号:2008ZX050002025)资助。

张功成,男,1966年1月生,博士,石油地质学专业。E-mail: zhanggch@cnoc.com.cn

2011-03-26 收稿, 2011-04-14 改回。

一过程从数值模拟上似有可能(Liu et al., 2004); 4) 与古南海俯冲有关的拖曳裂解模式(Holloway, 1982; Taylor and Hayes, 1983; Hall, 1996), 强调晚白垩纪—古新世时, 古南海壳向南东俯冲于吕宋和苏禄弧之下, 俯冲造成的拖曳导致了华南陆缘的伸展及南海的打开。然而, 上述模式与现有地质、地球物理等资料并不完全吻合, 甚至存在矛盾(李思田等, 1998; 吴世敏等, 2005; 孙珍等, 2006), 这也表明南海具有复杂的演化历史。

其中, 南海海盆的扩张时限是探讨南海形成机制和演化的一个重要因素, 磁条带异常的识别和鉴定提供了南海演化的历史。已有大量研究探讨南海海盆的磁条带异常及其扩张时间(Ben-Avraham and Uyeda, 1973; Taylor and Hayes, 1983; 袁玉松等, 2008), 基本认为 32 ~ 30 Ma 时的扩张脊在西北和东部次海盆, 扩张方向为北西—南东; 30 ~ 26 Ma 西北次海盆停止扩张, 东部次海盆仍在进行, 此时扩张方向近南北向; 26 ~ 24 Ma 时扩张轴向南跃迁, 扩张作用由东向南西迅速的从中央次海盆向西南次海盆过渡; 15.5 Ma 左右, 扩张作用停止, 海盆的沉积物较薄(孙珍等, 2006; Sun et al., 2009)。当然, 上述磁条带识别及南海不同的次海盆扩张历史也存在争议(袁玉松等, 2008)。

由上可见, 南海海盆的扩张历史及成因机制目前还存在相当大的争议, 对一些关键问题还缺乏共识。本文从探讨南海外围的构造格架及其中-新生代演化过程入手, 在综合已有资料的基础上, 分析了外围板块构造演化序列, 以期对南海盆地成盆动力学过程提供一些约束和启示。

1 南海盆地外围主要板块构造单元和前中生代构造背景

南海盆地外围地区的主要构造单元为太平洋板块、印度—澳大利亚板块、菲律宾海板块、华南板块和印支构造区等, 这些块体相互作用, 造就了该区复杂而强烈的变形。下面就这些块体进行详细说明, 并讨论前中新生代时的大地构造背景。

(1) 太平洋板块

晚侏罗世—早白垩世亚洲大陆边缘长度超过 5 000 km 火山—深成岩带的出现, 标志着环太平洋带演化阶段的开始(Wu et al., 2000)。岩浆活动时代向南东方向变新而钾及全碱含量向北西方向增高, 反映了晚中生代时大洋板块向亚洲大陆的强烈消减。新生代以来是亚洲大陆东部一系列边缘海形成的时期, 日本、菲律宾的巴拉望和北加里曼丹等就是因此从亚洲大陆裂解的; 松辽盆地和华北盆地等是同一过程在陆上的表现。

(2) 印度—澳大利亚板块

可分成较大的澳大利亚板块与较小的印度板块, 两者之间为一道低度活动边界(图 1)。现今印度洋板块为次级的大陆板块, 属于印度洋—澳洲板块的一部分, 包括印度次大陆和印度洋。印度洋板块包括印度洋的北部、中东和东南部、印度半岛、大洋洲的大陆、岛屿及邻近的海洋。

(3) 华南板块

华南大陆是欧亚板块南东缘地壳生长和大陆增生最活跃的大陆边缘, 地表构造复杂, 中生代花岗岩、火山岩分布广泛、多期发育(Zhang, 1997; Wu et al., 2000; 郭令智等, 2001)。该区北部(扬子区)中、上元古界分布较广, 且自晚元古代, 先后过渡为以稳定型

为主的沉积,其中江南地区显示出过渡型沉积特征;南部(南华区)中元古界最近发现于浙闽琼地区和邻区海域,而上元古界、下古生界均属活动型沉积。上古生界一中三叠统则以浅海相稳定型沉积为主,晚三叠世后形成以陆相为主的盆地沉积(Cai and Zhang, 2009; Zhang and Cai, 2009)。

(4) 菲律宾洋板块

在其东界太平洋板块消减于其下,在其西、北西和北界菲律宾板块消减于欧亚板块之下,并由此产生了菲律宾岛弧。菲律宾板块和欧亚板块的碰撞形成了台湾岛,这一过程至今还在延续。在其最北端,伊豆一小笠原—马里亚纳岛弧的增厚地壳则与日本碰撞形成了伊豆碰撞带。在菲律宾岛弧区第三纪安山质侵入岩和喷发岩广泛发育。

(5) 印支构造区

包括印支、掸—泰等地块。印支地块以前寒武纪变质岩系为基底,覆以未变质的古生代和中生代地层。掸—泰地块自沙里向南经马来半岛直达婆罗洲南西部,成为其它陆架的一部分,以紧密褶皱的前寒武纪抹谷群变质岩系为基底,以古生代—中生代的沉积为盖层。走滑构造是该地区最主要的新生代构造特色,形成一系列走滑—旋转次地块、走滑拉分断陷盆地与走滑断裂带。较老走滑断裂系统为古生代和中生代先存断裂的再活动,这些断裂多为左行,优势走向北西—南东,平行于红河断裂。较年轻的走滑断裂系统主要为近北南向右行的剪切带。

(6) 前新生代构造背景概要

晚二叠世 Sibumasu 和拉萨—南羌塘地体从冈瓦纳大陆裂解开来,中-新特提斯洋开始打开;同时由于秦岭古特提斯洋的消减,华南与华北板块开始碰撞(Metcalf, 2005)。印支与华南间的古特提斯洋壳可能于晚二叠世就已经开始向南俯冲于印支板块之下,两个大陆在中三叠世沿滇—琼缝合带完成碰撞,云开凸岬沿河台—合浦剪切带楔入到印支大陆,前者的隆升和剥蚀为右江盆地提供大量的碎屑物,形成巨厚的中三叠统复理石(广西壮族自治区地质矿产局, 1985; Cai and Zhang, 2009)。早-中三叠世,哀牢山—Nan-Uttraratit 弧后盆地随着思茅地体与华南—印支板块的碰撞而闭合(Zhang, 2002)。晚三叠世, Sibumasu、印支板块、东 Malaya、西 Sumatra, 以及 Simao 地体共同拼贴形成东南亚(Zhang and Cai, 2009)。

