

# 南海北部陆缘西部的地壳结构

姚伯初 曾维军 陈艺中 张锡林

(地矿部广州海洋地质调查局)

D E 海斯 J 迪博尔德 P 布尔 S 斯潘格勒

(美国哥伦比亚大学拉蒙特-多尔蒂地质观测所)

**摘 要** 通过中美科学合作,在南海北部陆缘西部采集了一条地壳剖面,从阳江地区开始,经珠三拗陷、神弧-东沙隆起、西沙海槽至西沙-中沙台地。结果表明,珠三拗陷的地壳已减薄至23km,去掉新生代沉积,则只有15km厚。西沙海槽的地壳结构已具备裂谷特征,地壳强烈减薄,厚14.47km;下地壳有高速地壳层,层速度为7.1km/s,厚6.7km。说明在新生代,南海北部陆缘西部受过强烈拉张,地壳减薄;上地幔部分熔融物质沿强烈拉张处侵入到地壳底部,使其地表形成裂谷。

在西沙海槽的南部和北部,地壳结构差异很大,推测这里可能是由两个古老地块沿西沙海槽缝合起来。新生代早期的张性事件,又将这条古缝合线拉开,形成新生代裂谷——西沙海槽。

**关键词** 地壳结构 高速地壳层 缝合线 裂谷

## 前 言

1985年11~12月,我们和美国哥伦比亚大学拉蒙特-多尔蒂地质观测所在南海北部开展了科学合作,目的在于研究被动大陆边缘的地质地球物理特征及其发展史、沉积盆地的形成机制及生油史。在北部陆缘做了东、西两条地壳剖面,对东部剖面,笔者已在“南海北部陆缘东部的地壳结构”一文中讨论过,本文则主要讨论西部剖面的地壳结构特征。

本剖面从广东省阳江市的近海开始,ESP11位于珠江口盆地以北的北缘隆起上,ESP12位于珠江口盆地珠三拗陷内,ESP13位于神弧隆起上,ESP14位于陆坡上,ESP15位于西沙海槽北部斜坡上,ESP16位于西沙海槽中,ESP17位于西沙-中沙台地上(图1)。此剖面位于南海北部陆缘的西部,即穿越北部隆起、珠江口盆地、神弧隆起、西沙海槽、西沙-中沙台地等5个构造单元。因此,在地学上具有重要意义。图中11~17为扩展排列剖面的ESP的位置,并标出了珠江口盆地、西沙海槽的位置。神弧隆起位于ESP13处,与东沙隆起组成北东向神弧-东沙隆起带。西沙群岛和中沙群岛海域为西沙-中沙台地。

