

华南和南海北部陆缘岩石圈速度结构 特征与沉积盆地成因

方念乔¹, 姚伯初², 万 玲², 张振国¹, 李慧勇¹

1. 中国地质大学海洋学院, 北京 100083

2. 广州海洋地质调查局, 广东广州 510075

摘要: 新近地震层析资料表明, 华南和南海北部陆缘岩石圈及下伏的软流层中存在规模宏大的低速异常带, 它们在研究区新生代演化历史中曾发挥重要的控制作用. 其中, 岩石圈底面及内部的巨型 NW 向异常低速带表明中生代末至新生代早期的神狐运动不仅在华南与南海北部陆缘产生 NE 向张裂构造体系并催生出内陆—陆架—陆坡沉积盆地, 还导致南海海盆的早期扩张. 软流层 NNW 向的异常低速带则反映岩石圈 SSE 向的蠕动直接导致南海中央海盆的海底扩张及陆缘地区的持续裂解. 研究区深部速度结构特征是历史动力过程所残留的痕迹, 华南陆缘和南海北部新生代沉积盆地的形成和发展, 与岩石圈及软流层的结构和运动方式密切相关.

关键词: 大陆边缘; 岩石圈; 速度结构; 异常低速带; 南海.

中图分类号: P736.22

文章编号: 1000-2383(2007)02-0147-08

收稿日期: 2007-02-08

The Velocity Structure of the Lithosphere and the Origin of Sedimentary Basins in the South China and Northern Margin of the South China Sea

FANG Nian qiao¹, YAO Bo chu², WAN Ling², ZHANG Zhen guo¹, LI Hui yong¹

1. Faculty of Marine Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Bureau of Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

Abstract: According to the new CT data, in the paper we show some great abnormal low velocity zones occurring in the lithosphere and upper asthenosphere in the South China and northern margin of the South China Sea (SCS), which played a key role in the Cenozoic evolutionary history. Among them, the zones running NW-SE and existing at the interior and bottom of the lithosphere may result not only in forming a cluster of extensional structures and Cenozoic sedimentary basins in the continental margin of the South China but also in earlier spreading the floor of the SCS, while the deeper NNW zone at the upper asthenosphere mirrors the creep of the lithosphere to SSE that caused directly sea floor spreading of the central basin of the SCS and the persistent split of the marginal region. The characteristics of the velocity structure are the traces left over by historical deep process in the study area. It is likely that the development of the Cenozoic basins in the South China and northern margin of the SCS results from the structure and movement pattern of lithosphere and asthenosphere.

Key words: continental margin; lithosphere; velocity structure; abnormal low velocity zone; the South China Sea.

大陆边缘是洋陆转换和相互作用的枢纽地带. 大陆岩石圈的裂解与边缘盆地乃至宽阔洋盆的形成是当代地学界密切关注的科学前沿问题 (Detrick *et al.*, 1996; Lewis *et al.*, 2001; IODP, 2001;

MARGINS Program, 2004). 中国东南大陆边缘系一中、新生代极为活跃的构造区. 中生代末期, 华南陆缘性质发生重大转折, 并可能在始新世前后完全转化为大西洋式被动陆缘, 南海即是在被动陆缘背

景上张开的小型“大西洋”(姚伯初, 1998; 李家彪, 2005)。事实上, 关于南海的形成机制和演化过程, 还存在多种认识以及很大的研究空间。根据新近获得的地壳测深所反映的岩石圈结构资料, 可以观察到一个重要现象: 在南海及其周边水域, 从莺歌海向 SE 方向经苏禄海到苏拉威西海, 厚度为 60~80 km 的岩石圈速度普遍较低, 底部与软流圈的界面附近仅 8.0 km/s; 与之相仿的是岩石圈内部同样出现一条宽约 200 km 的 NW SE 向、速度为 7.2~7.6 km/s 的低速带; 岩石圈之下的软流层, 其厚度大于 200 km, 速度仅有 7.6~7.9 km/s, 在 100 km 深度上, 呈 NNW 向展布。华南陆缘特别是南海地区不同圈层异常低速带的存在和展布方向可能是研究区上地幔动力学过程的观察窗。

大陆边缘构造问题, 说到底, 其运动和动力机制的控制来自地球深部。上文介绍的速度异常现象, 严格说来, 还是产生在经典的板块构造学说所主张的岩石圈及软流圈物质、物相、热力、弹塑性等的差异与运动的范围之内。当前, 地震层析成像技术发展迅速, 对于了解地球内部结构提供了有效途径(程日辉等, 1995)。应用天然地震面波层析成像三维速度结构模型, 可以对陆海域岩石圈/软流圈结构、过渡带乃至下地幔与核幔边界速度的三维分布进行描述分析。朱介寿等(2003)、姚伯初等(2005, 2006)和蔡学林等(2005)根据国内外最新地球物理资料和其他地学资料综合反演, 建立了中国东部地区和边缘海域的高分辨率地球三维结构模型, 有力地推动了南海与邻区的浅表层构造演化、岩石圈/软流圈活动特征和深部动力学过程研究。本文沿循这一途径, 通过综合分析地壳测深所得结构资料, 将天然地震资料进行层析成像计算, 采用频散及波形拟合反演方法, 对中国东南大陆及南海海域的地壳与上地幔进行三维面波层析成像研究, 专门探讨中国东部新生代沉积盆地及边缘海的形成与东亚边缘上地幔异常低速带间的相关性。

