

# 南海成因机制及北部岩石圈热-流变结构研究进展

刘绍文<sup>1,2</sup>, 施小斌<sup>2</sup>, 王良书<sup>3</sup>, 高抒<sup>1</sup>, 胡旭芝<sup>3</sup>, 冯昌格<sup>3</sup>

(1 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093; 2 中国科学院南海海洋研究所 边缘海地质

重点实验室, 广州 510301; 3 南京大学地球科学系, 南京 210093)

**摘要:**南海是西太平洋地区最大的边缘海之一,其北部具有被动大陆边缘特征。南海的形成演化动力学过程对理解该区域地质、资源、环境等科学问题有重要意义。综述了近年来在南海北部大陆边缘开展的岩石圈热状态、流变学及南海成因机制和国际上伸展盆地成因数值模拟等方面的研究进展。南海北部大陆边缘区的大地热流相对较高,平均为 $75 \text{ mW/m}^2$ ,其中绝大部分为来自地幔热流的贡献。莫霍面温度亦较高,从陆架向海盆方向,深部地温越来越高。岩石圈具有温度高、强度低和强烈流变分层等特征,且下地壳表现为韧性流动变形。伸展盆地成因模拟研究已从运动学向动力学模拟过渡,并逐渐强调岩石圈流变学性质的影响。目前对南海成因机制的理解仍存在争议,大陆裂解过程中岩石圈热-流变结构随时间的变化是控制南海形成演化的关键因素,对南海形成中岩石圈的热-流变学结构随时间的演化过程需要进行深入研究。

**关键词:**岩石圈热-流变结构;地球动力学;南海北部

**中图分类号:** P736.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0256-1492(2006)04-0117-08

边缘海是大陆和大洋岩石圈过渡带上形成的特殊构造地质单元,有其独特的形成演化机制。作为全球构造的一个重要组成部分和新生代全球最为壮观的一个地质现象,西太平洋一系列边缘海的形成早已被海洋地质学家和地球科学界所关注<sup>[1-2]</sup>。南海作为西太平洋典型的边缘海之一,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,也是我国重要的油气能源基地之一。作为海-陆交互关键地区,南海在东亚季风重建、西太平洋全球变化响应等气候环境演化问题上也具有重要的意义。南海的形成演化动力学过程作为理解上述地质、资源、环境等科学问题的关键而倍受地球科学界瞩目,虽取得了相当进展,但仍存争议<sup>[3-7]</sup>。

构造应力作用下,岩石圈的变形方式取决于其流变学性质。岩石圈热状态是岩石圈演化过程的反映,也制约了岩石圈的流变学特征。因此,岩石圈热-流变学特征是揭示岩石圈变形的关键。要真正了解南海形成演化的动力学过程和机制就势必需要对该区的岩石圈热-流变学性质有深入的认识。美国自然科学基金会在其公布的“MARGINS Program Science Plans 2004”中就明确提出大陆岩石圈

裂解是未来四大研究领域之一,并强调岩石圈裂解过程中强度和热力学的演化方式是主要的研究内容<sup>[8]</sup>。本文的目的是综述近期南海北部大陆边缘地区岩石圈热状态、流变学结构以及南海拉张机制和伸展盆地成因模拟等方面的研究进展,并就未来研究的方向和重点问题提出初步看法。

## 1 区域地质与地球物理背景

南海是西太平洋面积最大的边缘海之一,位于欧亚、太平洋和澳大利亚-印度三大板块的交汇处,经历了复杂的地质作用和演化过程。宋海斌等<sup>[9]</sup>基于南海及邻区的地层、岩浆活动及综合地球物理资料,认为经历了中晚三叠世—早侏罗世西段拼贴东段边缘海、中晚侏罗世—晚白垩世早期安第斯型活动大陆边缘、晚白垩世—早渐新世被动大陆边缘发育的拉张阶段和中渐新世以来的海底扩张、区域沉降、俯冲碰撞(被动陆缘的裂后阶段)等演化阶段。周新民和李武显等<sup>[10]</sup>通过对中国东南部晚中生代火山岩带的研究,指出南海北部在中晚侏罗世表现为安第斯型活动大陆边缘,而从早白垩世开始,伴随太平洋板块俯冲角度的增大和俯冲速率的降低,南海北部表现为太平洋型活动大陆边缘。孙珍等<sup>①</sup>最近的研究认为南海北部在早白垩世后逐渐由主动大

**基金项目:**中国科学院边缘海地质重点实验室开放基金(MSGL0505);国家自然科学基金项目(40204006);国家重点基础研究发展规划项目(G20000467)

**作者简介:**刘绍文(1977—),男,博士后,从事岩石圈热-流变结构和地球动力学研究,E-mail: shaowliu@nju.edu.cn

**收稿日期:** 2006-01-06; **改回日期:** 2006-06-01. 周立君编辑

① 孙珍,钟志洪,周蒂,等. 南海的发育机制研究—相似模拟证据. 中国科学, 2006, 36(6), 待刊.