本文于1993-01-28收到,修改稿于1993-07-28收到。

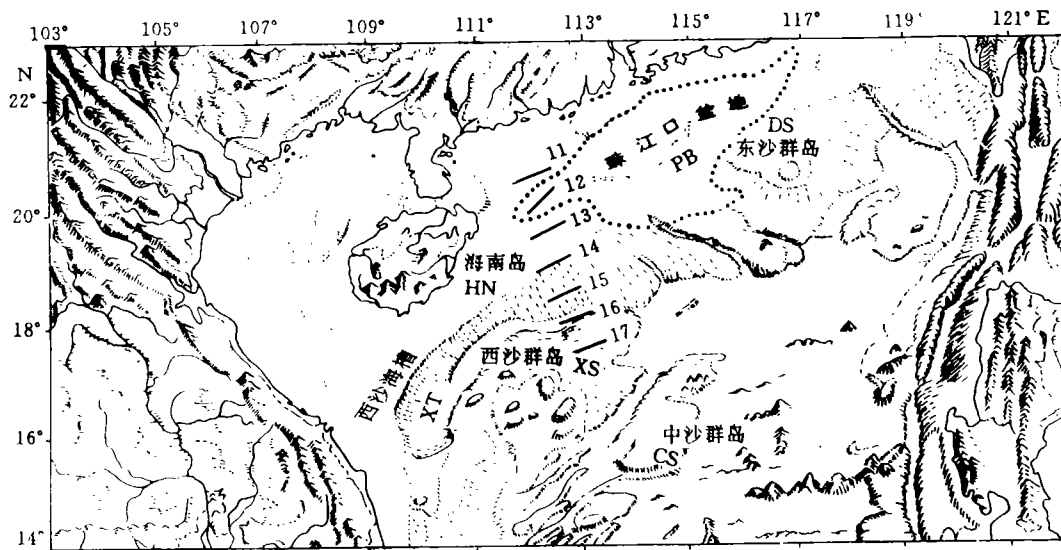


图1 西部剖面的位置

## 1 地壳结构特征

在广东大陆, 地壳厚30km; 至沿海地区, 地壳减薄至28km. 过了汕头-香港断裂带之后, 地壳又发生减薄. 图2表示ESP11处的地壳结构. 此处地壳可分为6层, 即层速度分别为1.7、2.0、2.3、3.1、5.9和6.4m/s; 层厚度分别为0.19、0.36、0.49、0.30、5.20和19.30km. 其中, 第二层为速度梯度层, 其顶界面速度为1.9km/s, 底界面速度为2.2km/s. 这种梯度可能是沉积压实作用造成的. 此处, 新生代沉积厚1.5km, 可分为4层. 根据其速度特征, 应为上第三系及第四系. 上地壳的层速度为5.9km/s, 厚5.2km. 根据层速度范围, 应为变质岩、火山岩和酸性侵入岩. 加上新生代沉积, 上地壳也仅有6.7km厚. 说明上地壳已发生较大的减薄. 下地壳层速度为6.4km/s, 厚19.3km. 这是一个巨厚的地壳层. 根据其速度范围, 应为基性岩. 这里地壳结构有两个明显特征, 一是上地壳薄, 下地壳厚, 二者相差3倍; 二是地壳有一定减薄, 厚25.9km, 比交东大陆地壳减薄2.1~4.1km. 莫霍面速度为8.2km/s, 属正常上地幔.

ESP12位于珠江盆地珠三坳陷内. 由于珠三坳陷为北东走向, 因此在做ESP12时, 也沿北东方向施工. 图3即表示此处的探测结果. 该处地壳有11个速度层, 层速度分别为1.8、2.1、2.6、3.0、3.3、3.6、4.0、4.6、5.0、6.0和6.8km/s. 它们的厚度分别为0.33、0.35、0.33、0.62、0.44、0.45、0.38、1.30、3.70、1.10和14.00. 在沉积物中, 有5个速度梯度层, 分别是第一、二、五、七、八层. 第一层顶界面速度为1.6km/s, 底界面速度为2.0km/s; 第