自晚侏罗世始,欧亚大陆东部主要受古太平洋板块即:库拉板块沿着东亚陆缘前沿向亚洲大陆俯冲影响,出现大规模的中-酸性火山活动和弧后扩张伸展活动,裂陷作用的规模和强度空前,形成规模巨大的岩浆弧和一系列边缘海盆地和内陆裂陷盆地。欧亚大陆西部则由于中特提斯的封闭和新特提斯的拉张,先后有挤压和伸展的相互作用,在中国西部滇藏地区除了北喜马拉雅继续发生褶皱演化外,又有冈底斯褶皱带的形成。这时,澳洲—印度洋板块基本形成。处于欧亚大陆、太平洋、澳洲—印度洋3大板块交汇处的东南亚大陆遭受强大的挤压而重新活动,形成类似于安第斯山型的大陆边缘(Metcalf, 2005)。

2 南中国海盆地早第三纪外围板块构造及盆地动力学

从 65 Ma 起,新特提斯的关闭和印度板块与欧亚板块沿雅鲁藏布江缝合带发生强烈

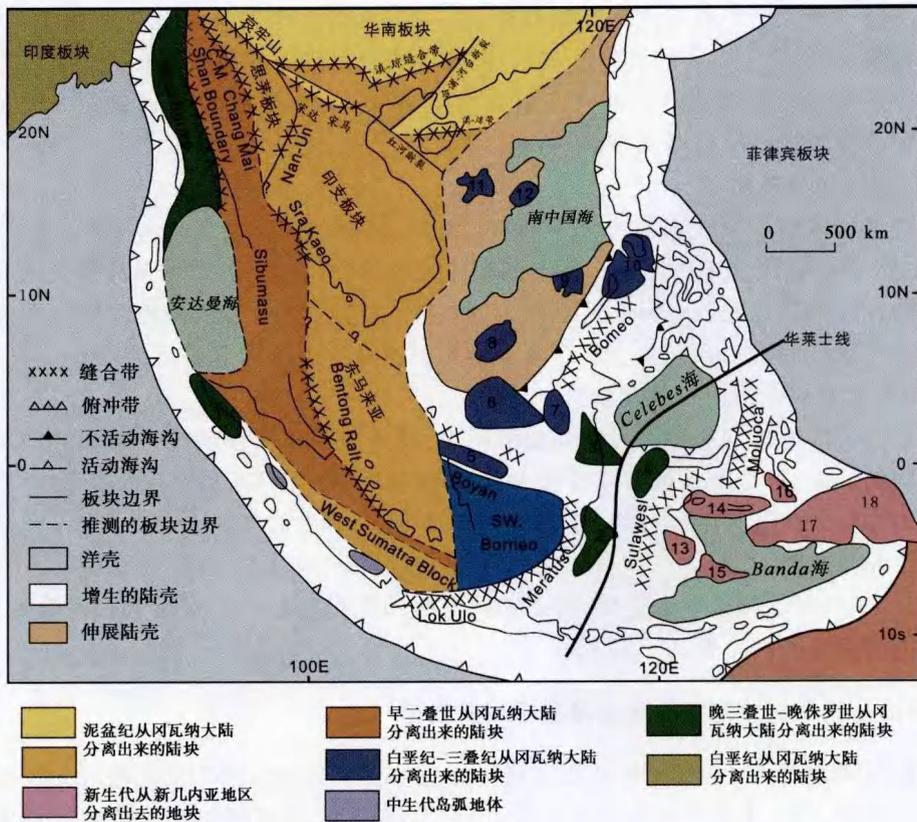


图1 南中国海盆地周边板块构造格局(据 Metcalfe, 2005)

1. Sikuleh; 2. Paternoster; 3. Mangkaihat; 4. 西 Sulawesi; 5. Semitau; 6. Luconia; 7. Kelabit-Longbowan; 8. Spratley Islands-Dangerous Ground; 9. Reed Bank; 10. 北 Palawan; 11. Paracel Islands; 12. Macclesfield Bank; 13. 东 Sulawesi; 14. Bangai-Sula; 15. Buton; 16. Obi-Bacan; 17. Buru-Seram; 18. 西 Irian Jaya; C—M. 昌宁—孟连缝合带

Fig. 1 Tectonic regime of the conjunction area of the southern Chinese Sea

的碰撞,塑造了欧亚板块现今的构造和地貌格局(Metcalfe, 2005)。这时,太平洋板块对欧亚板块的俯冲可能暂时中止,整个东亚大陆内部的应力场重新调整,西部为区域挤压应力场,东部为区域拉张性应力场,地幔物质向东和东南的太平洋板块一侧蠕散,使得燕山期已经拼贴到东亚大陆的增生部分重新解体,碧侯断褶带、卡拉绵断褶带等燕山断褶带裂解离开亚洲大陆向东和东南飘移,其间形成南海。经过阶段性的构造演变,最终塑造出我国现代复杂的地貌景观。

2.1 构造—热事件表征

(1) 台湾岛弧断褶系

白垩纪末,台湾弧曾南连菲律宾和加里曼丹、北接琉球和日本的燕山褶皱带,镶嵌在东亚大陆边缘。由于喜马拉雅运动的强烈改造,后来裂解离开东亚大陆边缘,并在岛上发育有几组南北向断裂。

(2) 菲律宾岛弧断褶系

位于菲律宾大断裂以东的撒马断褶带,是一个上新世中期结束沉降的褶皱带,早第三系始新统-渐新统主要为碎屑岩及灰岩,部分地段有复理石特征并夹有火山岩。中部的马德里-棉兰老断褶带是中新世中期结束的褶皱带。最西部的中科迪勒拉-巴拉望断褶带为始新世末期结束的断褶带。

(3) 加里曼丹断褶带

加里曼丹东南面为残存着的 55 ~ 42 Ma 洋壳的苏拉维系海,其南缘为苏拉威西岛的北臂,由早-中中新世和中中新世末新老两期弧火山物质组成。苏拉维系海洋壳向北—北西方向俯冲和推挤以及苏禄海盆近北南向的扩张,在东加里曼丹及南巴拉望—卡加延脊地区引发了持续的沿一系列北—北西向走滑断裂逆冲推覆的构造活动。

