

南海岩石圈厚度变化特征及其构造意义

姚伯初 万 玲

(国土资源部广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

提要:地震层析资料表明,南海地区,自红河口向南经南海、苏禄海到苏拉威西海,岩石圈速度低,底部横波速度仅 4.4 km/s,岩石圈厚度在 60~80 km,为薄岩石圈地区;而软流层的速度也较低,在 4.2~4.4 km/s,但厚度较大,大于 200 km。从红河—莺歌海断裂带经南海到苏禄海,存在一条北西向宽约 200 km 的上地幔北西向低速带,速度在 4.05~4.25 km/s(面波速度)。它反映了新生代南海地区上地幔的动力学过程。南海岩石圈厚度变化存在明显差异,南海陆缘,岩石圈厚度在 70~80 km,而在南海洋盆之下,岩石圈厚度超过 100 km,岩石圈底部存在高速岩石层,并且洋盆下的岩石圈之厚度比大陆边缘厚,在海盆岩石圈下部的 60~80 km 深度上存在一高速层,纵波速度为 8.2~8.3 km/s。特别是中央海盆及西北海盆与西南海盆,其下部岩石圈中均存在一高速岩石层,这是非常具有构造意义的。由此笔者提出大陆岩石圈裂离、上地幔因减压而部分熔融所产生的基性岩浆形成南海新生代洋壳的猜想。

关 键 词:岩石圈;高速岩石圈层;部分熔融;海底扩张;猜想

中图分类号: P542

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2010)04-0888-12

板块构造理论认为,地球上的构造运动是由地球表层岩石圈的运动引起的。因此,岩石圈的三维结构之研究,是地球科学研究的基本问题之一。W.J. Ludwig 等^[1,2]先后于 1970 年和 1979 年在南海做了双船地震和地震声纳浮标测量,首先研究了南海海盆的部分地区之地壳结构;姚伯初等(1983)^[3]利用 1979 年与美国哥伦比亚大学拉蒙特—多尔蒂地球观测所在南海进行第一阶段合作时采集的地震声纳浮标资料,全面总结和研究了南海海盆的地壳结构。1985 年,广州海洋地质调查局和美国哥伦比亚大学拉蒙特—多尔蒂地球观测所在南海开展科学合作,利用双船地震方法对南海北部陆缘的地壳结构进行了研究,发现陆缘地壳从陆到洋盆呈阶梯状减薄,地壳下部存在高速地壳层(姚伯初等,1994)^[4]。蔡学林,朱介寿等(2002)^[5]研究了中国东南大陆边缘岩石圈的地震速度,发现这里在中新生代是构造极其

活跃的地区。层析资料表明,自地表至 55 km 深度,中国华北地块、华南地块到边缘海地区显示高速度地区,而青藏高原为极低速度区。其中,大兴安岭—太行山—武陵山为十分清晰的速度分布界线。从喜马拉雅山—印支半岛到印度尼西亚群岛为特提斯缝合带,显示为低速异常带。自 70 km 以下至 250 km,华北地块及东南沿海地区,黄海、东海大陆架,到西太平洋边缘海(日本海、冲绳海槽、南海、苏禄海、苏拉威西海、斑达海),自北到南存在一条宽 2500~4000 km,长达 12000 km 的低速异常带。对于南海岩石圈的三维结构,以前没有进行过详细研究。笔者曾承担国土资源部重大科技项目“中国大陆岩石圈三维结构”的课题“南海岩石圈三维结构”,利用地震层析资料,第一次全面研究了南海地区岩石圈的三维结构和厚度特征。

收稿日期: 2010-07-15; **改回日期:** 2010-08-09

基金项目: 国家重大基础研究发展计划(973)支持项目(G2007CB41170509),以及国土资源部重大科技专项计划项目“中国大陆岩石圈三维结构”(20010103)资助。

作者简介: 姚伯初,男,1940 年生,教授级高级工程师,主要从事海洋地球物理、区域地质构造调查与研究;E-mail:bcyao@163.net。

1 南海的地形地貌特征

南海是一棱形海盆,北东向长 1600 km,东西向宽 700 km,水深在 3000~4400 m。陆架边缘大体沿

200 m 水深线延展,陆坡与深海平原的边界大约沿 3000 m 水深线延伸 (图 1)。北部广东陆架宽 150~300 km,南部巽它陆宽 600 km,是世界上最宽的陆架之一。东部和西部陆架很窄,仅数十千米^[6,7]。陆架