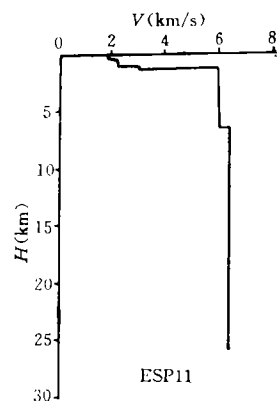


图2 ESP11处地壳结构

二层顶界面速度为2.0km/s, 底界面速度为2.2km/s; 第五层顶界面速度为3.2km/s, 底界面速度为3.5km/s; 第七层顶界面速度为3.9km/s, 底界面速度为4.2km/s; 第八层顶界面速度为4.4km/s, 底界面速度为4.8km/s. 这些速度梯度应是沉积物压实作用造成的. 在珠三拗陷内, 新生代沉积超过8km. 根据速度推测(姚伯初, 1982), 该处下第三系厚5.4km, 上第三系及第四系厚2.6km. 故可认为, 珠三拗陷是一个老第三纪拗陷. 上地壳的层速度为6.0km/s, 厚1.1km, 很薄; 下地壳的速度为6.8km/s, 厚14km. 莫霍面埋深23.1km, 莫霍面速度7.9km/s. 由上述讨论, 此处地壳结构具有下述特征: (1)地壳较薄, 仅有23km厚. 如果考虑新生代早期的张裂事件, 去掉新生代沉积, 则地壳仅有15km. 因此, 地壳伸长系数 $\beta=30/15=2$ . 说明地壳在张性应力场作用下, 产生了很大的减薄, 厚度减去一半. (2)沉积巨厚, 新生代沉积超过8km. 其中, 下第三系厚5.4km, 占总厚度的68%. 说明张裂事件发生后, 断陷很深. 因此, 当时水很深, 有利于油气源岩的沉积. (3)上地壳仅有1.1km厚, 而下地壳厚14km, 相差13倍. 这说明在张性应力场作用下, 地壳减薄是不均匀的, 上地壳减薄很大, 下地壳减薄很小. 还有一种可能性是, 下地壳受上地幔熔融物质下蚀, 厚度减薄为零. 6.8km/s地壳层是由上地幔熔融物质在地壳底部冷却形成的. 我们认为, 后一种可能性很大. 因为在区域张性应力场作用下, 不可能上地壳减薄很大, 而下地壳不发生减薄, 或减薄很小, 故下地壳也应被塑性地拉薄.

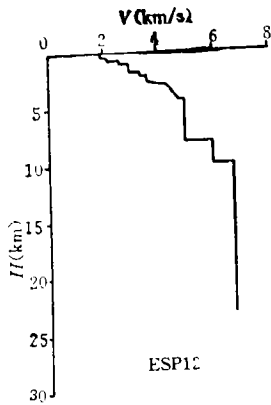


图3 ESP12处地壳结构

ESP13位于神弧隆起上, 图4表示该处的地壳结构. 其地壳可分为6层, 其层速度分别为1.8、2.4、2.5、5.3、5.6和6.7km/s; 厚度分别为0.6、0.3、0.44、1.25、4.55和21.34km. 因为新生代沉积只有1.34km, 很薄, 所以地壳没有速度梯度层. 上地壳分两层, 层速度为5.3和5.6km/s, 厚5.8km; 下地壳的层速度为6.7km/s, 厚21.34km. 莫霍面埋深28.5km, 地壳厚28km. 莫霍面速度为8.4km/s, 属正常地幔. 由上述分析可见, 该地地壳结构有下述特征: (1)地壳减薄很小. 广东大陆地壳厚30km, 沿海地区为28km. 神弧地区的地壳厚度与广东沿海地区相差不多. 如果不计新生代沉积, 地壳减薄也很小. (2)沉积层很薄, 仅有1.34km. 虽然分3层, 但速度小, 且很接近. 由此推测, 该处仅有中中新世后的沉积, 说明神弧隆起和东沙隆起一样, 是在中中新世后才为海水所淹没的. (3)上地壳薄, 下地壳厚, 厚度差3.7倍. 与珠三拗陷相比, 该地上、下地壳层的厚度差别不大, 可能其成因不同. (4)上地壳层的层速度低, 分别为5.3和5.6km/s. 我们推测, 5.3km/s地壳层应为古老沉积岩, 而5.6km/s地壳层为变质岩或酸性火成岩. 除厚度较小外, 该处的地壳结构和火山弧有相似之处.

ESP14位于神弧隆起之南的陆坡区. 图5表示该处的地壳结构. 其地壳可分为8层, 层速度分别为1.8、2.3、2.5、2.9、3.2、4.2、5.8和6.8km/s; 层厚度分别为0.10、0.37、0.25、0.43、0.56、1.1、1.6和21.76km. 地壳厚26.17km. 莫霍面速度为8km/s, 属正常上地幔. 该处新生代沉积有6层, 总厚度为2.81km. 根据其层速度分析, 可能有下第三系上部、上第三系和第四系. 上地壳层速度为5.8km/s, 厚度仅1.6km. 下地壳层速度为6.8km/s, 厚度为21.8km; 下地壳的厚度为上地壳的13.6倍, 二者相差悬殊. 这种地壳结构的成