陆边缘转为被动大陆边缘。Taylor等<sup>[11]</sup>认为晚白垩世开始的华南陆缘的裂谷拉张作用和晚渐新世一早中新世的海底扩张导致了南北陆缘沉积盆地和南海海盆的形成。总之,南海北部自晚白垩世以来具有被动大陆边缘特征,发生了大规模的地壳拉张、减薄作用,导致了一系列NE-NNE走向的阶梯状正断层的发育,表现为新生代沉积凹陷带,也是我国大型油气产区之一(图1)。

南海北部地壳结构的深部地震测深研究具有较长的历史,先后经历了20世纪70年代的声纳浮标探测、80年代的双船扩展剖面(ESP)和90年代以来的海底地震仪(OBH/OBS)探测3个阶段;特别是90年代以来,随着海底地震仪探测技术的发展,获得了相当多的高品质地震资料,从而提升了对研究区深部构造的认识。南海北部地壳结构的深地震探测历史和研究进展不是本文的重点,这里只是简要介绍,最近已有学者就相关内容做了很好的综述<sup>[13-14]</sup>。中美合作的三条双船扩展剖面虽主要集中在珠江口盆地区,但测线布置覆盖面大,较为全面地给出了南海北部边缘的地壳结构信息(测线位置参见图1中的ESP-E、ESP-W,其中ESP-C与OBS93测线基本重合,不再单独标出)。总体而言,地壳层状结构明显,莫霍面埋深在陆架区约为30 km,向海盆方向逐渐变浅至11 km;上地壳较薄,最薄处仅为1~2 km,但下地壳底部普遍存在厚度不一的高速

层<sup>[15]</sup>。西沙海槽地壳结构研究表明,沉积盖层厚度为1~4 km且表现为中间厚、两侧薄的特征,其内广泛发育半地堑、地垒构造;地壳结构大体呈对称分布,海槽中部莫霍面埋深最浅达15 km左右,向两侧逐渐增大到25 km左右,但下地壳没有发现高速层的存在,剖面位置为图1中OBH测线<sup>[16]</sup>。沿珠江口盆地中部海区的海底地震仪观测表明,沿测线(图1中OBS93所示)地壳厚度从陆架的22 km渐薄至海盆区的8 km左右,在上陆坡沉积盖层厚度达5 km,上地壳厚度为8~10 km;但下地壳底部存在约4 km厚的高速层<sup>[17]</sup>。值得指出的是,目前对南海北部边缘下地壳高速层的展布范围和成因仍不清楚。总体而言,高速层在陆缘东部比较普遍,而中部和西部零星出现<sup>[18]</sup>。目前,南海北部下地壳高速层的成因机制基本认为是伴随着上地幔部分熔融的岩浆底侵作用<sup>[12,17]</sup>。阎贫等<sup>[13,17]</sup>指出华南陆缘晚白垩世开裂期间缺乏大规模岩浆活动,且海底扩张期间也只是有少量的岩浆活动;此外,南海北部陆缘缺乏海倾反射层结构(Seaward Dipping Reflector Sequences-SDRS)这一典型的火山型边缘的标志,从而认为南海北部陆缘属于非火山型大陆边缘,且造成下地壳高速层的岩浆底侵活动发生在海底扩张停止之后。然而,根据目前的资料,也有学者认为南海北部陆缘更可能代表了一种介于火山型和非火山型边缘之间的过渡类型<sup>[12,19]</sup>。

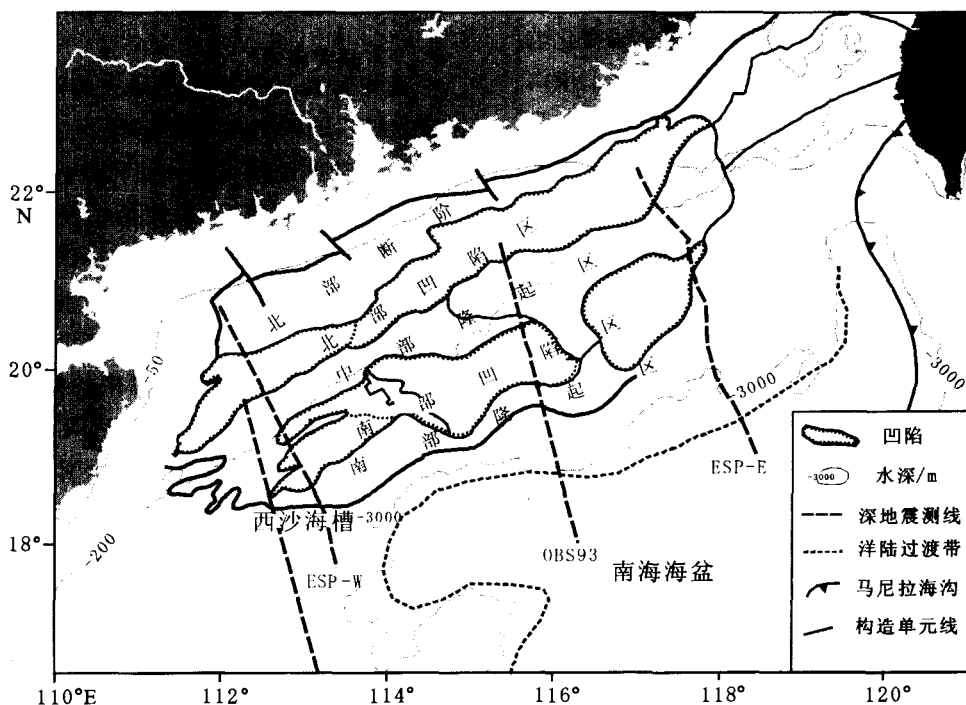


图1 南海北部构造单元和地震测线示意图(据文献[12]修改)