1 资料和方法

1.1 资料来源

利用分布于欧亚大陆及西太平洋地区 58 个宽频带数字地震台站所记录的发生于西太平洋海区 361 次地震和陆区 161 次地震约 8 000 个长周期波形记录, 挑选出 4 100 条大圆传播路径, 采用频散及

波形拟合反演方法, 对中国东南大陆边缘海地区的地壳与上地幔进行三维面波层析成像研究。这些地震的源地在陆区分布于中国中西部和中亚地区, 海区则主要分布于西太平洋贝尼奥夫带。

1.2 计算过程

地震层析计算由成都理工大学完成。计算方法如下(姚伯初等, 2005): (1) 剔除资料中的非测深点(即未达莫霍面的测点)。(2) 从自然地表面出发, 对测点深度数据进行大地水准面高程校正。(3) 以人工地震测深剖面为重点采集地壳基本数据。数据采集时参考重力反演数据和地震面波频散反演数据, 以及其他地球物理数据; 在人工地震测深剖面中以速度分布的特征点进行 V_p 速度数据采集。(4) 按照 $1^\circ \times 1^\circ$ 地壳基本数据编制步骤与方法, 建立地壳三维速度结构模型。其中, 须将研究区域 $1^\circ \times 1^\circ$ 的网格结点分为基准点和普通点两大类, 基准点的地壳基本数据由邻近的人工地震测深剖面确定; 普通点的数据则由参考基准点、重力反演、地震层析成像确定。(5) 用类似于地壳中的三维速度数据的形成方法, 对地幔顶部的 P_n 速度进行采样, 用 Kriging 方法进行二维平面插值得到 $1^\circ \times 1^\circ$ 各网格结点处的 P_n 速度值。(6) 利用已知地壳结构作为约束条件, 对南海及周边地区的地壳和上地幔进行三维层析成像。计算时首先得出面波速度结构, 再用常规公式转换为纵波速度并得到纵波速度结构。

1.3 资料解释

根据固体地球科学理论, 上地幔低速带主要反映物质的部分熔融状态及相关的温度分布状态。低速带常对应于高温区, 当物质部分熔融时, 就会产生塑性流变, 并导致岩石圈发生位移或形变。东亚及西太平洋边缘海上地幔的巨型低速带反映该区上地幔存在部分熔融, 在区域应力场作用下, 可以发生区域流动, 从而带动上覆岩石圈的运动。这里还有一个固体地球科学理论问题, 就是温度分布异常的热传导速率问题。在稳定状态下, 地幔内热传导的速率极慢, 平均速率仅为 1.25 cm/a, 即 10 Ma 可传播 125 km。从今日在地表观测的热流分布看, 中国东南大陆边缘至边缘海的热流值在 50~84 mW/m² 之间, 部分地区(如冲绳海槽)更高, 属高热流值区; 莫霍面温度在 550~600 °C 之间, 为高莫霍温度区; 热岩石圈厚度在 50~110 km 之间, 属薄热岩石圈区。今日中国大陆边缘(包括边缘海)岩石圈的表层热流值, 反映的是 10 Ma 左右上地幔的热源状态,

10 Ma 之前的状况需要从区域地质构造来推测。

2 讨论

2.1 南海及邻区的形貌与构造特征

南海是西太平洋边缘海中最大海盆之一, 面积约 300 万 km^2 (鲍才旺, 1987)。它具有独特的发育模式, 既不是菲律宾海、日本海一类的弧后盆地, 也不是白令海一类的被岛弧圈捕的洋盆边缘, 而是像大西洋那样通过大陆破裂、海底扩张而生成的边缘海盆。在宽阔的南海北部大陆架及向深水区延伸的大陆坡上, 分布着珠江口盆地、台湾海峡盆地、台西南盆地、北部湾盆地、莺歌海盆地、琼东南盆地等新生代盆地(冯志强和缪宛岑, 1988)。向北深入华南陆块, 又有时代相近的衡阳盆地、茂名盆地、三水盆地、南雄盆地等(图 1)。根据现有资料, 上述盆地在新生代无论是新生成或属于继承性, 均在构造、层序、岩石地球化学等方面表现出明显的张性特征, 构成海陆记录吻合甚好的大规模区域拉张体系。以珠江口盆地为例, 它位于华南陆块与南海的结合部, 地质上属华南地块, 它叠置于南海北部陆架与陆坡之上, 总面积 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$, 新生代沉积超过 10 km。它的断裂构造十分发育, 多为张性正断层, 发育走向主要分为 NE、NWW 及 NEE 向 3 组。再如台西南盆地, 位于南海北部陆架东缘, 盆地呈 NE 走向, 面积 $4 \times$