(4) 吕宋左旋走滑—汇聚构造区

该走滑带内的不同块体因一系列走滑断裂,特别是菲律宾左旋走滑断裂的作用而表现出不同的旋向,但整个岛弧带随着西菲律宾海板块,自 50 Ma 以来从赤道附近沿着苏拉—苏朗左旋走滑断裂带经过约 90° 顺时针转动而逐步北移了约 2 500 km 后到达现今位置。在菲律宾弧中的吕宋、宿务、马林杜克和东民都洛等岛上可见白垩纪—古新世火山弧,指示了当时消减板块的边界,西菲律宾海盆地则是古新世该弧后的扩张盆地,该盆地中最老沉积为晚白垩世。

2.2 印度—欧亚板块碰撞及印支半岛的相关变形

始新世-早渐新世,印度—欧亚板块碰撞导致印支半岛相对于华南地块开始发生向南东的挤出运动,印支半岛内部北西走向的旺蔡(Wang Chao)断裂和红河断裂等均发生左行走滑运动(Tapponnier et al., 1990; Lacassin et al., 1993, 1997; Leloup et al., 1995, 2001)(图 2)。这些北西走向断层的左行走滑引起断层所夹持的印支等古地块发生顺时针旋转运动,并且引起印支半岛北西及南东部处于不同性质的主应力作用环境中(Funahara et al., 1992, 1993)(图 2)。

印支半岛西北部因靠近缝合带,主要受北东—南西方向主压应力作用,沿断层及古缝合带发生扭压性变形。一些中生代红盆(如楚雄盆地、兰坪盆地和思茅盆地等)内部的晚白垩世—古新世红层均发生轴向为北西或者近南北走向的褶皱及推覆作用(Tapponnier et al., 1990; Leloup et al., 1995, 2001)。

晚始新世-早渐新世,伴随印度板块逐渐楔入欧亚板块内部,印支半岛内部构造活动带的运动学特征随时间发生了显著的变化。越南西南部 40 ~ 30 Ma 间地壳发生伸展作用,发育了一套高钾火山岩(Chung et al., 1997),北西向的河内凹陷发育了始新统-早渐新统的断陷沉积(Rangin et al., 1995a),同时越南北部在扭张性应力环境中发育了多条北西走向的左行走滑断裂(Rangin et al., 1995b)。随着印度板块的挤入,北西走向旺蔡断裂在 30 Ma 左右发生抬升并且水平滑移方向从左行转变为右行(Lacassin et al., 1993, 1997)。该断裂运动学指向的变化导致印支半岛的应力展布模式发生明显改变在印支半岛西北部,沿北西走向红河断裂发育的中生代红盆仍然处于扭压环境中,思茅盆地的中-晚中新世沉积不整合披盖于中生代褶皱变形地层之上(Chen et al., 1991)。而红河断裂在 30 ~ 22 Ma 之间则主要发生左行剪切变形作用(Schärer et al., 1990, 1994; Harrison et al.,

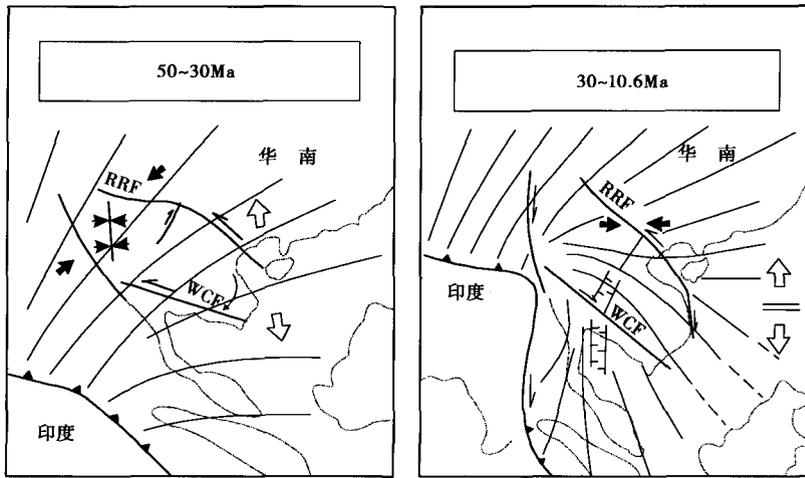


图 2 莺歌海盆地和琼东南盆地周边始新世—中中新世应力展布图(据 Huchon et al.,1994)

Fig. 2 Stress trajectory surrounding Ying-Qiong Basin during Eocene and Mid-Miocene

1992; Leloup and Kienast, 1993; Tamaki, 1995; 张连生等, 1996; Liu et al.,2004)。随后,伴随青藏高原隆升,红河断裂带北西部的糜棱岩在 22 ~ 17 Ma 之间发生具有左行走滑运动分量的快速冷却抬升过程(Tapponnier et al.,1990; Schärer et al.,1990, 1994; Harrison et al.,1992)。中中新世期间,红河断裂处于左行扭张断裂活动阶段,中生代的红盆接受沉积。印支半岛南东部,晚渐新世—早中新世在北纬 17°以南主要发生近南北向断裂的右行走滑运动,而在北纬 17°以北,北西走向的断裂活动可以持续至第三纪末,其构造变形在晚渐新世—中中新世期间主要沿红河断裂发生(Rangin et al.,1995a, 1995b; Wang et al.,2000)。与印支半岛挤出相关的构造动力在南中国海盆地发育区表现为近南北方向的拉伸应力场。如在印支半岛挤出和旋转变形的滑移带上发育的北西向的莺歌海盆地,在初始断陷时间和构造强度上均要早或者强烈于南东向走向的琼东南盆地,且盆地基底与拉伸方向也有明显角度差异(Rangin et al.,1995a)(图 3)。

2.3 东南亚地球动力学演化

印度板块与欧亚板块在第三纪开始的碰撞缝合是塑造东南亚乃至整个欧亚大陆构造特征关键动力要素(图 1)。中新世起,由于大陆碰撞产生的强大水平挤压力,在印度板块北缘形成以紧密褶皱、大规模逆掩为特征的印度板块北缘断褶带。由于库拉—太平洋板块在新生代俯冲到亚洲板块之下,促使上地幔物质运动更为活跃,不断上涌对流,形成一些地幔隆起区,导致岩石圈受热,地壳变薄,岩石圈隆起上部受到张应力作用,并承袭老的破裂面发生裂隙,东南亚地区陆缘海的陆壳转化为洋壳,引起了边缘海的扩张和岛弧的形成,也产生了我国东部及东南亚地区大型盆地。因此盆地中存在着拉张作用明显,内部正断层和同生断层广泛发育,火山活动频繁,岩浆源较深,高热流、高地温梯度异常等一系列特征。最后库拉—太平洋板块向北北西方向俯冲,使亚洲大陆再次受到北东—南西西向的强烈挤压,在这个应力场下,北东—北北东向构造出现顺扭剪切活动