Fig.1 Sketch showing the tectonic units and seismic sounding profiles in the northern South China Sea (modified from reference[12])

## 2 南海北部岩石圈热-流变学结构

### 2.1 现代地温场特征

盆地的现代地温场研究主要包括大地热流流量、岩石热物性参数的测试与分析、地温梯度和深部温度的展布特征等内容。随着中美、中日合作在南海地区开展综合地球物理研究,相继获得了大量的地热资料,推动了该区的现代地温场特征研究。

He等<sup>[20]</sup>统计了南海地区589个实测大地热流数据,包括225个探针热流数据和364个钻孔热流数据。其中72%的探针插入海底沉积物的深度在3.5 m以上,热流数据可靠。66%的钻孔热流数据都是来自井底温度,静井时间不一。总体而言,南海地区的热流数据分布极为不均,大多集中在南、北两侧的陆缘地带,其次是东、西边缘和中央海盆区。热流分布范围为8~191 mW/m<sup>2</sup>,其中40%左右集中于60~80 mW/m<sup>2</sup>,平均热流为77 mW/m<sup>2</sup>,高于中国大陆地区的平均热流(61 mW/m<sup>2</sup>)<sup>[21]</sup>。其中,珠江口盆地的大地热流分布为54~85 mW/m<sup>2</sup>,平均为68 mW/m<sup>2</sup>;北部湾盆地的大地热流为48~79 mW/m<sup>2</sup>,平均为61 mW/m<sup>2</sup>;莺-琼盆地因泥底辟和热液活动强烈,热流相对较高,平均为78.7 mW/m<sup>2</sup>。总体而言,南海北缘热流数据分布较为集中且均值为75 mW/m<sup>2</sup>左右,略高于东南沿海地区的大地热流(65~70 mW/m<sup>2</sup>)<sup>[21]</sup>。从陆缘向着海盆方向热流逐渐增加,中央海盆热流最高(平均为87.7 mW/m<sup>2</sup>),它包括两个高热流中心:东部次海盆和西南次海盆,可能与海底扩张作用有关;南海东缘的热流最低(49 mW/m<sup>2</sup>),它位于马尼拉海沟附近,显然与俯冲板片的插入有关。此外,南海地区热流分布特征可能与新生代以来多期拉张有关,特别是中新世以来的伸展拉张作用,但拉张程度的不均一性是控制现今热流分布的主要因素。

Shi等<sup>[22]</sup>分析了南海地区的592个大地热流数据,其中226个为探针热流数据,366个为钻孔数据。其中78%的热流为50~100 mW/m<sup>2</sup>。研究表明南海北缘的北部湾盆地的大地热流为46~80 mW/m<sup>2</sup>,平均为61 mW/m<sup>2</sup>,略低于雷州半岛的平均热流(65 mW/m<sup>2</sup>),且地温梯度为37 °C/km;珠江口盆地的大地热流为54~85 mW/m<sup>2</sup>,平均为68 mW/m<sup>2</sup>,地温梯度为25.8~60.8 °C/km。北部凹陷区的平均大地热流为65 mW/m<sup>2</sup>,中部隆起区的平均大地热流为70 mW/m<sup>2</sup>,南部凹陷区则为75

mW/m<sup>2</sup>。局部地区(如东沙隆起、白云凹陷等)的高热流可能与新生代,特别是中中新世以来的基性岩浆活动或者断裂带内的热液循环等过程有关。西沙海槽的平均大地热流为79 mW/m<sup>2</sup>;琼东南盆地的地温梯度为35~54 °C/km,考虑到相似的构造属性,推测其热流与西沙海槽基本一致。南海北部陆坡区的大地热流分布各具特色:东段为67~91 mW/m<sup>2</sup>,平均为78 mW/m<sup>2</sup>;中部则为61~96 mW/m<sup>2</sup>,平均为73 mW/m<sup>2</sup>;西部则为44~121 mW/m<sup>2</sup>,平均为95 mW/m<sup>2</sup>。陆坡区这一高热流特征在以往南海地区热流研究中未曾被发现,可能与该区已被地震活动揭示的断裂带活动有关<sup>[22]</sup>。简言之,南海北缘的热流从陆架区的61 mW/m<sup>2</sup>向着海盆方向增加到陆坡区的73~80 mW/m<sup>2</sup>,沿NW至SE方向,西沙—中沙区的热流从70 mW/m<sup>2</sup>增加到85 mW/m<sup>2</sup>左右。

张健等<sup>[23]</sup>利用沿中美合作双船地震ESP中点位置和中日合作海底折射地震剖面的实测大地热流数据和地壳结构资料,通过地热学方法计算了南海北部深部不同界面的温度和热流结构。他们的结果表明靠近大陆边缘一侧的实测大地热流为57~59 mW/m<sup>2</sup>,而靠近南部海盆一侧约为83~89 mW/m<sup>2</sup>。沿北部陆缘向南部中央海盆方向,大地热流逐渐增高,但地壳热流贡献越来越小。海盆一侧的地幔热流约为68~71 mW/m<sup>2</sup>,所占大地热流比例超过65%。莫霍面温度基本在600 °C左右波动,最高达726 °C。该区热流背景高,以幔源热流为主,说明该区高的地热背景与深部软流圈物质上涌有关。