10^4 km^2 , 其东部已进入台湾岛。盆地水深 50 ~ 3000 m, 新生代沉积厚 2 ~ 10 km。断裂以 NE 向为主, NWW 向次之。盆地的构造发育史和珠江口盆地基本相似, 从中生代末的神狐运动开始发育, 但吕宋弧与亚洲大陆上新世发生碰撞, 形成台湾造山带, 台西南盆地东部岩石圈向下弯曲, 沉积了巨厚的上新统及第四系。因此, 该盆地总体上虽然也是被动陆缘上的张裂盆地, 但盆地东部从上新世开始具有前陆盆地性质, 故我们应将其称之为复合型盆地。南海北部西缘的莺歌海盆地和琼东南盆地位于海南岛周围, 目前是中国海域的主要产气区。两盆地的面积达 $16.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 新生代沉积厚 17 km。它们地理位置相连, 但构造类型不同, 因受哀牢山-红河-莺歌海断裂的控制, 前者除拉张性质外还叠加有走滑特征, 确切的名称是走滑拉张盆地; 后者应力场较为单纯, 与珠江口盆地一样, 属于简单的拉张盆地。

南海主体部分的水深在 3000 ~ 4400 m 间。依据海底地形地貌特征, 可分为西北海盆、中央海盆和西南海盆等 3 个次海盆: 西北海盆位于中沙群岛以北、西沙海槽之东, 水深 3000 ~ 3800 m。海底自西向东倾斜, NE 走向的双峰海山分布其中。洋壳厚度 5.0 ~ 5.8 km, 等厚线呈 NE 向展布, 上覆 1.5 ~ 2.0 km 厚的新生代沉积物。重力自由空间异常在 $-10 \times 10^{-5} \sim 10 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 之间, 呈 NE 至 NEE 向分布(李唐根, 1987)。地磁异常在剖面上呈正负相间的波浪状, NE 走向, 平面上表现为正负相隔的条带状, 异常幅度在 $-50 \sim 50 \text{ nT}$ 之间, 走向 NE(陈圣源, 1987)。中央海盆呈长方形, 南北长 900 km, 东西宽 450 km。海底分布着一系列 E W 走向的海山与海丘, 海水深度在 3000 ~ 3900 m 之间, 新生代沉积厚 0.5 ~ 2.4 km。重力自由空间异常稳定 ($10 \times 10^{-5} \sim 20 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$), E W 走向。地磁异常特征与西北海盆相似, 但走向为 E W 向。Taylor and Hayes(1980, 1983)在海盆鉴别出 E W 走向的 11 ~ 5 d 磁异常条带, 判断洋壳年代为 32 ~ 17 Ma。西南海盆水深在 4300 ~ 4400 m 之间, 是南海深海平原最低洼的地带, 新生代沉积厚 1 ~ 2 km。地磁异常与西北海盆相似, 且同为 NE 走向。在西南海盆中, 姚伯初和曾维军(1994)对比出 18 ~ 13 号磁异常条带, 其洋壳年龄为 42 ~ 35 Ma。南海北部海盆热流值较均匀, 平均 2.5 HFU (1 HFU = 41.86 mW/m^2); 而南部海盆的热流值比较散乱, 平均 2.8 HFU。



图 1 研究区沉积盆地分布

Fig. 1 Distribution of sedimentary basins in the study area

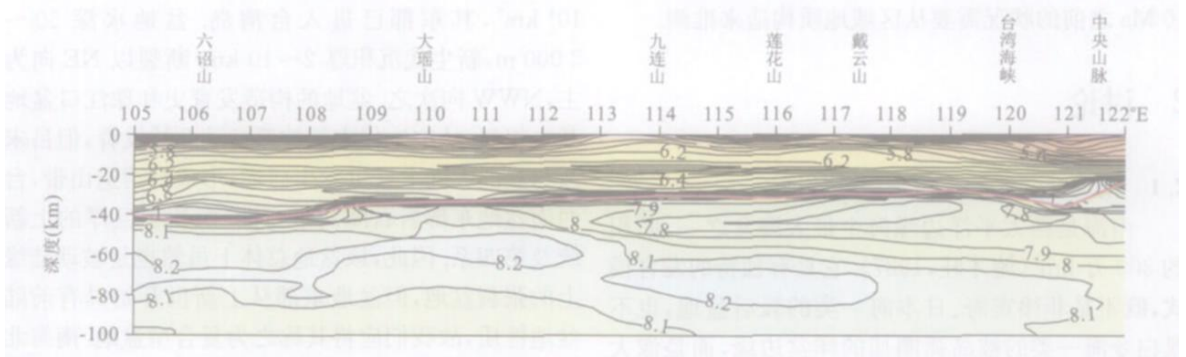


图 2 岩石圈地震层析剖面(24°N)