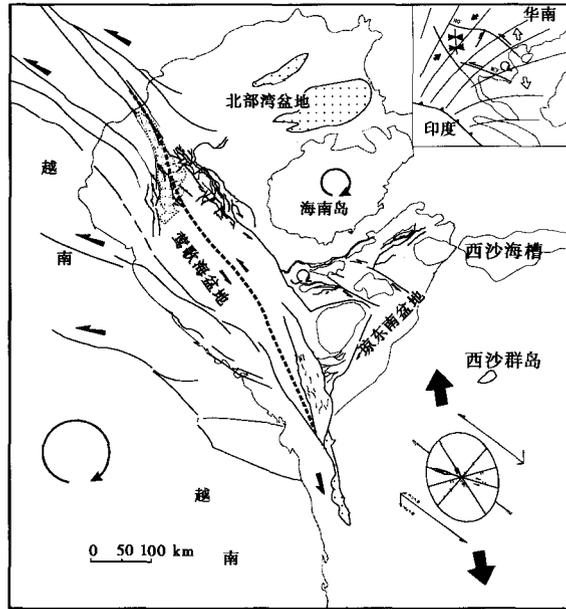


图3 莺歌海盆地和琼东南盆地始新世-早渐新世断陷模式图(越南运动学资料,据 Rangin et al.,1995a)

Fig. 3 Faults and rifts illustration of Ying-Qiong Basin during Eocene to Early Oligocene

(Metcalf, 2005)(图1)。

2.4 南海洋盆初始形成

南海北部在第三纪的构造演化属于被动大陆边缘发育过程,即在海底扩张以前为陆壳裂陷,随着陆壳被拉断,海底扩张开始和发展,断陷盆地相继转入坳陷阶段。莺歌海盆地和琼东南盆地周边区域构造活动在晚渐新世—中中新世期间处于活跃阶段,印支半岛和南海区均发生了重大的构造变革。印支半岛主要沿北西走向红河断裂的挤出运动在其南东部北西走向主位移带形成了左行剪切应力环境;而南海的海底扩张则导致扩张脊南部的陆块朝南发生大幅度的运动,由此在北东走向基底断裂带形成了右行扭张性应力场环境。

南海盆地在晚渐新世—中中新世期间的演化明显地受到南海海底扩张活动的影响。通过对南海及邻区断陷沉积层序与坳陷沉积层序之间不整合面的研究^①(Briaes et al., 1993; 姚伯初, 1998),南海北部盆地以 B. U. 面为代表的断—坳转化时间具有自东向西逐渐变晚的特征(见脚注^①)。其中,珠江口盆地东部发育时间为 33~32 Ma,珠江口西部盆地为 28~27 Ma,而琼东南盆地为 23~22 Ma(Briaes et al., 1993)。具体表现为:

(1) 32~26 Ma 南海海底扩张活动主要发生在东部海盆,扩张速率平均速率约为 55 mm/a。位于东部海盆北部的珠江口盆地东部的断陷阶段结束并且向坳陷转化,坳陷内沉积了珠海组(浅海相沉积)和珠江组(深海相沉积),隆起的边缘和台地上形成了生物

^① 茹克. 1989. 南海北部大陆架主要盆地的成因类型和构造区划. 中国海洋石油公司南海西部石油公司.

礁、滩和碳酸盐岩。

(2) 26 ~ 24 Ma 南海海底扩张脊发生了一次向南跃迁的过程。此后,扩张脊开始向西南方向快速传播,由此导致礼乐滩与中沙群岛发生分离,西南海盆开始扩张,同期,珠江口盆地西部的断陷阶段结束。

(3) 24 ~ 15.5 Ma 东部海盆与西部海盆同时发生扩张,至 20.5 Ma,西南海盆基本上已扩开,并最终在 15.5 Ma 时海底扩张活动停止。在西南海盆基本上扩开期间,琼东南盆地陵水组中晚期的沉积具有断陷、断拗转换期的沉积特征。

因此,南海北部在第三纪的构造演化属于被动大陆边缘发育过程,即在海底扩张以前为陆壳裂陷,随着陆壳被拉断,海底扩张开始和发展,断陷盆地相继转入拗陷阶段。

3 南海盆地晚第三纪外围板块构造及盆地动力学

晚第三纪以后,中国东部裂陷格式面貌一新,表现为华北东部盆—岭构造区转化成华北平原大型断陷盆地,山西地堑系在穹形隆起脊部发育,银川地堑、渭河地堑等地堑系的扩大和活动加强。中更新世以后,由于渤海东侧的断裂活动以及全球海平面上升,黄海海水涌进华北,形成渤海,此时江南则发育有零星的中小型裂陷盆地。到中新世,以南海强烈裂陷为特征的陆缘扩张再次发生,新的海底扩张把南海老洋壳推挤到东侧岛弧之下。这次构造运动所塑造的东亚大陆边缘的构造格局基本定型,即西侧陆缘隆起区、南海陆缘地堑区和东侧台湾岛弧断褶系。

3.1 构造—热事件表征

(1) 台湾岛弧断褶带

晚第三纪以来,台湾东海岸山喜马拉雅断褶带内上新统不整合接触,上覆于中新统火山岩上,有复理石特征,为更新统不整合覆盖。中央山脉晚喜马拉雅断褶带分布有始新统一下中新统千枚状页岩、千枚岩、板岩和片岩,厚度过千米,已发生剪切褶皱和区域变质作用,中新世中期的海岸山运动使得本带褶皱隆升,代表这次造山运动的侵入岩有 33 Ma 的闪长岩侵入体。西部山麓晚喜马拉雅断褶带晚第三纪出露最老地层为中中新统,其上为上中新统的复理石沉积,上新统与中新统为连续的沉积,下部为锦水页岩,上部卓兰组为砂岩,下更新统为磨拉石沉积,与下伏地层过渡或间断接触。一系列向南东倾斜的叠瓦状逆冲断层。在此基础上发育平行于褶皱山系的前陆盆地。

(2) 菲律宾岛弧断褶系

晚第三纪以来,菲律宾褶皱系内主要为硅质及灰岩,上中新统及下上新统为海相碎屑岩、灰岩,北部还有酸性凝灰岩,上部过渡为滨海相褐煤。这套地层分布广泛,与老地层一起褶皱。渐新世末,本区曾发生构造变形,棉兰老岛东缘有石英闪长岩小岩株侵入体。中新世中期的构造运动也有影响,到了上新世中期才结束沉积历史,新老地层一起强烈褶皱。