总体而言,南海北部地区大地热流相对较高,平均为75 mW/m<sup>2</sup>,其中大部分来自地幔热流的贡献。莫霍面温度亦较高。从陆架向着海盆方向,地温越来越高。这种高的背景热流来自于拉张动力学条件下深部热物质的上涌。

### 2.2 岩石圈热-流变学结构

近20年来,南海地区开展了大量的地质、地球物理研究,尤其是中美、中德、中日联合地球物理调查及“中国边缘海形成演化及重大资源的关键问题”等“973”项目的开展实施,为研究区开展岩石圈结构及热-流变学方面的研究提供了基础。

张健等<sup>[24]</sup>分析了南海北部陆缘带岩石圈热结构和流变学特征,发现上地壳比下地壳温度低150~300 °C,而黏滞系数却比下地壳高2~3个数量级,表现为上地壳为脆性层而下地壳为韧性层,岩石圈内的分层变形及扩张陆缘的差异性断块运动形成

了目前的陆缘地槽系构造地貌特征。施小斌等<sup>[25]</sup>通过对南海北部陆缘3条深部地震剖面岩石圈热结构的计算得出,大陆架区“热”岩石圈厚度约为90 km,向陆坡方向渐薄,于洋壳和海槽区为60 km左右;壳内脆-韧性转换深度约为16~20 km,其中海槽区浅而陆架及上陆坡区略厚;岩石圈存在分层现象,中、下地壳在拉张前也可能存在韧性层。Shi等<sup>[26]</sup>对西沙海槽岩石圈热-流变结构进行了分析,表明西沙海槽莫霍面处的幔源热流为46~60 mW/m<sup>2</sup>,海槽中央的“热”岩石圈厚度为46 km左右,而北缘陆坡区为75 km左右;此外,海槽中央区的上地壳脆性层最薄但上地幔脆性层最厚,表明西沙海槽因热松弛作用表现为流变硬化效应。莺歌海盆地构造热演化模拟研究表明新生代期间基底热流为50~70 mW/m<sup>2</sup>,随着三次拉张作用逐步增温,5.2 Ma左右到达盆地的最高地温,目前处于热流下降期<sup>[20,27]</sup>。Clift等<sup>[28]</sup>利用悬臂梁模型重塑盆地的几何形态并和地震剖面资料对比,提出了南海裂解期间存在柔弱地壳( $T_e$ 不超过5 km);且下地壳为流展变形,其有效黏度为 $10^{18} \sim 10^{19}$  Pa·s,并认为在海底扩张期间或之前就有大陆边缘的下地壳物质流向大洋地壳。南海西部的地壳黏度要高于东部,特别是海南岛可能代表了一个相对刚性的块体,表明该区地壳流变学存在横向非均质性,甚至提出南海地区可能是青藏东缘柔性下地壳流在海域的延伸的观点。

南海地区,特别是南海北部陆缘的现今岩石圈流变学研究较多,揭示出该区岩石圈具有温度高、强度低和厚度小等特征。对南海地区大陆开裂及海底扩张期间岩石圈流变学特征也开始了相关研究,并表明这一期间岩石圈也极为柔弱,且下地壳为流动变形。从大陆岩石圈开裂、海底扩张到目前南海的成型这一过程中,岩石圈的热-流变学特征如何变化?岩石圈热-流变学如何作用并影响南海的扩张变形?这些问题均是今后需要进一步研究的课题。