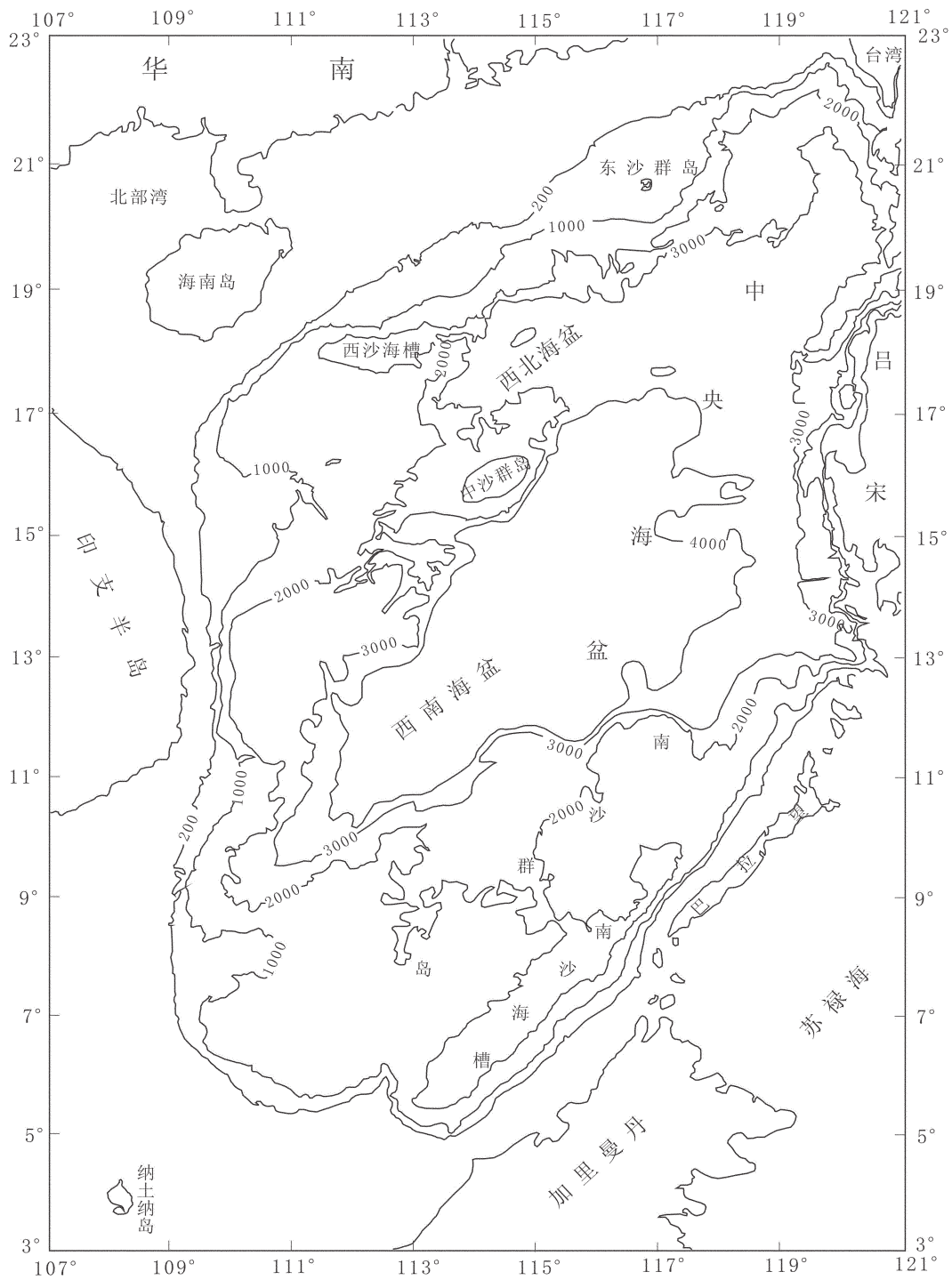


图 1 南海地形图
Fig.1 Topography of the South China Sea

地形平坦,在大河岸外分布着水下三角洲,如北部陆架上的珠江水下三角洲,西南部的湄公河三角洲等。陆坡地形复杂,分布着众多的海山、海丘、海槽、海谷和海台。如北部陆坡上,海山、海丘呈线状分布,自神狐暗沙与一统暗沙起,经南卫滩和北卫滩至台湾浅滩,为一北东向海丘链,海丘高 200~600 m。在其南部,自双峰海山经尖峰海山至北坡海山,为一北东向海山链,海山高度大于 1000 m。在中沙群岛之南,分布着一系列北东向排列的海山与海谷,山与谷相间排列。著名的海槽有西沙海槽、中沙海槽、礼乐海槽和南沙海槽,著名的海谷有东沙海谷和珠江海谷。南海南部陆坡宽达 400 km,地形切割强烈,崎岖不平。这里分布着 230 多座岛屿、沙洲、暗沙、暗礁和暗滩,是航海的危险地区。

南海深海平原的水深在 300~4400 m,海底平坦,海山广布。根据水深线及海山的走向,可将其分为三个次海盆:西北次海盆、中央海盆和西南次海盆。西北次海盆位于中沙群岛以北,西沙海槽之东,水深为 3000~3800 m。海底自西向东倾斜,中间分布着北东向的双峰海山。这里新生代沉积厚 1.5~2.0 km,因此,层 2 顶部埋深在 4.5~5.8 km。地壳厚 5.0~5.8 km,等厚线沿北东向展布。中央海盆呈长方形,南北长 900 km,东西宽 450 km。海底上分布着一系列东西向的海山、海丘,著名的黄岩海山分布在海盆中部。海盆水深为 3000~3900 m,个别地方达 4000 m。新生沉积厚 0.5~2.4 km,层 2 顶部埋深在 3.5~5.5 km,海盆中部高,向南向北下倾,反映海盆中部的洋壳之年龄较小,向南向北逐渐变老。西南次海盆的水深在 4300~4400 m,是南海深海平原上最低洼之处。这里新生代沉积厚 1.0~2.0 km,因此层 2 顶部埋深在 5.3~7.5 km。海盆中部分布着北东走向的长龙海山,到 114°E 处与南北走向的中南海山相遇,终止于此。

2 南海新生代构造演化史

南海是西太平洋边缘海中最大的海盆之一,从其构造发育史看,它具有其独特的发育模式,它既不是如菲律宾海、日本海那样的弧后盆地,也不是像白令海那样的被岛弧圈捕的边缘海,而是如大西洋那样通过大陆张裂、海底扩张而生成的边缘海盆。

E.Ben-Auraban 和 S.Uyeda(1973)^[8]首先在南海中央海盆中对比出东西向的磁异常条带,但未鉴别出其时代。B.Taylor 和 D.E.Hayes(1980)^[9]分析了中央

海盆的磁异常,并首次对比出 5d-11 号东西向磁异常条带,由此计算出它是在晚渐新世到早中新世(32~17 Ma B.P)期间通过南北向海底扩张而形成的。对南海另外两个次海盆(西北海盆和西南海盆),当时由于资料不多,他们未做讨论。1983 年,他们利用中美合作调查南海海洋地质第一阶段(1979—1980 年)所采集的地质地球物理资料,进一步证实了中央海盆 5d-11 号磁异常条带的存在,并利用重力资料,推测西南海盆是和中央海盆于同一时代生成的。陈圣源(1987)^[10]利用我们在南海西南海盆采集的地磁资料,鉴别出 M7-M11(126~119 MaB.P)磁异常条带,由此何廉声(1987)^[11]提出南海发生过两次海底扩张,第一次海底扩张发生在晚白垩世早期。吕文正(1987)^[12]在西南海盆对比出 20-27 号磁异常条带,由此提出南海第一次海底扩张发生在晚白垩世至早古新世(70~63 MaB.P)。姚伯初(1991)^[13]根据磁异常走向及沉积构造层组合和海山走向等资料,推测西南海盆和西北海盆是在晚始新世生成的,由此提出南海第一次海底扩张发生在晚始新世。姚伯初、曾维军等(1994)^[14]利用中美联合调查南海海洋地质第二阶段所采集的综合地球物理资料,采用高通滤波方法,去掉洋壳下部地壳层磁性体对观测磁异常资料之影响(去掉低频磁异常的影响),在西南海盆中鉴别出 18-13 号磁异常条带,由此认为其形成时代是晚始新世至早渐新世(42~35 Ma B.P)。

此后,姚伯初(1996)^[15]根据区域地质构造、海盆洋壳厚度及水深等资料,结合磁异常分析结果,进一步确认新生代南海地一次海底扩张是发生在晚始新世到早渐新世。1988 年,何廉声在研究南海北部构造运动时,发现在渐新世和中新世地层之间存在一区域不整合面,他认为此期间在南海存在一次构造运动,因此他命名为“南海运动”。1992 年,广东石油学会开了一次学术讨论会,主题是南海北部新生代的构造运动。会后,姚伯初写了一篇文章,讨论新生代南海北部发生过 3 次区域构造运动(1993)^[16]。他认为,在中生代末至新生代早期(K_3-E_1),这里发生过神狐运动,运动方向为北西-南东,在地表产生一系列 NE 向构造,这次构造运动被命名为“神狐运动”;第二次运动发生在晚始新世,他将其命名为“南海运动”,并认为何廉声将这一运动的时间定得晚了。因为按何廉声的原意,南海运动是发生在新生代南海海盆发生海底扩张前的一次构造活动,下面看到,南

海海盆新生代的一次海底扩张是从 42 Ma 前开始的。因为南海新生代第二次海底扩张发生在晚渐新世,因此,可以认为,南海运动可分为两幕,第一幕发生在晚始新世,第二幕发生在晚渐新世。在中中新世末期,这里又发生一次区域构造运动,运动方向为 NW-SE 向,称做“东沙运动”。因为南海北部在新生代为被动大陆边缘,因此,姚伯初将神狐运动引起的不整合面称做张裂不整合面 (rifting unconformity),南海运动产生的不整合面称做分离不整合面 (break-up unconformity)。第三次构造运动发生在中中新世末期,在南海北部被称做东沙运动;在南海南部被命名为万安运动。

3 南海地壳的速度结构特征

由上述讨论可见,南海地区由于其特殊的构造位置及复杂的构造发展历史,因此,其地壳和岩石圈结构独具特色,纵向与横向变化及其复杂。

地壳结构的变化特征。在地质发展历史中,由于南海地块是由多个小地块在地质时期经过多次碰撞而缝合起来的,因此,其地壳结构的横向变化很大。例如南海北部陆架与陆坡区,穿过西沙海槽,地壳结构发生显著变化。在西沙海槽北部的扩展排列剖面 ESP15,测得该处地壳结构如下:上地壳速度为 1.9~6.0 km/s,厚 2.3 km;下地壳速度为 6.9 km/s,厚 21.21 km。过了西沙海槽,在西沙—中沙地块上,ESP17 的地壳结构变化很大,上地壳速度为 1.6~6.0 km/s,厚 16.07 km;下地壳速度为 6.4 km/s,厚 5.63 km。两处的水平距离仅 100 km 左右,但地壳结构却变化如此之大。因为推测西沙海槽可能是印支期的一条缝合线,沿此缝合线,西沙—中沙地块和南海北部陆缘地块发生过碰撞缝合。又如从华南陆地进入南海北部陆架,地壳结构发生明显变化:在汕头地区,地壳厚 30 km,上地壳速度为 5.86 km/s,厚 16 km;在 16~18 km 深度处存在一低速层,速度为 5.13 km/s^[18];下地壳速度为 6.61 km/s,厚 12 km。在距汕头 100 余 km 的陆架区,ESP9 测得地壳结构如下:新生代沉积厚 5 km,速度为 1.8~4.8 km/s;下伏中生代沉积,速度为 5.0~5.5 km/s,厚 3.5 km;往下中酸性火成岩,厚 3.5 km,速度为 5.6~6.2 km/s;再往下是下地壳,速度范围为 6.5~7.4 km/s,厚 14 km,地壳总厚度为 26 km。由此可见,华南陆区与南海北部陆架的地壳结构之变化很大,反映它们可能是由两个