Fig. 2 CT section of the lithosphere along 24°N from 105°E to 122°E

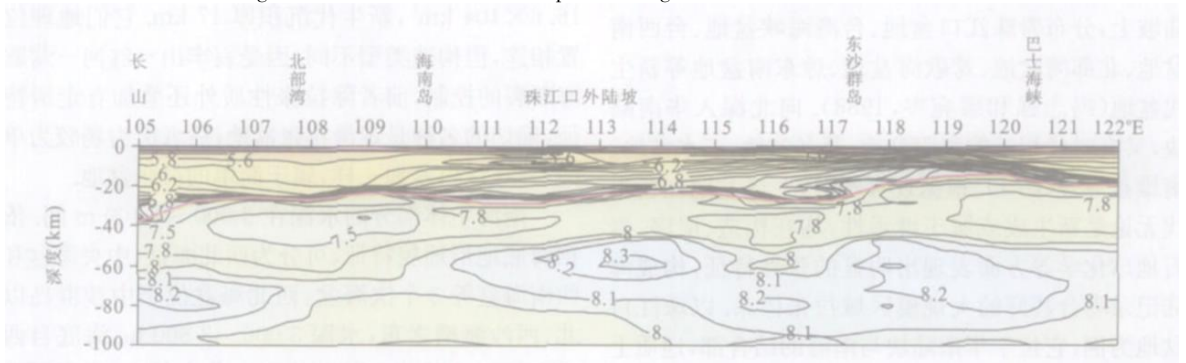


图 3 岩石圈地震层析剖面(20°N)

Fig. 3 CT section of the lithosphere along 20°N from 105°E to 122°E

2.2 南海及邻区 100 km 深度以内的纵波速度结构特征

图 2 为 100 km 深度内沿 24°N 的纵波速度结构剖面。该剖面东起台湾东部花莲, 经中央山脉、台湾海峡、福建戴云山、广东九连山、广西大瑶山、六诏山至云贵高原, 经向跨越达 17°(105°E ~ 122°E)。在剖面西部, 地壳厚 40 km, 岩石圈厚 80 ~ 85 km。该处接近哀牢 - 红河断裂, 岩石圈在 60 ~ 80 km 深度上存在一高速带, 速度在 8.2 km/s 左右。这一高速带向东至大瑶山附近抬升到 55 ~ 65 km 深度上, 地壳厚度也减少到 35 km; 向东至九连山, 该带又降到 70 ~ 85 km 深度处, 直至台湾海峡西部, 该带才消失。在台湾中央山脉之下, 地壳厚度加厚至 40 km, 岩石圈厚度 95 km。本剖面岩石圈结构的另一特征是总体厚度从 114°E 开始加厚, 超过 100 km; 至台湾中央山脉之下, 又减薄至 95 km。

图 3 为 100 km 深度内沿 20°N 的纵波速度结构剖面。该剖面东起菲律宾海, 经吕宋岛弧区、南海东北部海盆、珠江口外陆坡、海南岛、北部湾、红河口至印支半岛。在剖面西部, 印支半岛之下的地壳厚

38 km, 岩石圈厚 92 km。在 70 ~ 80 km 深度上存在一高速层, 速度为 8.1 ~ 8.2 km/s。在 106°30' ~ 110°E 处, 地壳厚 30 km 左右; 在 35 ~ 48 km 深度上, 存在一低速层, P 波速度小于 8.0 km/s, 岩石圈厚度减薄至 70 km 左右。该处地壳和岩石圈厚度减薄, 且岩石圈中存在低速层, 反映的是发生岩石圈深大断裂的红河 - 莺歌海断裂带。向东至海南岛(109° ~ 111°E), 地壳加厚至 40 km, 岩石圈厚度减薄至 70 km。从 112°E 向东, 地壳开始减薄, 由 35 km 至 115°E 处 30 km。此区段的岩石圈中, 50 ~ 65 km 深度上存在一高速层, 速度为 8.2 ~ 8.3 km/s。在东沙隆起处(116° ~ 118°E), 地壳厚度增至 32 km, 下地壳底部出现一高速地壳层, 速度达 7.4 km/s, 而岩石圈也加厚至 95 km。在 118° ~ 120°10'E 处, 地壳减薄到 20 ~ 15 km。此段西部为南海北部陆坡区, 东部为南海东北部海盆, 表现为洋壳沿马尼拉海沟向吕宋弧下俯冲。该区段岩石圈下部 52 ~ 80 km 深度处存在一高速层, 厚度 30 km, 速度达 8.2 km/s。在最东部的吕宋岛弧区, 地壳厚 20 km 左右, 岩石圈厚 78 km。