成

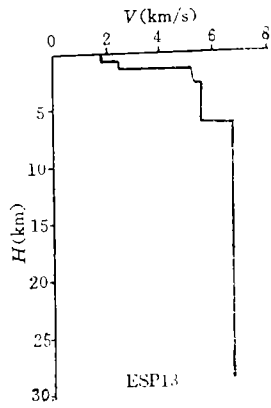


图4 神弧隆起上的地壳结构

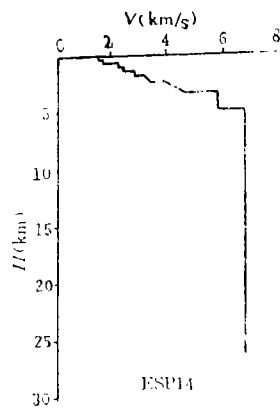


图5 ESP14处地壳结构

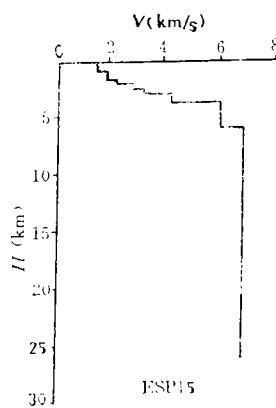


图6 ESP15处的地壳结构

因何在？很值得进一步研究。

ESP15位于西沙海槽北部边缘，图6表示该处的地壳结构。其地水深1050m。地壳可分为7层，层速度分别为1.9、2.3、2.9、3.3、4.3、6.0和6.9km/s。莫霍面速度为8.3km/s，属正常上地幔。层厚度分别为0.15、0.6、0.39、0.43、0.74、2.3和20.21km。该处新生代沉积有5层，厚度为2.31km。根据其层度分析，应包括下第三系上部、上第三系和第四系。上地壳很薄，仅有2.3km，层速度为6.0km/s，应为变质岩，或酸性火成岩；下地壳速度为6.9km/s，厚度巨大，为20.21km。下地壳厚度为上地壳的9倍。

在西沙海槽中心，我们做了ESP16，其结果如图7所示。其地水深2454m。地壳可分为8层，层速度分别为1.9、2.1、2.9、3.4、4.1、6.0、6.6和7.1km/s。莫霍面速度为8.2km/s，属正常上地幔。各层的厚度分别为0.49、0.33、0.31、0.5、1.52、1.35、3.27和6.7km。由上述分析可见，该处地壳结构有下述特征：（1）地壳很薄，厚14.47km。说明地壳减薄甚剧。如除去新生代沉积，则仅有11.32km。可见该地地壳的伸长系数 $\beta=30/11.32=2.65$

（2）该处新生代沉积厚3.15km，可分5层。其中，第三、第五层为速度梯度层，尤其是第五层，速度梯度大，达0.77km/s。由此可见，该处有下第三系上部、上第三系和第四系。说明该裂谷发生于老第三纪中期，可能是南海运动（始新世末）的产物。（3）上地壳很薄，其层速度为6.0km/s，厚1.35km。（4）下地壳也很薄，其层速度为6.6km/s，厚3.27km。（5）地壳下部有一特殊地壳层，其层速度为7.1km/s，厚6.7km。在此条地学断面的其他地方均未发现这一地壳层。我们在此处进行海磁测量，发现沿海槽有一磁力正异常带。该带东西延长300km以上。在海槽的西部，磁异常带宽20~50km，异常幅度大于50nT；在海槽的东部，磁异常带宽50~60km，幅度大于100nT。根据计算，此种异常应由基性或超基性物质沿断裂进入地壳，冷却时受反向磁化，从而产生条带状正磁异常。这与我们在这里观测的地壳结果是一致的，说明7.1km/s地壳层系由上地幔来的基性物质冷却而形成的。此种成因推测，我们已在“南海北部陆缘东部的地壳结构”一文中讨论过。