地块缝合而成的^[17-19]。在中央海盆,沉积层(层 1)厚 0.5~3 km,速度在 1.8~3.2 km/s;层 2A 的速度为 3.5~3.7 km/s,层 2B 的速度为 5.1~5.3 km/s,层 2C 的速度为 6.0~6.1 km/s,层 2 的厚度为 1.99 km;层 3 的速度为 6.5~7.4 km/s,厚度 3.22 km^[3]。由此可见,南海海盆地的地壳结构类似于年轻洋壳的速度结构,与地磁异常条带对比出的地壳年龄是一致的。

4 南海岩石圈的速度结构特征

笔者在“中国南海海域岩石圈三维结构及演化”项目的研究工作中,利用地震层析成像技术,结合过去关于地壳结构研究的成果,研究和探讨了南海地区岩石圈的三维速度和密度结构及其变化特征。

图 2 表示沿 20°N、深度 400 km 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、南海东北部陆坡、南海西北部陆架、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,岩石圈厚度超过 100 km。上、中地壳厚 30 km,下地壳厚 8 km;在 70~80 km 深度上存在一高速层,速度为 8.1~8.2 km/s。在 107°30′-110°E 处,地壳厚 30 km 左右,上、中地壳厚,下地壳薄;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。这里对应着红河—莺歌海断裂带,表现为地壳和岩石圈厚度减薄,岩石圈中存在低速层,说明红河—莺歌海断裂是一岩石圈断裂。向东至海南岛(109°-111°E),地壳加厚至 40 km,上、中地壳和下地壳厚度相当;岩石圈厚度 80 km。从 112°E 开始,地壳开始减薄,由 35 km 至 115°E 处 30 km,上、中地壳厚 20 km,下地壳厚 10 km。此处岩石圈中,50~65 km 深度上存在一高速层,速度为 8.2~8.3 km/s。向东到东沙隆起处(116°~118°E),地壳厚度增厚至 32 km,上、中地壳厚 10 km 左右,下地壳厚此薄 22 km;下地壳底部出现一高速地壳层,速度达 7.4 km/s。此处岩石圈厚度加厚至 95 km。在 118°~120°10′E 处,地壳减薄到 20~15 km。此段西部为陆坡区,东部南海东北部海盆,是洋壳,正在沿马尼拉海沟向吕宋弧下俯冲。此段岩石圈下部 52~80 km 深度处存在一高速层,厚度 30 km,速度达 8.2 km/s。在吕宋岛弧区,地壳厚 20 km 左右,上、中地壳厚 15 km,下地壳厚 5 km;岩石圈厚度超过 100 km。在这条断面上,西部 90~230 km 上出现速度小于 8.0 km/s 的岩石

层,即软流层;而东部 80~220 km 上出现速度小于 8.0 km/s 的岩石层。但从东沙群岛至剖面东部,在 80~120 km 深度上出现速度大于 8.0 km/s 的岩石层,表明这里软流层中存在高速岩石层。本剖面在海盆之下,岩石圈结构特征很有构造意义,地壳之下,上地幔速度为 7.9~8.1 km/s,往下在 30~40 km,出现 7.5~7.8 km/s 岩石圈层;从 40 km 开始,到 70 km 深度,存在高速岩石圈层,速度 8.2~8.5 km/s;从 70~90 km 深处,速度又逐步降低,为 8.1~8.0 km/s。南海海洋盆岩石圈的这种层状速度结构,是和海底扩张、新洋壳形成有密切关系的。

图 3 表示沿 18°N、深度 400 km 的 P 波速度结构剖面。该剖面从东到西,经吕宋岛、北吕宋海槽、马尼拉海沟、南海中央海盆、西北海盆、西沙—中沙地块,到印支半岛。在剖面西部印支半岛之下,地壳厚

30 km 左右,上、中地壳厚 18 km,下地壳厚 12 km;在岩石圈下部 60~80 km 深处存在一高速层,速度为 8.1~8.2 km/s,它向印支半岛东部外的红河—莺歌海断裂带(108°~109°E)之下减薄至 10 km。印支半岛之下的岩石圈厚度超过 100 km。莺歌海断裂带之下的地壳减薄至 25 km,其上、中地壳厚 20 km,下地壳厚 5 km;这里岩石圈厚度减薄至 80 km。此处存在 35~45 km 深度上存在低速层,速度为 7.5 km/s,说明莺歌海断裂是岩石圈断裂。在海南岛南部海域(109°~110°E),地壳加厚至 35 km,其上、中地壳厚 30 km,下地壳厚 5 km。向东至西沙海槽,地壳减薄到 28 km,其上、中地壳厚 20 km,下地壳厚 8 km。这一段剖面(海南岛之下)的岩石圈厚度在 80~85 km 左右。从这里开始,至南海中央海盆东部边缘(118°E),在岩石圈的 60~80 km 深度处存在一高速层,其速

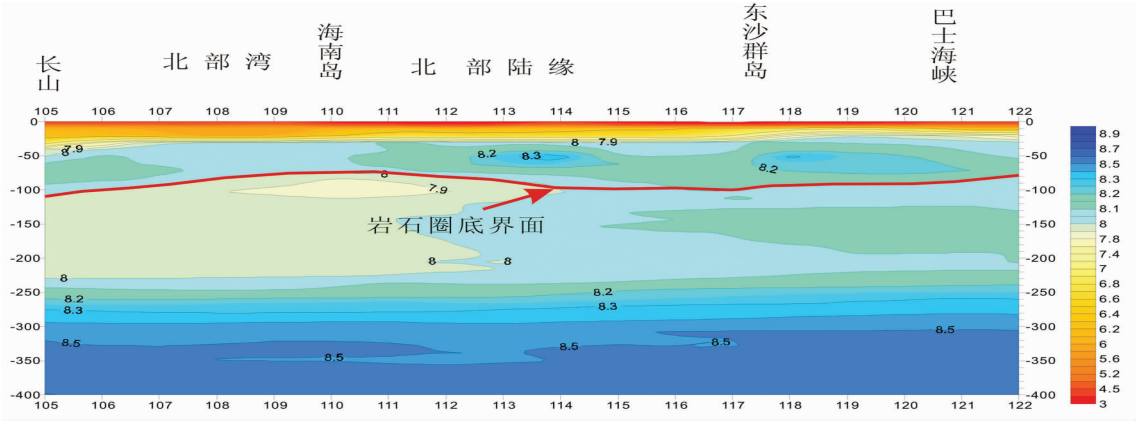


图 2 沿北纬 20 度穿过南海、深度 400 km 的速度(km/s)剖面
Fig.2 P wave velocity profile with the depth to 400 km along 20°N