### 3 南海成因机制及伸展盆地成因模拟

#### 3.1 南海成因机制

南海形成演化的动力学过程和机制一直都是南海研究的热点和难点问题,虽取得不少进展,但仍存争议。较为代表性的观点有Tapponnier<sup>[29]</sup>的渐进挤出模式,即印度-欧亚大陆碰撞和其后持续的挤入,造成印支地块向SE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。但随后的研究表明这一模式与南海地区的构造特征、演化历史等诸多事实不合<sup>[5,30]</sup>。亦有学者认为深部地幔柱引起的主动裂谷<sup>[31]</sup>或者地幔物质的侧向流动引发了南海的扩张<sup>[32-33]</sup>。Liu等<sup>[34]</sup>通过数值模拟认为因印度-欧亚大陆碰撞而致的软流圈物质横向挤出构造对中国东部的新生代裂谷和火山作用及南海的打开均有重要的影响,从而为地幔物质横向流动对南海形成演化的可能提供了概念模型并验证了物理上的可能性。Zhou等<sup>[35]</sup>通过大量的地震测线资料对南北大陆边缘新生代伸展构造的研究,认为简单剪切模型比较符合地质观测事实,并提出了南海新生代构造演化的三阶段模式,即晚白垩世—早始新世期间西太平洋板块俯冲导致的伸展、中始新世—早中新世期间印度板块的向北漂移和挤入引发的拉张和中中新世—第四纪期间印度洋和澳洲板块向北俯冲伴随的拉张伸展作用。姚伯初<sup>[4]</sup>通过研究南北共轭边缘的地壳结构和沉积剖面特征,根据上地壳脆性、下地壳韧性和上地幔脆性的流变学特性提出了岩石圈的分层剪切变形模式。吴世敏等<sup>[3]</sup>通过对南海南北边缘地震剖面的对比,提出南海大陆边缘经历了晚白垩世—早始新世的简单剪切和中始新世—渐新世/早中新世的纯剪切伸展作用,并分别给出了相应的地球动力学背景。Nissen等<sup>[36]</sup>利用重力、热流和地震测深等观测资料作为约束,讨论了南海北部地壳拉张机制,提出纯剪模型在解释南海大尺度的裂谷作用上可能要优于简单剪切模型,而这两个端元模型的联合作用可能会更好地解释地壳内部的伸展变形。Hayes等<sup>[37]</sup>最近重新审视了南海南北共轭边缘的大陆裂谷作用、地壳伸展和随后的海底扩张等相关演化动力学过程及其意义。他们指出南海共轭边缘的陆壳伸展作用的程度和持续时间在沿边缘走向上存在差异;虽然西、中和东部三条地震测线揭示的总地壳伸展量基本一致,约为1100 km,但西部边缘的陆壳伸展量大于中部和东部地区,暗示中、东部地区陆壳伸展结束后并进入海底扩张和洋壳生成时,西部地区的陆壳伸展作用仍在持续,且滞后约6~12 Ma。引起东西部裂谷宽度(拉张程度)差异的最可能原因是东西部地区裂前地壳的流变学和热结构存在差异。这一最新认识也说明了岩石圈的流变学和热结构是控制裂谷作用的关键因素。

#### 3.2 伸展盆地成因模拟

通过以上相关研究推动和丰富了对南海形成演

化的认识,但均限于定性的讨论,而要全面了解南海地区岩石圈拉张裂解的动力学过程则需要定量和动态的数值模拟研究。岩石圈拉张变形过程的数值模拟近30年来取得了长足进展,从岩石圈流变学性质而言,目前的伸展盆地成因模拟可以分为运动学模型、运动学-流变学模型和动力学模型<sup>[38]</sup>。运动学模型以McKenzie<sup>[39]</sup>提出的一维瞬时纯剪拉张模型和Wernicke<sup>[40]</sup>提出的简单剪切模型为两个端元模型。上述运动学模型都假定岩石圈为Airy局部均衡补偿,垂向上不受剪应力作用,即垂向上 $T_e$ 为0;而横向上岩石圈强度无限大,从而阻止了水平应力梯度导致的变形作用。运动学-流变学模型,也被称为“后门流变模型”,考虑了岩石圈强度横向变化对盆地发育、变形模式的一级控制作用。模型中以盆地边缘未发生变形的大陆岩石圈为参考,把已变形的岩石圈强度与之对比。这一方法虽不能提供岩石圈变形的具体细节,但能为变形提供一个流变学制约。目前,这一方法被广泛应用,如Van Wees和Stephenson<sup>[41]</sup>研究了西班牙中部伊比利亚盆地的流变学演化及其对板内伸展和反转构造的动力学意义;Ziegler等<sup>[42]</sup>研究了与碰撞有关的板内挤压变形,指出岩石圈强度的时空变化控制了板内与碰撞有关的挤压变形的局部化,而热结构、地壳厚度、构造继承性和沉积物的负载及热屏蔽效应等因素起重要作用。动力学模型则通过明确引入流变学本构关系把运动学参数(应变、应变速率等)和动力学参数(应力)联系起来。采用的本构关系有黏性、弹性、黏弹性等,目前常用有黏弹性和黏弹塑性两种,一般多为二维模拟,采用有限元或有限差分等数值计算方法。Fernandez等<sup>[38]</sup>把二维动力学模型归入两类:平面应变和平面应力问题。平面应力模型目前多采用垂向平均的岩石圈流变学假定。上述研究表明,岩石圈流变学性质是建立拉张变形动力学模型的关键。

对南海地区陆壳拉张变形机制的研究目前还主要集中于运动学模型,以简单剪切和纯剪两个端元模型为主,并主要是这两个模型在不同地壳层次和演化阶段下的联合作用机制。虽然也有研究涉及该区岩石圈的流变学和热结构特性,但也主要集中在现今状态下的热-流变学结构。值得指出,Clift等<sup>[28]</sup>和Hayes等<sup>[37]</sup>的研究已开始关注裂前地壳的流变学和热结构对南海共轭边缘拉张变形的影响。Behn等<sup>[43]</sup>利用二维有限元连续力学拉张模型考察了地壳流变学和热结构对正断层发育的影响,表明地壳厚度、地温梯度及流变学等是主控因素。特别

是,如果伸展前地壳的厚度较小且下地壳不存在韧性层时,岩石圈表现为地幔主导下的拉张构造,裂谷的半宽度与地壳厚度无关,且主要由垂向地热梯度(热结构)来控制,半宽度也一般较大;相反,若裂前地壳厚度足够大,此时上地壳内的应力集中就比上地幔内应力要大,变形则表现为地壳主导型,此刻裂谷的半宽度则随着地壳厚度增加而减小,且主要由地壳的流变学和热结构来控制,半宽度也一般相对较小。