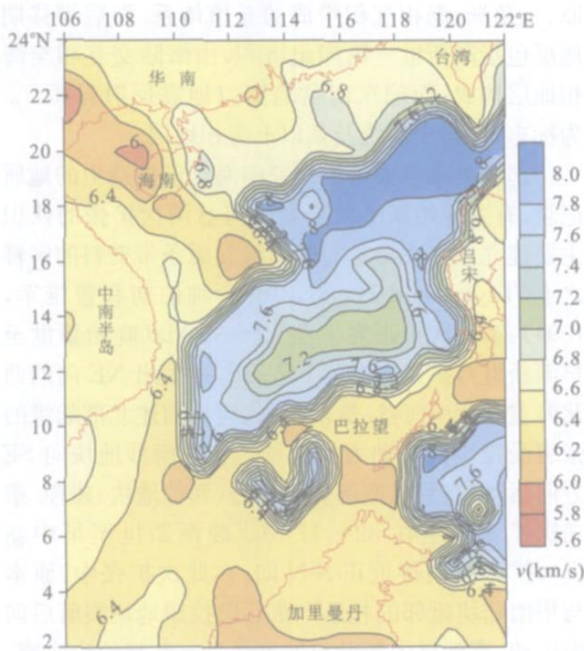


图 4 南海地区 20 km 深的地震层析平面图

Fig. 4 CT plan in depth 20 km in the South China Sea

2.3 南海及邻区 P 波速度结构特征

图 4 至图 6 根据已发表的资料重新绘制, 它们对于阐释本文的观点非常关键, 其特征描述详见过去发表的论文(姚伯初等, 2005).

2.4 研究区岩石圈张裂和沉积盆地形成

燕山运动后期, 中国东南大陆岩石圈发生岩石圈拆沉, 岩石圈厚度由 160 km 减薄到 80 km 左右(姚伯初等, 2006). 65 Ma 前印度板块与欧亚板块发生碰撞, 43 Ma 前太平洋板块的运动方向由 NNW 转向 NWW. 区域板块运动的重大变化导致东亚大陆岩石圈结构和动力学模式发生改变, 在上地幔产生巨型低速异常带, 在地表产生裂谷带以及边缘海的海底扩张, 形成一系列边缘海盆(袁学诚等, 1989). 东亚裂谷及其稍后的边缘海海底扩张是与大西洋、印度洋海底加速扩张大体同时的构造事件, 是全球板块构造活动在东亚边缘的反映(万天丰, 1993; 李思田等, 1997; 王鸿祯, 1997). 东亚边缘海的成因与发展过程非常复杂, 但它们的扩张大都在中中新世(17~15 Ma)前后完全停止. 这种停止, 是西太平洋地区板块间的置换与相对运动条件的改变所致.

前文述及, 南海北部及华南陆块的新生代盆地可以构成一个大规模的盆地群, 所有地质现象表明, 这些盆地的形成与新生代华南大陆岩石圈张裂有关. 如果将它们的发育细节与南海深水盆地联系, 不难看出

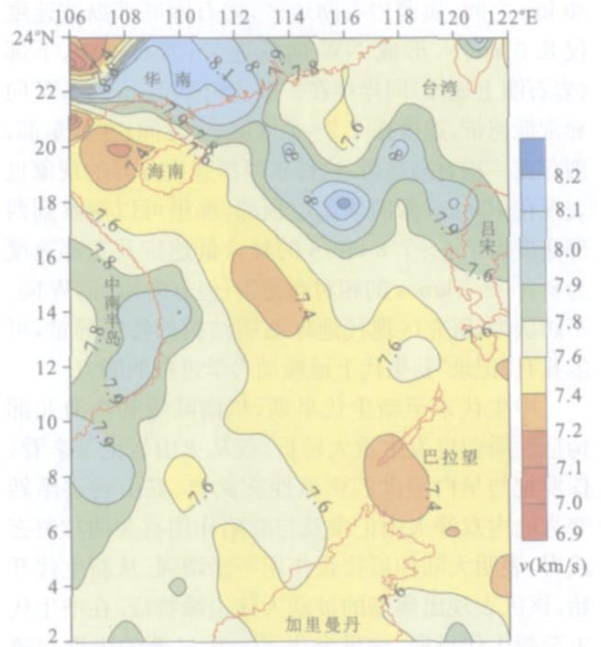


图 5 南海地区 40 km 深的地震层析平面图

Fig. 5 CT plan in depth 40 km in the South China Sea

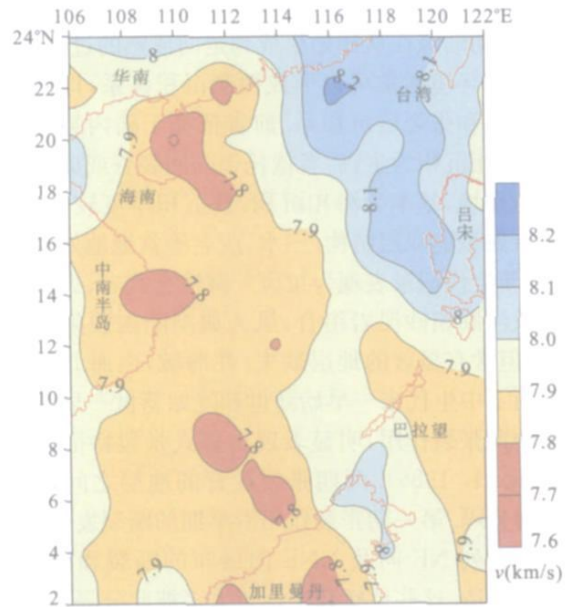


图 6 南海地区 100 km 深的地震层析平面图

Fig. 6 CT plan in depth 100 km in the South China Sea

这些盆地事实上也与南海海底扩张密切相关.