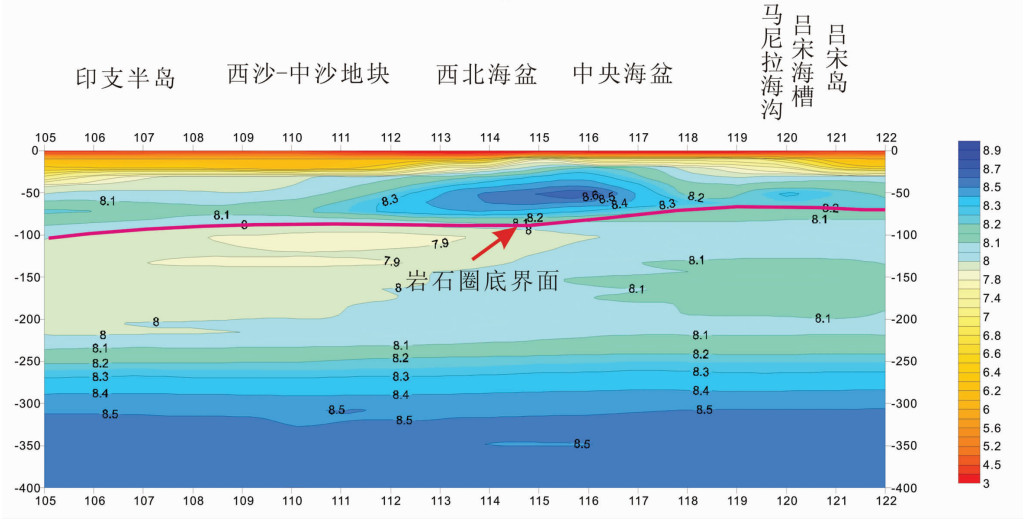


图 3 沿北纬 18°穿过南海、深度 400 km 的速度(km/s)剖面
Fig.3 P wave velocity profile with depth to 400 km along 18°N

度为 8.2~8.5 km/s,岩石圈厚 90~95 km。在南海西北海盆至中央海盆之下(114°~119°E),地壳厚度减薄到 5~6 km,莫霍面深度 10 km,是典型的洋壳。在马尼拉海沟(119°30'E)之下,莫霍面深度从 10 km 向 40 km 下降,但岩石圈厚度未见变化。按正常情况,大洋岩石圈向海沟俯冲,可达 700 km 深度,从天然地震资料看,这里俯冲岩石圈已到 200 km 深度处,为什么这里未见此现象呢?这是因为计算层析资料时是用面波层析算法所致。在剖面上,软流层的变化如下:西部印支半岛至南海海盆之下,80~220 km 深度上出现速度小于 8.0 km/s 的岩石层,表明这里软流层厚 140 km。而在东部吕宋岛弧之下 110~200 km 深度上出现速度大于 8.0 km/s 的岩石层,表明这里软流层中存在高速岩石层。

图 4 表示沿 14°N、深度 400 km 的 P 波速度结构。从东到西,剖面穿过吕宋岛南部、吕宋海槽、马尼拉海沟、南海中央海盆、长龙海山、南海西南海盆、中沙—西沙地块、南海西缘断裂,至印支半岛的昆嵩高地。在剖面西部昆嵩高地之下,地壳厚 30 km,其上、中地壳厚 25 km,下地壳厚 5 km;岩石圈厚 80 km。由此向东,从 108°30'E 到 110°30'E,地壳厚度变化不大,但上、中地壳厚度为 18 km,下地壳厚 12 km。西沙—中沙地块之下,岩石圈厚度逐步减薄,在南海西缘断裂带(106°10'E)之下,厚度减至 70 km;由此

再向东,在西沙—中沙地块之下,岩石圈厚度逐渐加厚,到 113°E 处,进入南海西南海盆,莫霍面深度变至 11km,岩石圈厚度加厚至 95 km 但到 115°~116°E 处,地壳结构有变化,层 2 厚度从西南海盆向中央海盆变薄,反映西南海盆的年龄应比中央海盆老;岩石圈厚度由西南海盆的 95 km 到中央海盆的超过 100 km;在下部岩石圈中的 60~80 km 深度上存在一高速层,速度为 8.2~8.5 km/s。向东到马尼拉海沟(119°E)处,地壳下沿伸,莫霍深度从约 10 km 下沉至 20 km 深处。在吕宋岛之下,岩石圈中的高速层消失。在整段剖面中,岩石圈之下,软流层底部大约在 240 km,底部速度为 8.4 km/s。这反应软流层厚度在西部南海西缘断裂之下最厚,约 170 km,而在中央海盆之下最薄,厚度 140 km。从岩石圈与软流厚度变化来看,南海西缘断裂带是一条岩石圈断裂带。

图 5 是沿北纬 8°、深度 400 km 而穿过南海的岩石圈速度剖面。剖面西起巽它陆架两兄弟群岛、南沙群岛万安滩、西卫滩(110°E)、南薇滩(112°E)、南海礁与安渡滩(114°E)、都护暗沙(116°E)、南沙海槽、巴拉巴克海峡到苏禄海海盆。在剖面西部巽它陆架之下,地壳厚 26 km,其上、中地壳厚 17 km,下地壳厚 9 km;岩石圈厚 75~80 km。从巽它陆架进入南海南部陆坡,地壳厚度减小,其上、中地壳厚度加厚,下地壳减薄。在巽它陆架之下,岩石圈厚度由西部

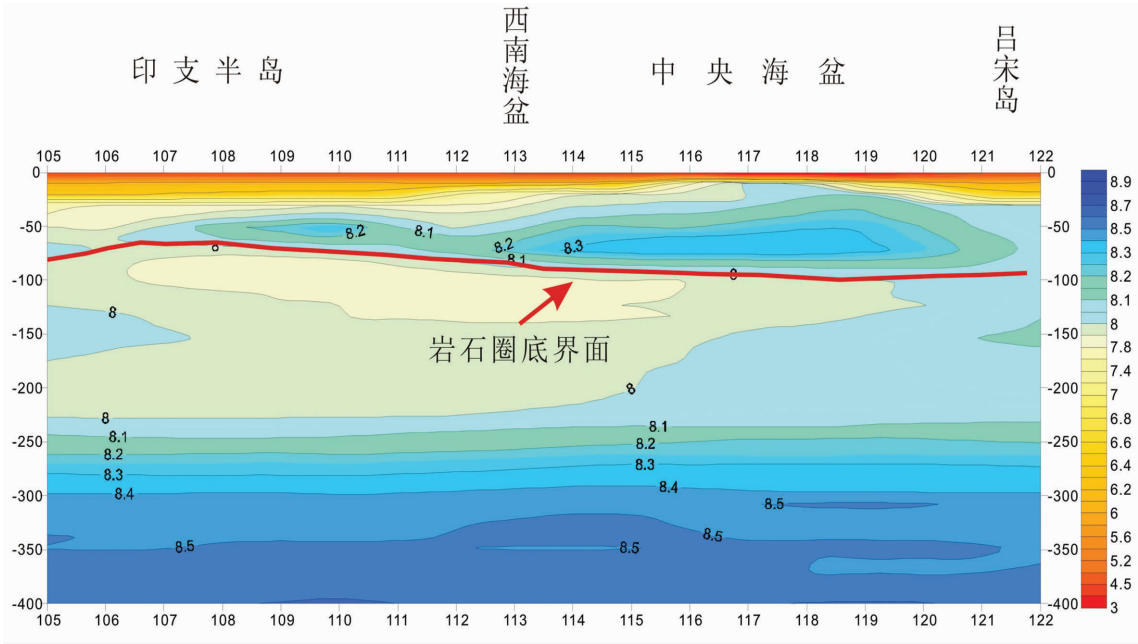


图 4 沿北纬 14°、深度 400 km 而穿过南海的岩石圈速度(km/s)剖面
Fig.4 P wave velocity profile with depth to 400 km along 14°N

95 km 向东减薄至 90 km;在南沙群岛之下,岩石圈厚度为 85 km;由南沙群岛进入南沙海槽(116°E 附近),地壳厚度由 20 km 增厚至 26 km,主要是下地壳厚度由南沙群岛地区的 4 km 增加到南沙海槽之下的 10 km。这说明南沙海槽曾是地质时期的俯冲带。岩石圈厚度在此处开始增厚,厚度由 90 km 增至 95 km。从 119°30'E 至剖面东部(苏禄海盆),在岩石圈下部 62~88 km 深度上出现一高速层,其速