3.2 印支半岛及南海区构造应力变形

中中新世末,印度—欧亚板块以及太平洋—欧亚板块之间的汇聚速率均有一定幅度

的增高。它对印支半岛、华南地区及南海北部盆地的构造变形均产生了明显的影响,并且引起莺歌海盆地和琼东南盆地周边区域的晚中新世—第四纪期间应力场呈扇形展布格局。在印度—欧亚板块碰撞带,伴随印度—欧亚板块缝合带的逼近及汇聚速率的加快,青藏高原自晚中新世开始发生新一期的快速隆起,同时红河断裂东侧的华南地块挤出运动加强,由此导致南海北西的北部湾盆地在中中新世末沿一些北东走向半地堑发生构造正反转^②(见脚注^①)。此外对红河断裂北部,第四纪地貌、近代地震震源机制解释及金三角地区的U型急弯河(Hairpin River)的研究(Allen et al.,1984;Leloup and Kienast,1993;Leloup et al.,1995;Lacassin et al.,1997)显示,红河断裂带在上新世—第四纪处于右行走滑状态,滑移量约为20~50 km。但是,红河断裂带南部的同期断裂活动不明显,印支半岛南东部自晚中新世以来主要发生抬升运动(Rangin et al.,1995a,1995b)。在环太平洋地区,太平洋—欧亚板块在晚中新世—第四纪汇聚速率增加(110 mm/Ma)可能引起沿俯冲带的地体增生事件明显增加以及地幔活动显著的增强。例如,南海东部、吕宋弧自晚中新世开始与台湾陆缘碰撞,促使台湾海峡盆地转变为前陆盆地的发展阶段,而南海北部盆地则处于东压西张的总体应力背景中,同期的玄武岩浆活动在南海西部陆缘广泛发育(Teng,1990)。

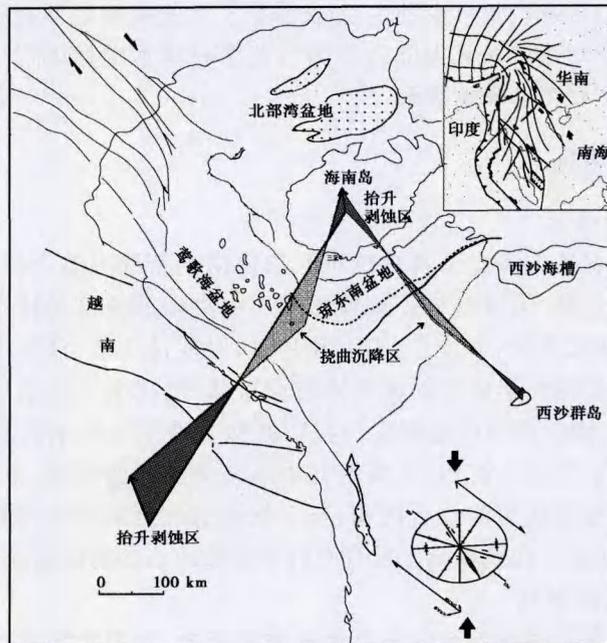


图4 莺歌海盆地和琼东南盆地晚中新世—第四纪演化模式图

Fig. 4 Tectonic evolution model of Yiong-Qiong Basin during the Late Miocene to Quaternary period

②张敏强.1991.北部湾盆地油气资源再评价.南海西部石油公司勘探开发科学研究院.

4 南中国海盆地第四纪外围板块构造及盆地动力学

南海盆地在晚中新世—第四纪发生了一期快速沉降。盆地沉降期间的断层活动主要受到近南北方向的挤压,表现为一些北西走向的断层发生扭张、北东走向的断层发生扭压变形和东西走向的地层发生褶皱。

在南海西部的海南岛北部及越南东部沿海地区,中中新世—第四纪期间发生了大规模的玄武岩火山活动。火山活动的高峰期在晚中新世—第四纪。海南岛北部的火山活动主要受东西走向与北西走向的断裂交叉部位控制(Flower et al., 1992),越南东部沿海受南北走向的张性断裂控制(Rangin et al., 1995b)。岩浆活动可以根据玄武岩成分特征分为两期,16~9 Ma 的火山岩类型以石英拉斑玄武岩为主,8 Ma 以后火山喷发以橄榄拉斑玄武岩和碱性玄武岩为主,同时含有石英拉斑玄武岩的喷发。早期含石英的玄武岩的源区具有富集型(EM II)和亏损型地幔混岩的特征,反映其源区与南海区的俯冲岩石圈的熔融作用有关,而晚期的橄榄玄武岩则主要来自于软流圈地幔(Flower et al., 1992; Tu et al., 1992; Hoang et al., 1996)。因此,南海区中中新世发生的地幔活动与板块的俯冲作用有关,它本身并非相对稳定的、起源于核幔边界的典型地幔柱;晚中新世—第四纪,伴随软流圈的抬升,软流圈地幔的部分熔融对岩浆活动的贡献变得更为重要,显示出地幔的主动活动性质。软流圈地幔熔融产生的玄武岩浆底辟上升,驱动了岩浆发育区地壳的隆升(Rangin et al., 1995b),控制了莺歌海盆地和琼东南盆地及其周边地区晚中新世—第四纪的构造变形作用。

5 南海海域诸盆地的构造演化特征

受上述中-新生代期间外围板块的相互作用,南海各大陆边缘新生代盆地呈带分布,且为重要的油气聚集带。其陆架和陆坡区发育 30 多个新生代盆地,局部地区有中生代残余盆地。沉积盆地主要分布在南海南北两侧,东西两侧大陆边缘盆地较少(张功成等, 2010)。但因受不同的地球动力学背景影响,南海演化的各个阶段都有盆地形成,纵向上不同阶段形成的盆地既有叠加,也存在迁移,表现为其盆地性质和演化特征也各异(张功成等, 2010)。新生代期间的印度—欧亚大陆碰撞和菲律宾海板块的俯冲这两大地球动力学事件分别从东、西两侧影响本区盆地晚期的形成与改造(张功成, 2010)。南海海域盆地的特征分述如下:

5.1 北部伸展型边缘及成盆特征

南海北部大陆边缘为减薄的地壳,其上发生一系列北东—南西向构造断裂。位于最北面的北部湾盆地裂陷作用开始最早,晚白垩世便发生第一期裂陷;位于中带的珠江口盆地的珠一和珠三拗陷及琼东南盆地均未钻遇晚白垩世沉积,其中,珠江口盆地最早沉积为早始新世,而琼东南盆地比珠江口略晚,而南海海盆更晚(孙珍等, 2006)。此外,该区断裂走向由晚白垩世的北东走向转变为渐新世的北东东向(李平鲁, 1989)。北部大陆边缘在中生代晚期有强烈的岩浆活动,具有活动大陆边缘特征;而早第三纪演化为伸展和裂陷的边缘。盆地构造以半地堑群及相间的隆起带为特征(李思田等, 1997;张功