本文总结的新的速度资料显示, 发生于中生代末至新生代早期的岩石圈张裂活动与上地幔流动密切相关. 根据现今岩石圈速度结构特征, 从红河-莺歌海向 SE 经中沙-西沙地区、南海西南海盆、南沙群岛, 到苏禄海与苏拉威西海, 岩石圈厚度在 60 km

80 km 之间,属薄岩石圈地区,岩石圈底部纵波速度仅 8.0 km/s,形成 NW 向低速带;岩石圈中、下部(岩石圈上地幔)同样存在一条宽约 200 km 的 NW 向异常低速带,速度在 7.2~7.6 km/s 之间;在其东部,则存在一相对高速带.这种东西部速度分异的现象也表现在 100 km 深的软流层顶部,那里可以观察到西部速度为 7.6~7.8 km/s 的异常低速带及东部速度为 8.0~8.2 km/s 的相对高速带;但方向为 NNW 向.不妨认为,研究区现代地球圈层结构的特征异常,可能具有“记录”新生代上地幔动力学过程的能力.

中生代末至新生代早期,华南陆缘和南海北部构造性质似应发生重大转折.仅从火山岩记录来看,侏罗纪与早白垩世的钙碱性玄武岩、安山岩逐渐转变为陆内双峰火山记录及与裂陷作用有关的拉斑玄武岩,表明大陆伸展拉张作用不断增强.从新生代开始,该区表现出典型的被动大陆边缘特征.在中生代末至新生代早期,这里发生了一次显著的张性构造运动,即神狐运动(姚伯初等,1993).该幕运动导致岩石圈发生拆沉和分层变形,产生一系列 NE 向张性断裂以及地堑、半地堑地貌,形成众多新生代沉积盆地.被动陆缘在从初始生成到走向成熟的过程中,所提供的环境通常可以形成两套沉积体系,即同张裂沉积系和张裂后沉积系.前者依托于陆内裂谷环境,以陆相沉积为主;后者依托于陆间裂谷或成熟被动陆缘环境,基本为海相沉积,且沉积厚度较大,地层具有典型的双层结构.三水、茂名等盆地地处大陆腹地,新生代记录表现为拉斑-碱性玄武岩、火山碎屑岩及河湖相砂泥岩组合,虽为典型陆内裂陷盆地特征,但常有显著的地层缺失.在海域,南海北部陆缘经历了中生代末-早始新世和晚始新世-早渐新世等两期张裂作用,明显表现出幕式张裂特征(Wu and Pigott, 1986).两期张裂发育的地层之间以不整合面分隔.第一期张裂作用沿早期的断裂发生,形成了一系列 NE 向及 NNE 向展布的断裂和地堑、半地堑构造.这些地堑和半地堑大多彼此分隔,到始新世时仍显示强烈的孤立特征,初期以冲积扇式充填粗碎屑为主,后期则发育横向规模有限的深湖沉积.第二期张裂阶段为相对稳定的沉降期,时代为始新世末-早渐新世,南海北部的湖泊面积扩大,特别在珠二坳陷,早期的次级凹陷相互连通,形成“大白云湖”(戴一丁和庞雄,1999),在各凹陷的沉降中心大面积发育中、深湖相沉积,在凹陷边缘局部发育河流平原、湖岸沼泽和滨浅海相沉积,形成由河流平

原、三角洲、湖相沉积组成的充填体系.裂后漂移期地层包括渐新世-第四纪沉积,由海陆交互相至海相地层构成;而琼东南盆地则以地震反射界面 T₆₀ 为标志,包括中新统及其以上海相地层.

迄今尚未掌握可供研究南海全部构造史的地质记录,有关晚始新世以来南海海盆两次扩张的认识主要建立在中央海盆与西南海盆磁条带资料的解释之上(Taylor and Hayes, 1983;姚伯初和曾维军,1994):第一次扩张发生在 42~35 Ma(晚始新世至早渐新世),扩张方向为 NW-SE,产生出 NE 向的西北海盆和西南海盆.这次扩张,应与前述北部陆缘的张裂受控于同一动力学背景.当时,南沙地块向 SE 方向运动,直到与南部加里曼丹(巽他地块)碰撞.第二次扩张发生在 32~17 Ma(晚渐新世至早中新世),扩张方向接近正 S-N 向.在此次扩张中,原本与华南陆块毗邻的礼乐-东北巴拉望地块裂解后向南运动,直到早中新世与加里曼丹-苏禄地块碰撞,这一大规模的位移直接导致中央海盆的形成.由于动力机制可能更多地来自深部圈层,这次扩张在陆缘区的响应相对较弱.最近,我们鉴定出采自西南海盆、K-Ar 年龄为(121±4.3)Ma 的花岗闪长岩,为南海第一次扩张提供了新的证据.