度为 8.2 km/s,岩石圈厚度近 100 km。在苏禄海盆内(119°~122°E),地壳厚度减薄,莫霍面深度由巴拉巴克海峡的 28 km 减至苏禄海盆的 10 km,说明东南苏禄海是洋盆,深海钻探已证明了这一推测。

图 6 表示沿 117°E、深度 400 km 的 P 波速度结构剖面。剖面北起广东南澳岛、经南海北部陆架、东沙群岛(20°N)、南海中央海盆、南海南部边缘的礼乐滩(11°N)、南沙海槽(8°N)、巴拉巴克海峡,至婆

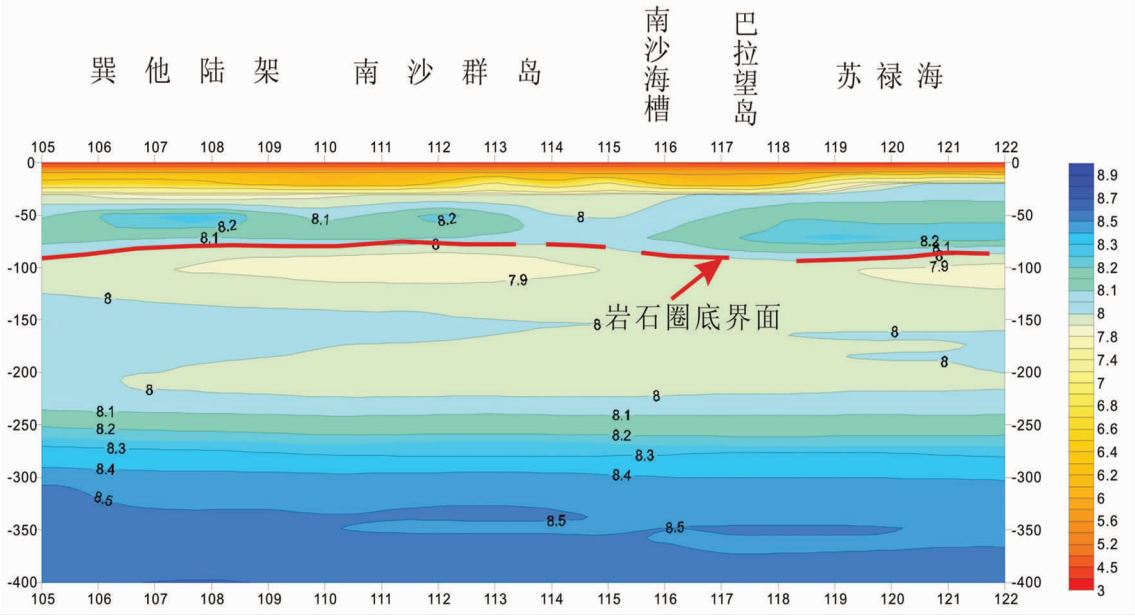


图 5 沿北纬 8°穿过南海、深度 400 km 的速度(km/s)
Fig.5 P wave velocity profile with depth to 400 km along 8°N

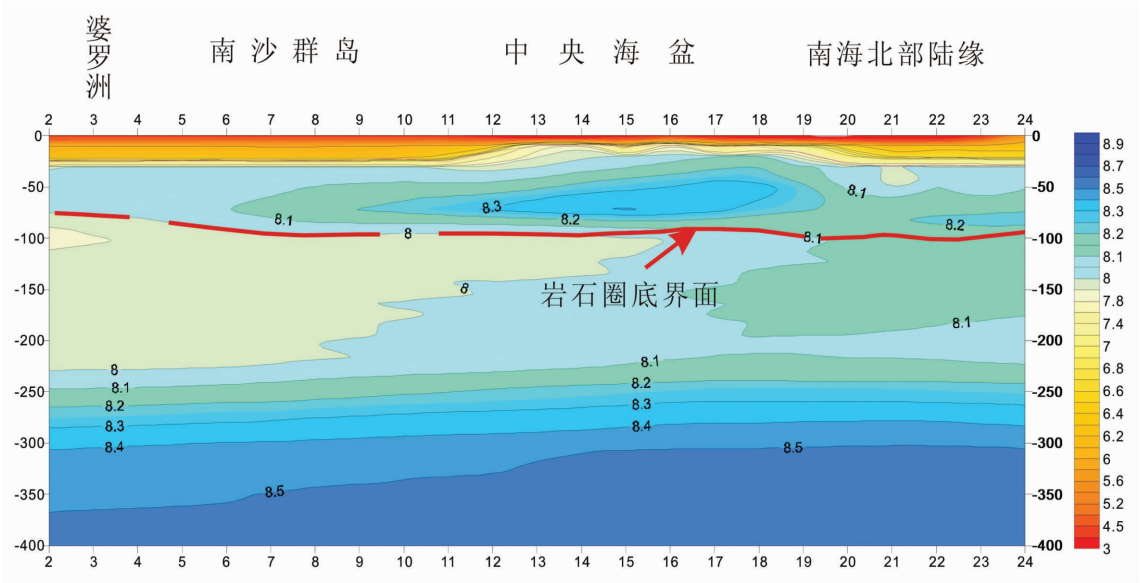


图 6 沿东经 117°、深度 400 km 穿过南海的 P 波速度(km/s)结构剖面
Fig.6 P wave velocity profile with depth to 400 km along 117°E

罗洲上沙巴地区的基纳巴卢山和卡杨河地区。剖面北部陆区地壳厚 28~30 km, 其上、下地壳厚度相当; 陆架区地壳厚 28 km 左右, 上、中地壳厚度薄, 下地壳厚(姚伯初, 1998)。陆区岩石圈厚度超过 100 km。从东沙群岛经下部陆坡进入中央海盆之后, 地壳明显减薄, 莫霍面深度从 20 km 逐步减薄至 10 km 左右; 在岩石圈下部 50~70 km 深处存在一高速层, 速度为 8.2~8.3 km/s; 岩石圈厚度超过 100 km。在礼乐滩地区(11°N 附近), 地壳厚度约 26 km, 上、中地壳和下地壳厚度相当; 岩石圈厚 95 km 左右。向南进入南沙海槽(8°N), 地壳厚度变化不大, 地壳层等深线呈水平展布, 古俯冲带的痕迹已不明显, 反映陆—岛碰撞完成后挤压已停止, 或是已变成今天的仰冲带。从巴拉巴克海峡进入沙巴, 地壳厚度变化不大, 但岩石圈厚度达 100 km 左右, 说明沙巴地区岩石圈厚度稍有增大, 可能它是由增生楔发育而成的陆地, 南沙海槽的俯冲还未完全结束, 南沙地块与沙巴还未碰撞, 因此, 沙巴地区还未形成造山带, 故其岩石圈还比较薄, 厚约 75 km。在这段剖面之下, 软流层速度在 7.9~8.4 km/s, 厚度 190~205 km。

图 7 表示沿 114°E、深度 100 km 的 P 波速度结构剖面。剖面北起广东珠江口流域, 经南海北部陆架、陆坡上的西沙海槽(17°40'N)与盆西海岭、南海西南海盆(11°40'~14°20'N)、南沙群岛的永暑礁、尹庆群礁、安波沙洲、北康暗沙与南康暗沙、曾母暗沙, 至加里曼丹的尹兰山脉。剖面北部广东地区的地壳厚 30 km, 上、中地壳与下地壳的厚度相当; 岩石圈厚 90~95 km。在南海北部陆架上, 地壳厚度约为 28 km; 在南海西北海盆, 岩石圈下部 40~70 km 深处存在一高速层, 其速度在 8.2~8.3 km/s, 岩石圈厚约 90 km。在盆西海岭地区, 地壳厚度减薄, 在 15~24 km; 在西南海盆中, 地壳明显减薄, 莫霍面深度在 10 km; 这里岩石圈厚度 85~90 km。在南沙群岛地区, 地壳厚 23 km 左右, 上、中地壳厚, 下地壳薄。进入加里曼丹岛, 地壳加厚至 28 km, 岩石圈厚 70 km。岩石圈中, 速度随深度增加, 没有异常存在。在地质构造上, 这里是拉姜群沉积区, 为增生楔复理石沉积。这里地壳和岩石圈厚度不太厚, 可能是这里碰撞造山带还未达到高潮, 山不高, 因此地壳与岩石圈厚度还未增厚之故。