显然,岩石圈的流变学和热结构对岩石圈裂解和随后的拉张变形影响极大,在伸展盆地成因模型研究中需要考虑岩石圈热-流变学结构的演化及其对变形的制约,南海地区的伸展变形机制研究中已开始注意到这一问题,但需要进一步的工作。这是未来南海拉张演化动力学机制研究中的关键问题。

## 4 讨论

目前南海地区的相关研究主要集中于岩石圈的现今地热特征和热力学状态,并已表明岩石圈流变学是检验南海成因模型的重要手段,但对南海形成演化中岩石圈的热-流变学结构随时间的演化过程没有涉及,从而不能完整地回答南海形成演化的细节。在今后这方面的研究中,还需要考虑下面的若干问题。

岩石圈热结构和流变学、地壳厚度等因素均对岩石圈裂解过程有重要影响,但其相对作用和贡献仍需要进一步研究。前已述及,在地壳厚度逐渐增厚的过程中,岩石圈张裂形成的裂谷半宽度逐渐减小,并从“地幔主导型”控制过渡到“地壳主导型”控制,其宽度也逐渐稳定。这一过程中发生过渡时的临界地壳厚度是多少?主要与哪些主控因素有关?地壳的流变学和热结构如何作用?这些问题都需要进一步研究。正如洋陆边缘项目指出的那样,今后研究南海地区岩石圈张裂过程中的热-流变学行为要对以下方面予以重视:大陆岩石圈的张裂机制(流变规律和低角度正断层的作用)、上地幔热力学过程和岩石圈张裂的相互作用、下地壳变形的规模、张裂期间热在岩石圈内部的转换方式、张力应变的时空分布等。

岩石圈拉张和随后的冷却过程中,岩石圈强度必然会发生变化。随着岩石圈拉张减薄和热物质上涌,岩石圈因受热增温,其强度明显降低;当拉张过程结束后,岩石圈因逐渐冷却而变硬。另一方面,随着岩石圈的减薄,地幔铁镁质物质进入地壳底部替

代部分长英质壳源物质,岩石圈强度因此也将变大。上述的热弱化和流变硬化的对抗效应控制了岩石圈的强度演化<sup>[44-46]</sup>。盆地的形成演化与构造应力场下岩石圈的变形行为密切相关,后者主要受控于岩石圈的流变学性质;岩石圈的流变学性质则主要与岩石圈结构、温度和物质组成等因素相关。因此,盆地形成过程中岩石圈热-流变结构随时间的变化是成盆的关键因素。此外,盆地形成过程中可容空间充填了沉积物。沉积盖层的存在必定对盆地岩石圈的热力学性质产生影响,一方面,沉积盖层具有一定的生热率,能贡献部分热量;另一方面,沉积盖层的热导率较低,形成一个相对的“绝热盖”,影响岩石圈热场的分布。今后研究中,应考虑沉积盖层的生热效应、充填作用和热屏蔽效应等影响,从而较为全面地重建盆地演化过程中相应的岩石圈热-流变结构,考察其对盆地演化的控制作用,从而提高对南海北部岩石圈性质的认识,为建立南海形成演化的动力学过程提供科学依据。