成,2010)。与晚第三纪和第四纪后期沉降形成海相地层构成叠合坳陷。琼东南盆地和珠江口盆地西部都发现了北倾的大型低角度正断层,可能是伸展过程中切过上地壳的断裂。该区晚第三纪以来变形强烈,特别是5 Ma以来吕宋岛弧和台湾岛弧的碰撞,在珠江口盆地形成了密集的近东西—北西西向、近乎等间距分布的断裂构造带(张功成,2010)。南海北部边缘以东北向为主导的盆地向南西方向延伸至海南岛以南的近南北向中间隆起,其西的莺歌海盆地则呈北西向,两者之间在早第三纪成接触关系,晚第三纪则连成一片(李思田等,1997)。受南海扩张影响,其北部大陆边缘盆地都经历了裂谷期、裂后热沉降期和新构造活动期等3大阶段,从而造成了目前的格局。不同期形成的地层被显著的区域不整合面分隔,受构造迁移作用影响,这些盆地可进一步分为北部陆架区和南部陆坡区,其中陆架区凹陷以裂谷期地层充填为主,裂后期为辅,形成“皮薄肉厚”的坳陷;南部陆坡区却表现为裂谷期和裂后期地层均相当发育,具有“皮、肉皆厚”的坳陷(张功成,2010)。

5.2 西部转换—伸展边缘及成盆特征

南海西部边缘盆地环印支地块呈弧形分布。莺歌海盆地呈北西向,直接发育在红河断裂之上,盆地在早第三纪裂陷期和晚第三纪后期形成了很深的沉降,为受红河断裂系控制的走滑拉分盆地。盆地中央形成5~6排轴向走向南北和东西近间距分布的反转背斜带(张功成,2010)。结合周边新生代区域构造演化综合分析,莺歌海盆地形成和演化构造应力场分为4个阶段(郭令智等,2001):1)古新世末-早渐新世印支地块快速向南东向挤出,为盆地提供了左旋剪切分量;同时伴随地块的顺时针旋转,则为盆地提供了北东—南西向伸展分量,两者叠合效应使得盆地处于斜向拉伸状态。2)晚渐新世—早中新世,印支地块南东向挤出减弱,莺歌海盆地处于左旋剪切状态;但因南海扩张影响,左旋剪切背景上叠加了近南北向伸展分量。3)中-晚中新世,该阶段期间印支块体挤出减弱,中中新世末,华南块体开始挤出,而上新世末,华南与印支地块呈右旋运动,该阶段也为左旋向右旋过渡期。4)上新世—第四纪,期间印支地块相对稳定,华南继续挤出,两者之间为右旋剪切运动。盆地呈北西向展布,处于右旋扭动的东西向伸展状态。

5.3 南部复杂性边缘及盆地特征

南海南部边缘构造演化比较复杂。加里曼丹北部分布着由白垩纪至早第三纪早期海相沉积组成的变质岩山系——Crocker-Rajang造山带,该带北东向延伸逾千公里,曾母和文莱—沙巴为代表的新生代盆地分布其北侧。文莱—沙巴盆地具有叠合特征,盆地下部具有明显的压型变形,但自南向北减弱,上中新世以来的沉积则显示为伸展变形(李思田等,1997)。

6 结 论

南海的形成和演化受其周缘地区的各大地构造格架和板块构造过程影响,特别是与新生代以来印度板块和欧亚大陆挤压碰撞及红河断裂带的走滑和旋转关系密切。总体而言,其发育过程经历了早第三纪早中期陆壳断陷、早第三纪晚期到晚第三纪早期大洋

扩张及晚第三纪到第四纪的快速沉积阶段,并发育有相应构造阶段盆地沉积序列。

受周缘不同地球动力学背景影响,南海大陆边缘具有不同性质的变形特征,其中南海北部为伸展型大陆边缘,东南部具有压扭特征,西部为转换伸展陆缘,从而造就了这一区域上各具特色的新生代盆地群。

参 考 文 献

- 广西壮族自治区地质矿产局. 1985. 广西壮族自治区区域地质志. 北京:地质出版社. 1—853.
- Guangxi Bureau of Geology. 1985. Regional Geology of Guangxi Zhuang Autonomous Region, People's Republic of China. Beijing: Geological Publishing House. 1—853.
- 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及演化. 地质学报, **57**(1): 11—21.
- Guo Lingzhi, Shi Yangshen and Ma Ruishi. 1983. On the formation and evolution of the Mesozoic-Cenozoic active continental margin and island arc tectonics of the western Pacific Ocean. *Acta Geologica Sinica*, **57**(1): 11—21.
- 郭令智,钟志洪,王良书,施央申,李 华,刘绍文. 2001. 莺歌海盆地周边区域构造演化. 高校地质学报, **7**(1): 1—12.
- Guo Lingzhi, Zhong Zhihong, Wang Liangshu, Shi Yangshen, Li Hua and Liu Shaowen. 2001. Regional tectonic evolution around Yinggehai Basin of South China Sea. *Geological Journal of China Universities*, **7**(1): 1—12.
- 李平鲁. 1989. 珠江口盆地构造结构及演化. 中国海上油气(地质), **3**(1): 11—18.
- Li Pinglu. 1989. Structure and evolution of Zhujiangkou Basin. *China Offshore Oil and Gas(Geology)*, **3**(1): 11—18.
- 李思田,杨大明. 1998. 关于南海及其边缘盆地形成的地球动力学背景的讨论. 见: 龚再升, 李思田等著. 南海北部大陆边缘盆地油气分析与油气聚集. 北京: 科学出版社. 1—122.
- Li Sitian and Yang Jiaming. 1998. Discussion on the background of geodynamics in the formation of the South China Sea and its marginal basins. In: Gong Zaisheng, Li Sitian et al. (Eds.). *Continental Margin Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Northern South China Sea*. Beijing: Science Press. 1—122.
- 孙 珍, 钟志洪, 周 蒂, 夏 斌, 丘学林, 曾佐勋, 姜建群. 2006 南海的发育机制研究: 相似模拟证据. 中国科学(D 辑), **36**(9): 797—810.
- Sun Zhen, Zhou Di, Zhong Zhihong, Xia Bin, Qiu Xuelin, Zeng Zuoxun and Jiang Jianqun. 2006. Research on the dynamics of the South China Sea opening: Evidence from analogue modeling. *Science in China(Series D)*, **49**(10): 1053—1069.
- 吴世敏, 杨 恬, 周 蒂, 丘学林, 夏 斌. 2005. 南海南北共轭边缘伸展模型探讨. 高校地质学报, **11**(1): 105—110.
- Wu Shimin, Yang Tian, Zhou Di, Qiu Xuelin and Xia Bin. 2005. Discussion on the extension model for the conjugate continental margin of South China Sea. *Geological Journal of China Universities*, **11**(1): 105—110.
- 姚伯初. 1998. 南海北部陆缘的地壳结构及构造意义. 海洋地质与第四纪地质, **18**(2): 1—16.
- Yao Bochun. 1998. Crust structure of the northern margin of the South China Sea and its tectonic significance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, **18**(2): 1—16.
- 袁玉松, 丁玫瑰. 2008. 南海北部深水区域盆地特征及期动力学背景. 海洋科学, **32**(12): 102—110.
- Yuan Yusong and Ding Meigui. 2008. Characteristics and geodynamic settings of the basins in deep water area of the northern South China Sea margin. *Marine Science*, **32**(12): 102—110.
- 张连生, 钟大赉. 1996. 从红河断裂带走滑运动看东亚大陆新生代构造. 地质科学, **31**(4): 327—340.
- Zhang Liansheng and Zhong Dalai. 1996. The Red River strike-slip shear zone and cenozoic tectonics of east Asia continent. *Scientia Geologica Sinica*, **31**(4): 327—340.
- 张功成, 朱伟林, 米立军, 张厚和, 梁建设, 屈红军. 2010. “源热共控论”: 来自南海海域油气田“外油内气”环带有序分布的新认识. 沉积学报, **28**(5): 987—1005.
- Zhang Gongcheng, Zhu Weilin, Mi Lijun, Zhang Houhe, Liang Jianshe and Qu Hongjun. 2010. The theory of hydrocarbon Generation controlled by source rock and heat from circle distribution of outside-oilfields and inside-gas fields in South