5 讨论

由上面穿过南海诸剖面所见, 南海岩石圈三维

结构上存在两个明显特征: 第一, 存在北西向速度结构。在 20 km 深度切面上^[20], 从红河流域到海南岛、西沙—中沙群岛地区, 到南部巴拉望岛和加里曼丹岛之间, 存在一速度 7.4~7.6 km/s 的低速带, 走向为北西向。在整个南海海盆地区, 速度为 7.6~8.0 km/s, 为高速区。在 40 km 深度切面上, 北从广东省雷州湾(110°E, 24°N), 向东南方向穿过南海和苏禄海至苏拉威西海(121°E, 4°N), 存在一条北西向低速带, 纵波速在 7.4~7.6 km/s (横波速度为 3.34~3.40 km/s); 而在其西南部, 在印支半岛经巽它陆架至加里曼丹岛, 速度大于 7.6 km/s (横波速度为 3.30 km/s)。在东北部, 从广东陆地经珠江口外的西南部, 在 19°N 处折向东, 在向东南直至吕宋岛, 存在一速度为 7.8~8.0 km/s 的高速带。在 50 km 深度上, 东部高速带速度稍有增加, 纵波速度在 8.15~8.6 km/s (为 3.34~3.42 km/s); 再其西南部出现一条低速带, 北从红河流域, 向东南方向穿过南海到婆罗洲的沙巴地区, 纵波速度为 7.95~8.0 km/s。在 60 km 至 100 km 深度上, 这种结构特征依然存在。为什么南海岩石圈中存在这一结构特征呢? 首先, 从区域构造上考虑, 这里存在 3 条主要断裂: 红河—莺歌海断裂、南海西缘断裂和西沙海槽断裂。红河—莺歌海断裂是北西走向断裂, 南海岩石圈中北西向低速带即沿此断裂展布。该断裂到海南岛南部后转为南北走向的南海西缘断裂和东西走向的西沙海槽断裂, 但岩石圈深部低速带则沿北西向穿过整个南海。在南海地区, 中生代末至新生代早期发生了神狐构造运动, 运动走向为 NE-SW 向, 拉张方向为 NW-SE 向。此次运动的西部边界为红河—莺歌海断裂, 和南海西缘断裂, 在此断裂的东北部, 拉张作用强烈, 其西南部拉张作用则相对较弱。因此, 在神狐运动中, 红河—莺歌海断裂为右旋走滑断裂。在此后(30~20 Ma 前)印支地块发生右旋转动时, 它变为左旋走滑断裂。因此, 笔者认为南海岩石圈中的北西向构造是和神狐运动及以后印支地块的左旋转动密切相关的。在神狐运动中, 南海地区沿北西—南东向拉张, 其西部边界——红河—莺歌海断裂和南海西缘断裂, 向东南方向穿过南海至沙巴方向遭受强烈拉伸, 岩石圈被拉开, 上地幔因减压而发生局部熔融, 沿北西向减薄了上覆岩石圈的厚度; 熔融的岩浆沿断裂上升到岩石圈中, 在岩石圈中形成北西向低速带。在此带的东部, 由于岩石圈拉张作用没有沿红河—莺歌海断裂

带强烈,因此,岩石圈中表现为相对高速带。当印度板块和欧亚板块碰撞后,亚洲大陆的上地幔中产生了向东南方向的流动,这一流动在上地幔和岩石圈下部产生局部熔融,因此出现北西向低速带。由于上地幔流动在平面上是不均匀的,因此,出现北西向低速和高速带相间的景观。由此可见,南海地区岩石圈及上地幔中存在北西向构造,是新生代南海构造运动的遗迹,至今还未消失。这也说明,在一次构造运动之后,它在岩石圈及上地幔中的影响在相当长的时间内还存在,南海地区发生在中生代末至新生代早期的神狐运动和发生在始新世末的南海运动,至今仍在岩石圈及上地幔中还可找到构造遗迹。

第二,岩石圈厚度存在明显差异。南海地区岩石圈结构的另一特征是在南海洋盆的岩石圈下部存在高速岩石层,并且洋盆下的岩石圈之厚度比大陆边缘厚,在海盆岩石圈下部的60~80 km深度上存在一高速层,速度为8.2~8.3 km/s。无论是中央海盆还是西北海盆与西南海盆,其下部岩石圈中均存在一高速岩石层,这是非常具有构造意义的特征;而且,南海洋盆岩石圈的厚度大于陆缘及华南与加里曼丹岛的岩石圈厚度。为什么南海这样的边缘海洋盆存在这种岩石圈结构呢?我们需要从南海新生代海底扩张及其构造演化历史的过程来考虑。根据Taylor和Hayes(1980)关于南海新生代海底扩张历史的讨论看,南海在新生代海底扩张过程中,扩张中心原来位于北纬20°北部陆缘与海盆交界(COB)附近,随着海底扩张的继续进行,南部的礼乐—东北巴拉望地块不断向南移动,扩张中心也不断南移,从而在扩张中心的南北两边不断产生新洋壳,形成了南海的南北对称式扩张。如果扩张中心不移动,那就不能形成对称式扩张。另一方面,从地震层析资料看,南海洋盆之下不存在地幔柱,表明在南海海底扩张时不可能从上地幔岩浆囊中得到生成大洋岩石圈的岩浆。那么生成南海大洋岩石圈的岩浆从那里来呢?我们猜想可能是从上地幔部分熔融的岩浆中得到。可以设想,在南海发生海底扩张时,大陆岩石圈被拉开,上地幔由于减压而发生部分熔融,部分熔融的岩浆不断上涌,在海底形成新的大洋地壳;由于不是从熔融的岩浆囊中上升的岩浆,其上升流量小,速度较慢,因此形成大洋地壳的速率也低,这与南海海底扩张是慢速扩张(扩张速率约为2.5 cm/a)是一致的。由岩石圈上地幔的部分熔融岩浆上升而形成了新的

大洋地壳,余下的超基性岩石之地震波速度较高,这一高速层组成了新生大洋岩石圈的底部,形成了大洋岩石圈下部的高速岩石圈层,也加厚了大洋岩石圈。这意味着南海洋盆的岩石圈可能是由新生的洋壳和原来的岩石圈上地幔组成,老岩石圈上地幔中部分熔融的基性岩浆上升生成新洋壳,剩下的超基性岩石组成了南海大洋岩石圈中的高速层;洋盆岩石圈之下的软流层之厚度变薄,与今日观测的结果一致。