有关南海的扩张机理本是一个很大的题目.本文展示的研究区岩石圈速度结构资料表明,在岩石圈壳幔的不同深度,存在从华南陆块到苏禄海、宽约 200 km、长逾 1300 km 的 NW-SE 向低速异常带.该带与中生代末直至早渐新世浅表层 NE 向张裂构造运动密切相关,并导致华南陆缘和南海北部一系列沉积盆地的形成与发育.100 km 深度的软流圈顶部充分显示 NNW 向异常低速带,这一现象可能反映上地幔熔融条件的加剧,带动岩石圈向 SSE 方向流动,从而产生南海中央海盆近南北向的海底扩张.

研究区岩石圈异常低速带的存在是深部动力学因素控制浅表层构造运动的有力证据.一般而言,熔融程度的提高和熔融组分的增多是异常低速带产生的原因.但是,为什么发生异于常态的熔融,是一个需要认真研究的问题.根据低速带的分布及其可能产生的效应,它们的活动范围已然涉及大陆,不宜以南海地幔羽上升并形成地幔对流进行解释;若归结为张裂减压又似乎陷入“鸡与蛋”的怪圈;最有可能的机制似是:(1)古南海向华南陆块俯冲的脱水作用使“软物质”更多地进入岩石圈;(2)青藏高原较厚的岩石圈(≥ 150 km)强迫软流层东南方向流动所

产生的效应。

3 结论

由于地球深部的热流向上传导的速率很低, 因此, 今日岩石圈下部及软流层中的热状态可能保留古构造的遗迹。研究区岩石圈和软流层的速度结构特征是该区中生代末期以来深部动力过程所残留的痕迹, 它们在华南-南海(特别是北部陆缘)新生代演化历史中曾发挥重要的控制作用。岩石圈底面及内部的巨型 NW 向异常低速带表明中生代末至新生代早期的神狐运动在华南与南海北部陆缘产生 NE 向张裂构造体系并催生出内陆-陆架-陆坡沉积盆地, 还导致南海海盆的早期扩张。软流层 NNW 向的异常低速带指示的深部动力作用发生较晚, 它所反映的岩石圈 SSE 向的蠕动直接导致南海中央海盆的海底扩张及陆缘地区的持续裂解。由此可见, 华南陆缘和南海北部新生代沉积盆地的形成和发展, 与岩石圈及软流层的结构和运动方式密切相关。

致谢: 国家重点基础研究发展规划项目 (G2000004670005) 和国土资源部重大科技项目“中国大陆岩石圈三维结构”资助研究, 成都理工大学朱介寿教授的研究团队协助计算研究区的速度结构和密度结构, 谨致谢忱。

References

Bao, C. W., 1987. Topography of South China Sea. In: He, L. S., Chen, B. Y., eds., Geological and geophysical atlas of South China Sea. Guangdong Atlas Publishing House, Guangzhou (in Chinese).

Cai, X. L., Zhu, J. S., Cao, J. M., et al., 2005. Three dimensional structural and dynamic types of the continental margin lithosphere in Southeast China. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 25(3): 27 - 34 (in Chinese with English abstract).

Chen, S. Y., 1987. Magnetic abnormality of South China Sea. In: He, L. S., Chen, B. Y., eds., Geological and geophysical atlas of South China Sea. Guangdong Atlas Publishing House, Guangzhou (in Chinese).

Cheng, R. H., Du, X. D., Wang, D. P., 1995. Seismic computered tomography: An effective method for studying basinal dynamics. *Geology in the World*, 14(2): 52 - 58 (in Chinese).

Dai, Y. D., Pang, X., 1999. Petroleum characteristics of Zhu

II sag in Pearl River Mouth basin. *China Offshore Oil and Gas Geology*, 13(3): 169 - 180 (in Chinese with English abstract).

Detrick, R., Dixon, J., Farley, K., et al., 1996. The solid Earth. In: Baker, P., McNutt, M., eds., The future of marine geology and geophysics. Report of a workshop, 7 - 29.

Feng, Z. Q., Mou, W. C., 1988. Geological characteristics and oil perspective of Pearl River Mouth basin. *Geology Research of South China Sea*, 74 - 80 (in Chinese with English abstract).

IODP, 2001. Earth, oceans and life. Initial science plan (2003 - 2013), 110.

Li, S. T., Lu, F. X., Lin, C. S., et al., 1997. The evolution of the Meso-Cenozoic basin and geodynamics in East China and its adjacent area. China University Geosciences Press, Wuhan, 1 - 25 (in Chinese).

Li, J. B., 2005. Evolution of China's marginal seas and its effect of natural resources. Ocean Press, Beijing (in Chinese).

Li, T. G., 1987. Gravity abnormality of South China Sea. In: He, L. S., Chen, B. Y., eds., Geological and geophysical atlas of South China Sea. Guangdong Atlas Publishing House, Guangzhou (in Chinese).

Lewis, J. L., Day, S. M., Magistrale, H., et al., 2001. Crustal thickness of the Peninsula ranges and gulf extensional province in the California. *Journal of Geophysical Research*, 106: 13599 - 13611.

MARGINS Program, 2004. Science plan, NSF, 170.