- China Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, **28**(5): 987—1005.
- 张功成. 2010. 南海北部陆坡深水构造演化及其特征. *石油学报*, **31**(4): 528—533.
- Zhang Gongcheng. 2010. Tectonic evolution of deepwater area of northern continental margin in South China Sea. *Acta Petrologica Sinica*, **31**(4): 528—533.
- Allen C R, Gillespie A R, Han Y A, Sieh K E, Zhang B C and Zhu C N. 1984. Red River and associated faults, Yunnan Province, China; Quaternary geology, slip rates, and seismic hazard. *Geological Society of America Bulletin*, **95**(6): 686—700.
- Ben-Avraham Z and Uyeda S. 1973. The evolution of the China Basin and the mesozoic paleogeography of Borneo. *Earth and Planetary Science Letters*, **18**(2): 365—376.
- Briaux A, Patriat P and 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. *Journal of Geophysical Research*, **98**(B4): 6299—6328.
- Cai J X and Zhang K J. 2009. A new model for the Indochina and south China collision during the Late Permian to the Middle Triassic. *Tectonophysics*, **469**(1—4): 35—43.
- Chen J F, Foland K A, Xing F M, Xu X and Zhou T X. 1991. Magmatism along the southeast margin of the Yangtze block: Precambrian collision of the Yangtze and Cathaysia block of China. *Geology*, **19**(8): 815—818.
- Chung S L, Lee T Y, Lo C H, Wang P L, Chen C Y, Yem N T, Hoa T T and Wu G Y. 1997. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailao Shan Red River shear zone. *Geology*, **25**(4): 311—314.
- Flower M F J, Tamaki K and Hoang N. 1998. Mantle extrusion: A model for dispersed volcanism and DUPAL-like asthenosphere in east Asia and the western Pacific. In: Flower M F J, Chung S L, Lo C H and Lee T Y (Eds.). *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Washington: American Geophysical Union. 67—88.
- Flower M F J, Zhang M, Chen C Y, Tu K and Xie G H. 1992. Magmatism in the South China Basin: 2. Post-spreading Quaternary basalts from Hainan Island, south China. *Chemical Geology*, **97**(1—2): 65—87.
- Funahara S, Nishiwaki N, Miki M, Murata F, Otofujii Y and Wang Y Z. 1992. Paleomagnetic study of Cretaceous rocks from the Yangtze block, central Yunnan, China: Implications for the India-Asia collision. *Earth and Planetary Science Letters*, **113**(1—2): 77—91.
- Funahara S, Nishiwaki N, Murata F, Otofujii Y and Wang Y Z. 1993. Clockwise rotation of the red River fault inferred from paleomagnetic study of Cretaceous rocks in the Shan-Thai-Malay block of western Yunnan, China. *Earth and Planetary Science Letters*, **117**(1—2): 29—42.
- Hall R. 1996. Reconstructing Cenozoic SE Asia. *Geological Society, London, Special Publications*, **106**: 153—184.
- Harrison T M, Chen W J, Leloup P H, Ryerson F J and Tapponnier P. 1992. An Early Miocene transition in deformation regime within the Red River fault zone, Yunnan, and its significance for Indo-Asian tectonics. *Journal of Geophysical Research*, **97**(B5): 7159—7182.
- Hoang N, Flower M F J, Nguyen X B and Nguyen T Y. 1996. Trace element and isotopic compositions of Vietnamese basalts: Implications for mantle dynamics in the southeast Asian region. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **167**: 785—795.
- Holloway N H. 1982. North Palawan block, Philippines; its relation to Asian mainland and role in evolution of South China Sea; discussion. *AAPG Bulletin*, **66**(9): 1355—1383.
- Huchon P, Lepichon X and Rangin C. 1994. Indo-China Peninsula and the collision of India and Eurasia. *Geology*, **22**(1): 27—30.
- Karig D E. 1971. Origin and development of marginal basins in the western Pacific. *Journal of Geophysical Research*, **76**(11): 2542—2561.
- Lacassin R, Leloup P H and Tapponnier P. 1993. Bounds on strain in large Tertiary shear zones of SE Asia from boundinage restoration. *Journal of Structural Geology*, **15**(6): 677—692.
- Lacassin R, Maluski H, Leloup P H, Tapponnier P, Hinthong C, Siribhakdi K, Chuaviroj S and Charoenravat A. 1997. Tertiary