ODP173航次在欧洲伊比利亚非火山型被动边缘外进行钻探^[2]发现:(1)地震剖面解释的所有断块是减薄的陆壳;(2)向海一边,陆壳厚度戏剧性地减薄为零,大陆被低角度拆离断层所破裂分离;(3)在Hobby高地处钻探取样,得到基底的铁镁质岩石,年龄为270 Ma,它可能是上侵到下地壳的地幔岩,或是这里地壳厚度减薄为零厚度而出露的老上地幔。这些铁镁质岩浆岩是在大陆张裂阶段从熔融地幔上来的,铁镁质岩浆岩通过结晶形成堆积和非堆积辉长岩,以后在中到下地壳深度上受到韧性剪切变形;(4)在Hobby高地,下地壳岩石在海底扩张之前被暴露几十百万年;(5)在1068和1070站位处的橄榄岩不像是大洋那样衰竭的橄榄岩,而似乎是从上冲带或下冲的大陆地幔来的。该地幔岩在地球化学和矿物学上显示是均匀的部分熔融(10%的熔融),它们在最后高温变形阶段由于熔融而局部或强烈渗露,产生碎斑状叶理。已有资料表明,这些从中洋脊来的渗露岩浆岩的组分范围在类似玄武岩示踪元素方面更富结晶的金云母和钛闪石组分;(6)1070站位基底样品显示,辉长伟晶岩上覆着被辉石充脉的蛇纹岩化橄榄岩。另外,地球物理资料表明这里存在洋壳,但是,该处没有上部洋壳岩石(玄武岩或席状岩墙);(7)从1070站位采集的基底样品之年龄为14 Ma,比从磁异常对比得的年龄小;(8)从5个站位与减薄陆壳或洋—陆过渡带(OCT)的站位处发现,基底岩石在同张裂熔融岩石组分方面是惊人的缺乏,这可定量地从陆缘在大陆分离过程中及向海底扩张的构造发育史是稳步发展的来解释。

由于大西洋的海底扩张速率和南海类似,都是慢扩张速率,而且,南海南北边缘也是非火山型被动大陆边缘,在构造类型上可与伊比利亚边缘对比。上述在伊比利亚边缘的钻探结果可用于南海陆缘的研究工作做参考。根据伊比利亚边缘钻探的结果可看

出,上地幔部分融熔达 10%,加上是慢扩张,因此,由上地幔部分融熔的岩浆可满足海底扩张对岩浆的需要,不一定必须存在地幔岩浆囊,即不需要地幔柱的存在。所以,笔者推测南海在不存在地幔柱的情况下是可以发生海底扩张的。另外,在南海海底扩张磁异常图上可看出,这里在海底扩张时发生过脊跳。如果这里存在地幔柱,它是不可能跳动的,只能用海底扩张岩浆来源于上地幔部分融熔来解释。因为一个地方上地幔部分熔融的岩浆用完之后,再不能为海底扩张提供岩浆了,此时必须从另一地方的上地幔部分融熔中提供岩浆,这样就发生脊跳现象,即扩张中心的跳动。

南海岩石圈厚度变化存在明显差异,在南海洋盆的岩石圈底部存在高速岩石层,并且洋盆下的岩石圈之厚度比大陆边缘厚,在海盆岩石圈下部的 60~80 km 深度上存在一高速层,速度为 8.2~8.3 km/s。无论是中央海盆还是西北海盆与西南海盆,其下部岩石圈中均存在一高速岩石层,这是非常具有构造意义的;而且,南海洋盆岩石圈的厚度大于陆缘及华南与加里曼丹岛的岩石圈厚度。为什么南海这样的边缘海洋盆存在这种岩石圈结构呢?我们需要从南海新生代海底扩张及其构造演化历史的过程来考虑。根据 Taylor 和 Hayes(1980)关于南海新生代海底扩张历史的讨论看,南海在新生代海底扩张

过程中,扩张中心原来位于北纬 20°的今日北部陆缘与海盆交界(COB)附近,随着海底扩张的继续进行,南部的礼乐—东北巴拉望地块不断向南运动,扩张中心也不断南移,从而在扩张中心的南北两边不断产生新洋壳,形成了南海的南北对称式扩张。如果扩张中心不移动,那就不能形成对称式扩张。另一方面,从地震层析资料看,南海洋盆之下不存在地幔柱,表明在南海海底扩张时不可能从上地幔岩浆囊中得到生成大洋岩石圈的岩浆。那么生成南海大洋岩石圈的岩浆从那里来呢?只能是从上地幔部分熔融的岩浆中得到。可以设想,在南海发生海底扩张时,大陆岩石圈被拉开,上地幔软流圈的部分熔融由于减压而增加,部分熔融的岩浆不断上涌,在海底形成新的大洋岩石圈;由于不是从地幔柱岩浆囊中上升的岩浆,其上升速度较慢,因此形成大洋岩石圈的速率也低,这与南海海底扩张是慢速扩张(扩张速率约为 2.5 cm/a)是一致的。由软流层上部的部分熔融岩浆上升而形成了新的大洋岩石圈,余下的超基性岩石之地震波速度较高,这一高速层加入到大洋岩石圈的底部,形成了大洋岩石圈底部的高速岩石圈层,也加厚了大洋岩石圈。这意味着南海洋盆的岩石圈之下的软流层之厚度变薄,与今日观测的结果一致。

由于大西洋的海底扩张速率和南海类似,都是慢扩张速率,而且,南海南、北边缘也是非火山型被

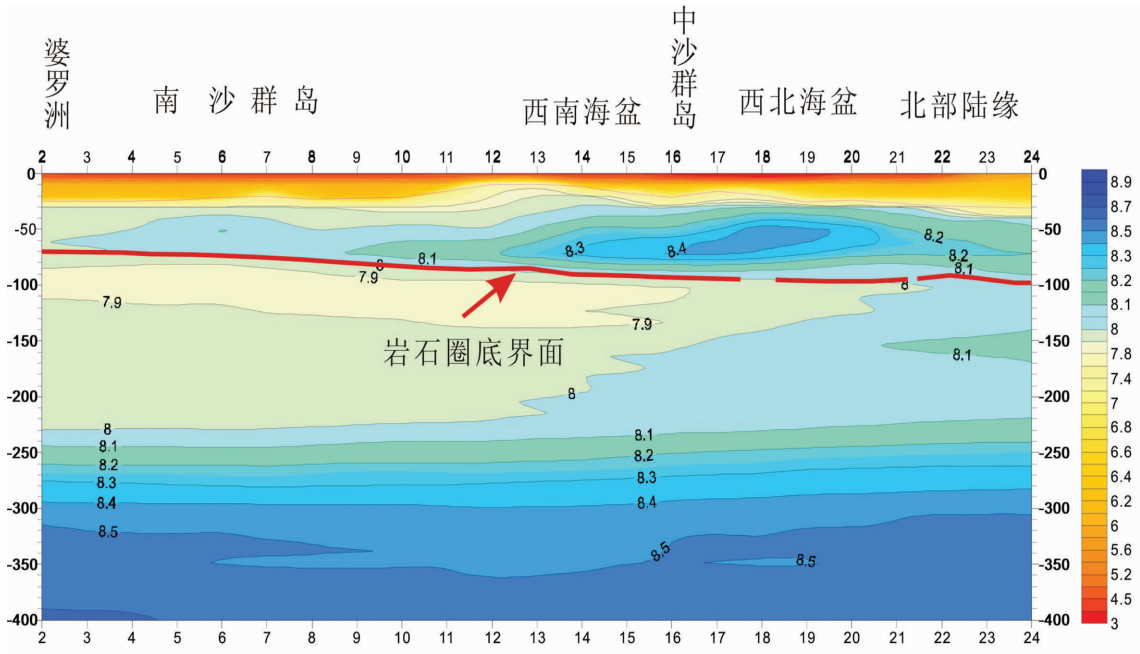


图 7 沿 114°E、深度 400 km 穿过南海的 P 波速度(km/s)结构剖面
Fig.7 P wave velocity profile with depth to 400 km along 114°E

动大陆边缘,在构造类型上可和伊比利亚边缘对比。上述在伊比利亚边缘的钻探结果可用于南海陆缘的研究工作做参考。根据伊比利亚边缘钻探的结果可看出,上地幔部分熔融达 10%,加上是慢扩张,因此,由上地幔部分熔融的岩浆可满足海底扩张对岩浆的需要,不一定必须存在地幔岩浆囊,即不需要地幔柱的存在。所以,笔者推测南海在不存在地幔柱的情况下是可以发生海底扩张的。另外,在南海海底扩张磁异常图上可看出,这里在海底扩张时发生过脊跳。如果这里存在地幔柱,它是不可能跳动的,只能用海底扩张岩浆来源于上地幔部分融熔来解释。因为一个地方上地幔部分熔融的岩浆用完之后,再不能为海底扩张提供岩浆了,此时必须从另一地方的上地幔部分熔融中提供岩浆,这样就发生脊跳现象,即扩张中心的跳动。如果我们的猜想得到地球化学方面的证实,那么,对像南海这样的边缘之海底扩张理论,需要做适当修改!