**致谢:**成文过程中多次就南海地质构造和演化与中科院南海海洋研究所孙珍博士进行有益的讨论。

#### 参考文献 (References)

- [1] Karig D E. Origin and development of marginal basins in the western Pacific[J]. *J. Geophys. Res.*, 1977, 76:2 542-2 561.
- [2] 高抒,李家彪. 中国边缘海的形成演化研究[C]//中国边缘海的形成演化. 北京:海洋出版社,2002:I-II. [GAO Shu, LI Jiabiao. Study on formation and evolution of Chinese marginal sea [C]//Formation and Evolution of Chinese Marginal Sea. Beijing: China Ocean Press, 2002: I-II.]
- [3] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea Basin[C]//Hayes D E. Tectonic and Geological Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. AGU Geophysical Monograph, 1983, 27:23-56.
- [4] 姚伯初. 大陆岩石圈在张裂和分离时的变形特征[C]//中国边缘海的形成演化. 北京:海洋出版社,2002: 1-13. [YAO Bochu. Deformation characteristics of break off and separation of continental lithosphere[C]//Formation and Evolution of Chinese Marginal Sea. Beijing: China Ocean Press, 2002:1-13.]
- [5] 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 Shi-min, YANG Tian, ZHOU Di, et al. Discussion on the extension model for the conjugate continental margin of South China Sea [J]. *Chinese Geological Journal of China universities*, 2005,11(1):105-110.]
- [6] 夏斌,崔学军,谢建华,等. 关于南海构造演化动力学机制的一点思考[J]. 大地构造与成矿学,2004,28(3):221-227. [XIA Bin, CUI Xue-jun, XIE Jian-hua, et al. Thinking about dynamics mechanism on formation and evolution of South China Sea[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2004,28(3):221-227.]
- [7] 许致远,杨巍然,曾佐勋,等. 南中国海成因:右行拉分作用与左行转换挤压作用交替[J]. 地学前缘,2004,11(3):193-206. [XU Jun-yuan, YANG Wei-ran, ZENG Zuo-xun, et al. Genesis of South China Sea: Intervening of dextral pull-apart and sinistral transpression[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004,11(3):193-206.]
- [8] 高抒. 美国《洋陆边缘科学计划 2004》评述[J]. 海洋地质与第四纪地质,2005,25(1):119-123. [GAO Shu. Comments on the “NSF margins program science plan 2004”[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2005,25(1):119-123.]
- [9] 宋海斌,吴能友,张健,等. 南海北部陆缘白垩纪中期大陆边缘体制转变探讨[C]//中国边缘海岩石圈结构与动力过程. 北京:海洋出版社,2003:142-149. [SONG Hai-bin, WU Neng-you, ZHANG Jian, et al. Discussion on tectonic regime transition of continental margin in northern South China Sea during Mid-Cretaceous[C]//Structure and Dynamic Process of Lithosphere in China Marginal Sea. Beijing: China Ocean Press, 2003: 142-149.]
- [10] 周新民,李武显. 中国东南部晚中生代火成岩成因:岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式[J]. 自然科学进展,2000,10(3):240-247. [ZHOU Xin-min, LI Wu-xian, Origins of late Mesozoic igneous rocks in the southeast of China: model of combination between lithosphere subduction and basalt bottom invasion[J]. *Progress in Natural Science*, 2000,10(3): 240-247.]
- [11] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Sea Basins[C]//Hayes D E, ed. The Tectonic and Geological Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. AGU Geophysical Monograph, 1980, 23: 89-104.
- [12] SHI Xiao-bin, Burov E, Leroy S, et al. Intrusion and its implication for subsidence: A case from Baiyun sag, on the northern margin of the South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2005, 407: 117-134.
- [13] 阎贫,刘海龄. 南海北部陆缘地壳结构探测结果分析[J]. 热带海洋学报,2002,21(2): 1-12. [YAN Pin, LIU Hai-ling. Analysis on deep crust sounding results in northern margin of South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2002, 21(2):1-12.]
- [14] 丘学林,施小斌,阎贫,等. 南海北部地壳结构的深地震探测和研究新进展[J]. 自然科学进展,2003,13(3):231-236. [QIU Xue-lin, SHI Xiao-bin, YAN Pin, et al. New progresses in study and sounding seismic exploration on crustal structure in northern South China Sea[J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(3):231-236.]
- [15] 夏骥原. 南海地球物理场与地壳结构研究历史与新进展[C]//南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京:科学出版社,1997: 1-5. [XIA Kan-yuan. History and new progresses of studying on crustal structure and geophysical fields in South China Sea[C]//Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea. Beijing: Science Press, 1997:1-5.]

- [16] Qiu X L, Ye S Y, Wu S M. Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2001, 341: 179-193.
- [17] Yan P, Zhou D, Liu Z. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2001, 338: 1-21.
- [18] 姚伯初. 南海北部陆缘的地壳结构及构造意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1998, 18(2): 1-16. [YAO Bo-chu. Crust structure of the northern margin of the South China Sea and its tectonic significance[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1998, 18(2): 1-16.]
- [19] 何将启,周祖翼,李家彪,等. 南海北部大陆边缘构造研究: 现状及展望[C]//中国边缘海的形成演化. 北京:海洋出版社, 2002: 65-73. [HE Jiang-qi, ZHOU Zu-yi, LI Jia-biao, et al. Study on tectonics of the northern margin of the South China Sea: Status and perspective[C]//Formation and Evolution of Chinese Marginal Sea. Beijing: China Ocean Press, 2002: 65-73.]
- [20] HE Li-juan, WANG Ke-lin, XIONG Liang-ping, et al. Heat flow and thermal history of the South China Sea[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 126(3-4): 211-220.
- [21] Hu S, He L, Wang J. Heat flow in the continental area of China: a new data set[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179: 407-419.
- [22] SHI Xiao-bin, QIU Xue-lin, XIA Kan-yuan, et al. Characteristics of surface heat flow in the South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 22: 265-277.
- [23] 张健,汪集旻. 南海北部大陆边缘深部地热特征[J]. *科学通报*, 2000, 45(10): 1095-1100. [ZHANG Jian, WANG Ji-yang. Deep geothermal characteristics of continental margin of the northern South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(10): 1095-1100.]
- [24] 张健,汪集旻. 南海北部陆缘带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 Ji-yang. Deep geodynamic characteristics of tectonic spreading in continental margin of the northern South China Sea[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 30(6): 561-567.]
- [25] 施小斌,周蒂,张毅祥,等. 南海北部陆缘岩石圈热-流变结构[J]. *科学通报*, 2000, 45(15): 1660-1665. [SHI Xiao-bin, ZHOU Di, ZHANG Yi-xiang, et al. Lithospheric thermal-rheological structure of the continental margin in the northern South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(15): 1660-1665.]
- [26] Shi X B, Zhou D, Zhang Y X, et al. Thermal and rheological structure of Xisha Trough, South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2002, 351(4): 285-300.
- [27] 何丽娟,熊亮萍,汪集旻,等. 莺歌海盆地构造热演化模拟研究[J]. *中国科学 D 辑*, 2000, 30(4): 415-419. [HE Li-juan, XIONG Liang-ping, WANG Ji-yang, et al. Studying on tecton-thermal evolution modeling of Yinggehai basin[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 30(4): 415-419.]
- [28] Clift P, Lin J, Barckhausen U. Evidence of low flexural rigidity and low viscosity lower continental crust during continental break-up in the South China Sea[J]. *Marine Petrol. Geol.*, 2002, 19: 951-970.
- [29] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagation extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 1982, 10: 611-616.
- [30] 龚再升,李思田. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究[M]. 北京:科学出版社, 2004: 20-23. [GONG Zai-sheng, LI Si-tian, et al. Dynamic research on oil and gas accumulation in northern continental marginal basin of northern South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2004: 20-23.]
- [31] WANG Chi-yun. Some problems in understanding basin evolution[J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(3-4): 29-44.
- [32] 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 Zai-sheng, LI Si-tian. Basin analysis and oil & gas accumulation in the northern continental margin of South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1997.]
- [33] Flower M F J, Tamaki K, Hoang N. Mantle extrusion: a model for dispersed volcanism and DUPAL-like asthenosphere in East Asia and the western Pacific[C]//Flower M F J, Chun S L, Lo C H. Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. AGU Geodynamics, 1998, 27: 67-88.
- [34] Liu M, Cui X J, Liu F T. Cenozoic rifting and volcanism in east China: a mantle dynamic link to the Indo-Asia collision? [J]. *Tectonophysics*, 2004, 393(1-4): 29-42.
- [35] 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.
- [36] Nissen S S, Hayes D E, Yao B, et al. Gravity, heat flow and seismic constraints on the processes of crustal extension: northern margin of the South China Sea[J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100(B11): 22447-22483.
- [37] Hayes D E, Nissen S S. The South China Sea margins: implications for rifting contrasts[J]. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 2005, 237: 601-616.
- [38] Fernandez M, Ranallo G. The role of rheology in extensional basin formation modeling[J]. *Tectonophysics*, 1997, 282: 129-145.
- [39] McKenzie D P. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 1978, 40: 25-32.
- [40] Wernicke B. Uniform-sense normal simple shear of the continental lithosphere[J]. *Can. J. Earth Sci.*, 1985, 22: 108-125.
- [41] Van Wees J D, Stephenson R A. Quantitative modeling of basin and rheological evolution of the Iberian Basin (Central Spain): implications for lithospheric dynamics of intraplate extension and inversion[J]. *Tectonophysics*, 1995, 252: 163-178.
- [42] Ziegler P A, Van Wees J D, Cloetingh S. Mechanical con-