Taylor, B., Hayes, D. E., 1980. The tectonic evolution of the South China Sea basin (A). In: Hayes, D. E., ed., The tectonic and geologic evolution of Southeast Asia seas and islands. *Geophysical Monograph, AGU, Washington*, 23: 89 - 104.

Taylor, B., 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 2. *Geophysical Monograph, AGU, Washington*, 27: 23 - 56.

Wan, T. F., 1993. Intraplate deformation tectonic stress and their application for eastern China in Meso-Cenozoic. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Wang, H. Z., 1997. Speculations on Earth's rhythms and continental dynamics. *Earth Science Frontiers*, 4(4): 1 - 12 (in Chinese with English abstract).

Wu, K. R., Pigott, J. D., 1986. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea. *AAPG Bulletin*, 70:

1136 – 1155.

- Yao, B. C., 1998. Crust structure of the northern margin of the South China Sea and its tectonic significance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 18(2): 1 – 16 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., Hayes D. E., 1998. Lithospheric deformation under the effect of an extensional stress field. *Journal of the Geological Society of China*, 41(4): 517 – 534 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., Wan, L., Wu, N. Y., 2006. The South China Sea lithosphere 3D structure and its evolvement. In: Li, T. D., ed., Series of China lithosphere 3D structure. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yao, B. C., Zeng, W. J., 1994. The China America special report of South China Sea geological investigation. China University Geosciences Press Wuhan, 75 – 90 (in Chinese).
- Yao, B. C., Zeng, W. J., Chen, Y. Z., et al., 1993. The lithosphere structure of the margin in northern South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 37(1): 44 – 53 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., Wan, L., Wu, N. Y., 2005. Cenozoic tectonic evolution of the South China Sea and its lithospheric three dimensional structures. *Geological Bulletin of China*, 24(1): 1 – 8 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, X. C., Zuo, Y., Cai, X. L., 1989. Lithosphere structure of southern China plate and geophysics. China advances in the earth sciences in 1980's. Press of Academic Books, Beijing, 243 – 250 (in Chinese).
- Zhu, J. S., Cao, J. M., Cai, X. L., et al., 2003. Study for three dimensional structure of Earth interior and geodynamics in China and adjacent land and sea regions. *Advance in Earth Sciences*, 18(4): 497 – 503 (in Chinese with English abstract).
- 圈三维结构——动力学型式. 海洋地质与第四纪地质, 25(3): 25 – 34.
- 陈圣源, 1987. 南海磁力异常图. 见: 何廉声, 陈邦彦主编, 南海地质地球物理图集. 广州: 广东省地图出版社.
- 程日辉, 杜旭东, 王东坡, 1995. 地震层析: 盆地动力学研究的有效手段. 世界地质, 14(2): 52 – 58.
- 戴一丁, 庞雄, 1999. 珠江口盆地珠二坳陷石油地质特征. 中国海上油气, 13(3): 169 – 180.
- 冯志强, 缪宛岑, 1988. 南海珠江口盆地地质构造特征和含油气远景. 南海地质研究, 74 – 80.
- 李家彪主编, 2005. 中国边缘海形成演化与资源效应. 北京: 海洋出版社.
- 李思田, 路凤香, 林畅松, 等, 1997. 中国东部及邻区中生代盆地演化及地球动力学背景. 武汉: 中国地质大学出版社, 1 – 25.
- 李唐根, 1987. 南海重力异常图. 何廉声, 陈邦彦主编, 南海地质地球物理图集. 广州: 广东省地图出版社.
- 万天丰, 1993. 中国东部中生代板内变形构造应力场及其应用. 北京: 地质出版社.
- 王鸿祯, 1997. 地球的节律与大陆动力学的思考. 地学前沿, 4(4): 1 – 12.
- 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.
- 姚伯初, 万玲, 吴能友, 2005. 南海新生代构造演化及岩石圈三维结构特征. 地质通报, 24(1): 1 – 8.
- 姚伯初, 万玲, 吴能友, 2006. 中国南海海域岩石圈三维结构及演化. 李廷栋主编, 中国岩石圈三维结构丛书, 北京: 地质出版社.
- 姚伯初, 曾维军, 1994. 中美调查南海地质专报. 武汉: 中国地质大学出版社, 75 – 90.
- 姚伯初, 曾维军, 陈艺中, 等, 1993. 南海北部陆缘东部的地壳结构. 地球物理学报, 37(1): 44 – 53.
- 袁学诚, 左愚, 蔡学林, 1989. 华南板块岩石圈构造与地球物理. 八十年代中国地球科学进展. 北京: 学术书刊出版社, 243 – 250.
- 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等, 2003. 中国及邻近陆域海域地球内部三维结构及动力学研究. 地球科学进展, 18(4): 497 – 503.

附中文参考文献

- 鲍才旺, 1987. 南海地形图. 见: 何廉声, 陈邦彦主编, 南海地质地球物理图集. 广州: 广东省地图出版社.
- 蔡学林, 朱介寿, 曹学敏, 等, 2005. 中国东南大陆边缘带岩石