参考文献 (References):

[1] Ludwig W J. The Manila Trench and West Luzon Trough: Seismic-refraction measurements [J]. Deep Sea Research, 1970, 17 (3):27-45.

[2] Ludwig W J. Profiler-sonobuoy measurement in the South China Sea Basin[J].J.of Geophysical Research, 1979, 84:3505-3518.

[3] Yao Bochu, Wang Guangyu. Crustal structure of the South China Sea Basin[J]. Science in Chinese (Series B), 1983, 26(6):649-661.

[4] 姚伯初, 曾维军, 陈艺中, 等. 南海北部陆缘东部的地壳结构[J]. 地球物理学报, 1993, 37(1):44-53.

Yao Bochu, Zeng Weijun, Chen Yizhong, et al. The crustal structure in the eastern part of northern margin of the South China Sea[J]. Acta Geophysica Sinica, 1993, 37(1):44-53(in Chinese with English abstract).

[5] 蔡学林, 朱介寿, 曹学敏, 等. 东亚西太平洋巨型裂谷体系岩石圈与软流圈结构及动力学[J]. 中国地质, 2002, 29(3):234-245.

Cai Xueling, Zhu Jieshou, Cao Xueming, et al. The lithospheric and rheospheric structure of the East Asian and the Pacific riftng system and dynamics [J]. Geology in China, 2002, 29 (4):234-245 (in Chinese with English abstract).

[6] 薛万俊. 南海地貌图[C]//南海地质地球物理图集. 广州:广东科技出版社, 1987.

Xue Wanjun. Explanation for map of geomorphology [C]//Atlas of Geology and Geophysics of South China Sea. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1987(in Chinese).

[7] 鲍才旺. 南海地形图[C]//南海地质地球物理图集. 广州:广东科技出版社, 1987.

Bao Caiwang. Explanation for map of topography [C]//Atlas of

Geology and Geophysics of South China Sea. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1987(in Chinese).

[8] Ben-Avraham Z, Uyeda S. The evolution of the China basin and the Mesozoic paleogeography of Borneo [J]. Earth and Planet. Sci. Lett.,1973, 18:365-375.

[9] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Sea Basin [C]// Hayes D E (ed.). The tectonic and geologic evolution of Southeast Asia seas and islands,Geophysical Monograph, AGU,Washington, 1980, 23:89-104.

[10] 陈圣源. 南海磁力异常图[C]//南海地质地球物理图集. 广州:广东科技出版社, 1987.

Chen Shenyuan. Explanation for map of magnetic anomaly [C]// Atlas of Geology and Geophysics of South China Sea. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1987(in Chinese).

[11] 何廉声. 南海地质构造图[C]//南海地质地球物理图集. 广州:广东科技出版社, 1987.

He Liansheng. Explanation for map of tectonics [C]//Atlas of Geology and Geophysics of South China Sea. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1987(in Chinese).

[12] 吕文正. 南海中央海盆条带磁异常特征及构造演化 [J]. 海洋学报,1987, 9(1):69-78.

Lv Wenzheng. The characteristics of magnetic anomalies and its tectonic significance in central basin of South China Sea [J]. Acta Ocenologica Sinica, 1987, 9(1):69-78(in Chinese with English abstract).

[13] 姚伯初. 南海海盆在新生代的构造演化 [C]//南海地质研究. 武汉:中国地质大学出版社, 1991:9-23.

Yao Bochu. Tectonic evolution of the South China Sea in Cenozoic [C]//Geological Research of South China Sea. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1991:9-23(in Chinese with English abstract).

[14] 姚伯初, 曾维军, Hayes D E, 等. 中美合作调研南海地质专报 [M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1994.

Yao Bochu, Zeng Weijun, Hayes D E, et al. The Geological Memoir of South China Sea Surved Jointly by China and USA[M]. Wuhan:China University of Geoscience Press, 1994 (in Chinese with English abstract).

[15] 姚伯初. 南沙海槽的构造特征及其构造演化史[C]//南海地质研究. 武汉:中国地质大学出版社, 1996, 8:1-14.

Yao Bochu. Tectonic characterstics and evolution of the Nansha trough [C]//Geological Research of South China Sea, Wuhan: China University of Geoscience Press, 1996, 8:1-14 (in Chinese with English abstract).

[16] 姚伯初. 南海北部陆缘新生代构造运动初探[C]//南海地质研究. 武汉:中国地质大学出版社, 1993, 5:1-12.

Yao Bochu, The explanation of tectonic in north margin of South China Sea [C]//Geological Research of South China Sea. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1993, 5:1-12 (in Chinese with English abstract).

[17] 廖其林, 王振明, 李振江, 等. 福州-泉州-汕头地区地壳结构的爆炸地震研究[J]. 地球物理学报, 1986, 3(3):270-280.

Liao Qilin, Wang Zhenming, Li Zhenjiang, et al. The explosion seismic researching on the crustal structure of Fuzhou-Quanzhou-Shuantou [J]. Acta Geophysica Sinica, 1986, 3 (3):270-280 (in Chinese with English abstract).

[18] Jacobs J A. Deep Interior of the Earth[M]. Printed in Great Britain by Page Bros, Norfolk, Chapman & Hall, 1992.

[19] 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 Bochu. The crustal structure of the north margin of the South China Sea and its significance [J]. Marine Geology & Quaternary

Geology,1998, 18(2):1-16(in Chinese with English abstract).

[20] 姚伯初, 万玲, 等. 中国南海海域岩石圈三维结构及演化[C]//中国岩石圈三维结构丛书之八. 北京:地质出版社, 2006.

Yao Bochu, Wan Ling, et al. The Three-dimensional structure of lithosphere and evolution in the South China Sea[C]// In Series of Monographs on the Three-dimensional Structure of Lithosphere in China. Beijing:Geological Publishing House, 2006 (in Chinese with English abstract).

[21] Whitmarsh A, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, volume 173, 2001.

Variation of the lithospheric thickness in the South China Sea area and its tectonic significance

YAO Bo-chu, WAN Ling

(Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510075, Guangdong, China)

Abstract: Seismic tomography data obtained in the South China Sea area show that, from the Red River Mouth through the South China Sea and the Sulu Sea to the Celebes Sea, the lithospheric velocity is relatively low, and the lithospheric thickness varies in the range of 60-80 km, suggesting that the Red River-Yinggehai fault is a lithospheric fault. In the continental margins of the South China Sea the lithospheric thickness ranges between 70 and 80 km, whereas in the oceanic basin the lithospheric thickness is over 100 km. In addition, there exists a high-velocity layer with velocities of 8.2-8.4km/s in the depth of 60-80 km under the South China Sea basin. These phenomena are very interesting, hence the authors consider that, when the lithosphere experienced breakup before the seafloor spreading, the lithospheric upper mantle of the Mesozoic South China Sea was subjected to decompression by more than 10 kb. This means that lithospheric upper mantle could produce partial melting if there existed 0.1% water. If there existed 10% partial melting in the upper mantle, the melting basic igneous rock could form an oceanic crust 5 km in thickness. Therefore, the authors held that there existed no mantle plume under the South China Sea area. The authors' guess is a scientific guess concerning the formation of the Cenozoic South China Sea basin.

Key words: lithosphere; lithospheric layer with high-velocity; partial melting; seafloor spreading; a guess

About the first author: YAO Bo-chu, born in 1940, senior engineer, mainly engages in the study and survey of marine geophysics and regional geology and structure; E-mail:bcyao@163.net.