- diachronic extrusion and deformation of western Indochina: Structural and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence from NW Thailand. *Journal of Geophysical Research*, **102**(B5): 10013—10037.
- Leloup P H and Kienast J R. 1993. High-temperature metamorphism in a major strike-slip shear zone: The Ailao Shan-Red River, People's Republic of China. *Earth and Planetary Science Letters*, **118**(1—4): 213—234.
- Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, Kienast J R, Harrison T M, Trong T T P, Replumaz A and Tapponnier P. 2001. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE Asia. *Journal of Geophysical Research*, **106**(B4): 6683—6732.
- Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, Schärer U, Zhong D L, Liu X H, Zhang L S, Ji S C and Trinh P T. 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, **251**(1—4): 3—10.
- Liu M, Cui X J and Liu F T. 2004. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: A mantle dynamic link to the Indo-Asian collision? *Tectonophysics*, **393**(1—4): 29—42.
- Metcalfe I. 2005. Asia: South-east. In: Selley R C, Cocks L R M and Plimer I R (Eds.). *Encyclopedia of Geology*. Oxford: Elsevier. 169—198.
- Rangin C, Klein M, Rogues D, LePichon X and Trong L V. 1995a. The Red River fault system in the Tonkin Gulf, Vietnam. *Tectonophysics*, **243**(3—4): 209—222.
- Rangin C, Huchon P, LePichon X, Bellon H, Lepvrier C, Roques D, Hoe N D and VanQuynh P. 1995b. Cenozoic deformation of central and South Vietnam. *Tectonophysics*, **251**(1—4): 179—196.
- Scharer U, Copeland P, Harrison T M and Searle M P. 1990. Age, cooling history, and origin of post-collisional leucogranites in the Karakoram batholite: A multi-system isotope study. *The Journal of Geology*, **98**(2): 233—251.
- Schärer U, Zhang L S and Tapponnier P. 1994. Duration of strike-slip movements in large shear zones: The Red River belt, China. *Earth and Planetary Science Letters*, **126**(4): 379—397.
- Sun Z, Zhou D, Wu S M, Zhong Z H, Keep M, Jiang J Q and Fan H. 2009. Patterns and dynamics of rifting on passive continental margin from shelf to slope of the northern South China Sea: Evidence from 3D analogue modeling. *Journal of Earth Science*, **20**(1): 136—146.
- Tamaki K. 1995. Upper mantle extrusion tectonics of southeast Asia and formation of western Pacific back-arc basins. In: Le Pichon X, Rangin C and Tapponnier P (Eds.). *International Workshop: Cenozoic Evolution of the Indochina Peninsula, Hanoi-Do Son, Abstract with Program, Hanoi*. 89.
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, Schärer U, Zhong D L, Wu H W, Liu X H, Ji S C, Zhang L S and Zhong J Y. 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, **343**: 431—437.
- Taylor B and Hayes D E. 1983. Origin and history of the South China Sea Basin. In: Hayes D E (Ed.). *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Part*. Washington DC: AGU Geophys. Monogr Ser, 27. 23—56.
- Teng L S. 1990. Geotectonic evolution of Late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan. *Tectonophysics*, **183**(1—4): 57—76.
- Tu K, Flower M F J, Carlson R W, Xie G H, Chen C Y and Zhang M. 1992. Magmatism in the South China Basin. 1. Isotopic and trace-element evidence for an endogenous Dupal mantle component. *Chemical Geology*, **97**(1—2): 47—63.
- Wang X F, Metcalfe I, Jian P, He L Q and Wang C S. 2000. The Jinshajiang-Ailaoshan suture zone, China: Tectonostratigraphy, age and evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, **18**(6): 675—690.
- Wu G G, Zhang D, Cheng B L and Wu J S. 2000. Post-Mesozoic transformation of tectonic domain in southeastern China and its geodynamic mechanism. *Journal of Earth Science*, **11**(3): 288—292.
- Zhang K J. 1997. North and South China collision along the eastern and southern north China margins. *Tectonophysics*, **270**(1—2): 145—156.
- Zhang K J. 2002. Escape hypothesis for the north and South China collision and the tectonic evolution of the Qinling orogen, eastern Asia. *Eclogae Geologicae Helveticae*, **95**(2): 237—247.

Zhang, K J and Cai J X. 2009. NE-SW-trending Hepu-Hetai dextral shear zone in southern China: Penetration of the Yunkai Promontory of South China into Indochina. *Journal of Structural Geology*, **31**(7): 737—748.

On the Cenozoic tectonics and basin dynamics of the South China Sea

Zhang Gongcheng¹ Wang Liangshu² Tang Xianchun^{2, 3}

Zhang Kaijun² Liu Shaowen⁴ Zhao Zhigang¹ Wang Peng¹ Zhong Kai¹

(1. *CNOOC Institute, Beijing* 100027; 2. *School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing* 210093; 3. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640; 4. *Key Laboratory of Coast and Island Development, MOE, Nanjing University, Nanjing* 210093)

Abstract

The South China Sea is located at the conjunction of the Eurasia, India-Australia and Philippine plates, and is the largest marginal sea in the western Pacific area. The mechanism and tectonic evolution of the South China Sea, which will shed great insights into the interaction between the Tethyan and Pacific tectonic realms and the assessment of the oil and gas potential, are still open to intense debate. Based on the existing structural and tectonic information of the South China Sea and its adjacent areas, we tentatively discussed the tectonic evolution of regions around the South China Sea during the Early and Late Tertiary through the Quaternary. The origin and evolution of the South China Sea were largely restrained by the India-Asian collision and the rotation of continental blocks along the Red River fault during the Cenozoic. South China Sea developed under the rift-strike tectonic background with the levorotary of Red River fault transfer to dextrorotation accompanying the convergency of India-Asian plate. Cenozoic subduction of the Pacific plate beneath to the Eurasian continent result the disintegration of accumulated East Asian terranes during the Mesozoic. Continuous continental subduction of South China Sea caused the underplate of basalt and uplifted the continental crust, and initiate the broad magmatism during the Mid-Miocene, and formed the miniature of modern South China Sea's deformation and tectonic framework. Generally, the South China Sea experienced initial marginal rifting in early and Middle of the Early Tertiary, strike-slipping pull-apart and oceanic extension during the later Early Tertiary to the early Late Tertiary, and Neotectonism from later Late Tertiary to Quaternary, respectively. Meanwhile, sedimentary sequences corresponding to the relevant tectonic setting. Cenozoic basins within the South China Sea have undergone different formation times, continental marginal deformation and basin characteristics because of the multiple plate tectonic dynamics around it. The northern South China Sea is a typical extensional continental margin result from the extension of oceanic crust, while its southeast is a compressional margin and its west is a transfer extensional continental margin.

Key Words Strike-slipping pull-apart, Extensional basin, Tectonic regime, South China Sea