- trols on collision-related compressional intraplate deformation [J]. *Tectonophysics*, 1998, 300: 103-129.
- [43] Behn M D, Lin J, Zuber M T. A continuum mechanics model for normal faulting using a strain-rate softening rheology; implications for thermal and rheological controls on continental and oceanic rifting[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 2002, 202: 725-740.
- [44] England P. Constraints on extension of continental lithosphere[J]. *J. Geophys. Res.*, 1983, 88: 1 145-1 152.
- [45] Liu M, Furlong K P. Intrusion and underplating of mafic magmas; thermal-rheological effects and implications for Tertiary tectono-magmatism in the North American Cordillera [J]. *Tectonophysics*, 1994, 237: 175-187.
- [46] Vauchez A, Tommasi A, Barruol G. Rheological heterogeneity, mechanical anisotropy and deformation of the continental lithosphere[J]. *Tectonophysics*, 1998, 291(1-2): 61-86.

## RECENT ADVANCES IN STUDIES ON THE FORMATION MECHANISM OF THE SOUTH CHINA SEA AND THERMO-RHEOLOGICAL STRUCTURE OF LITHOSPHERE IN ITS NORTHERN MARGIN: AN OVERVIEW

LIU Shao-wen<sup>1,2</sup>, SHI Xiao-bin<sup>2</sup>, WANG Liang-shu<sup>3</sup>, GAO Shu<sup>1</sup>, HU Xu-zhi<sup>3</sup>, FENG Chang-ge<sup>3</sup>

(1 School of Geography and Ocean Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2 CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China;

3 Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** The South China Sea is one of the largest marginal seas in the western Pacific region, with its northern margin being characterized by a passive continental margin. An understanding of the geodynamic process of the formation and evolution of this marginal sea system is vital for a solution of the related scientific issues of the geology, resource and environment in this region. Here we synthesize the recent advances in researches about thermal state and rheology of lithosphere in the northern South China Sea and its formation mechanism, along with numerical modeling of extensional basin formation. Generally, heat flow of the northern margin of the South China Sea is relatively high, with an average of 75 mW/m<sup>2</sup>, and is mostly derived from mantle contribution. Temperature at Moho depth is really high, and the deep geotemperature increases gradually towards the oceanic basin. The lithosphere beneath this area is associated with high temperature, low strength and intensive rheological stratification, and the lower crust is characterized by ductile flow deformation. Numerical simulation on extensional basin formation is now transitted from kinematics to dynamic modeling, focusing on the influence of the lithosphere rheology. Controversies still exist with regard to the formation mechanism of the South China Sea; the thermo-rheological evolution of the lithosphere during continental break-up is a key factor controlling the formation and evolution of the South China Sea. In the future, further studies on the dynamic evolution patterns of the thermo-rheological structure of the lithosphere are required, which is important to a better understanding of the formation of the South China Sea.

**Key words:** lithospheric thermo-rheological structure; geodynamics; northern South China Sea