ESP17位于南海西北海盆西缘，西沙群岛东部，中沙群岛北部。其地水深1687m。图8显示了该处的地壳结构。由图可见，其地壳可分为6层，层速度分别为1.6、1.7、2.1、5.8、6.0和6.4km/s。每层厚度分别是0.09、0.16、0.16、1.12、14.95和5.63m。地壳厚22.11



图7 西沙海槽处的地壳结构



图8 ESP17处地壳结构

km, 莫霍面速度为8.2km/s, 属正常上地幔. 此处新生代沉积岩有3层, 厚0.41km. 其中, 第二层为速度梯度层, 其顶界面速度为1.6km/s, 底界面速度为1.8km/s. 上地壳有两层, 速度为5.8km/s和6.0km/s, 厚16.07km, 据其厚度大, 推测为古老沉积岩、变质层和酸性火成岩组成. 下地壳的层速度为6.4km/s, 厚5.63km. 据其厚度小, 推测为基性火成岩. 该处是西沙-中沙台地, 其地壳结构有下列特征: (1) 新生代沉积很薄, 且速度低, 说明是年轻的沉积. 在西沙群岛上钻探西永一井, 发现中新统之下为前寒武纪基底. 因此, 推测ESP17处的沉积为上第三系和第四系. (2) 上地壳未减薄, 其厚为16.07km, 层速度为5.8和6.0km/s. (3) 下地壳厚度小, 仅5.63km, 速度为6.4km/s. 说明在新生代早期张性应力场作用下, 下地壳有很大的减薄. 由此推测, 上下地壳之间的界面为滑脱面, 下地壳塑性减薄, 而上地壳厚度保持不变.

图9为本剖面上的地壳剖面图. 由图可见, 剖面上的地壳厚度是在变化的. 广东大陆地壳厚28~30km; 在珠三角内, 地壳减薄到23km; 至神弧隆起(ESP13), 地壳厚28.0km; 西沙海槽的地壳最薄, 仅14.47km; 至西沙-中沙台地, 地壳厚22.11km. 这种地壳厚度的变化, 一方面反映出新生代之前该处地壳厚度的变化, 更重要的是反映出新生代早期在张性应力场作用下南海北部陆缘地壳厚度的变化. 例如从区域构造看, 神弧隆起应是中生代燕山运动的火山弧, 当时地壳比现在厚. 在新生代早期, 受拉张应力作用, 使地壳厚度有所减薄, 但剩余厚度仍较大. 而珠三角和西沙海槽是新生代裂谷, 地壳明显减薄, 受上地幔的影响较大. 从整个剖面看, 地壳结构也有明显的变化, 从ESP11至ESP15, 上地壳薄, 下地壳厚. 可是, 越过西沙海槽之后, 地壳结构则变化了, 即在西沙-中沙台地上, 上地壳厚, 下地壳薄. 这种变化应归因于新生代之前的地壳结构之差异, 反映西沙海槽可能是一个区域构造的界线, 即可能是一条古缝合线.

图9中, 左边为深度标尺, 从海面起算. 华南地壳主要是指广东地壳的平均结构, 其速度为地壳平均速度, 单位为km/s. 其他为扩展排列剖面 ESP 处的地壳柱状图, 图中标数字为层速度, 垂直方向表示其埋深.

## 2 裂谷形成机制的探讨

本剖面通过两个新生代裂谷，即珠三拗陷和西沙海槽。珠三拗陷的沉积厚度达8km，裂谷深度5km。图10表示通过珠三拗陷的一段地震反射剖面，该剖面未穿过拗陷的最深部位。由图可看出，该拗陷是一个半地堑，由基底断块转动下落形成的。裂谷深4.5km，沉积总厚6.5km。该处的地壳结构在上面已讨论过。

图10中垂直轴为双程走时，单位为s。T<sub>0</sub>表示始新世末的一个不整合面，反映了一次强烈的构造事件。T<sub>g</sub>为新生代沉积基

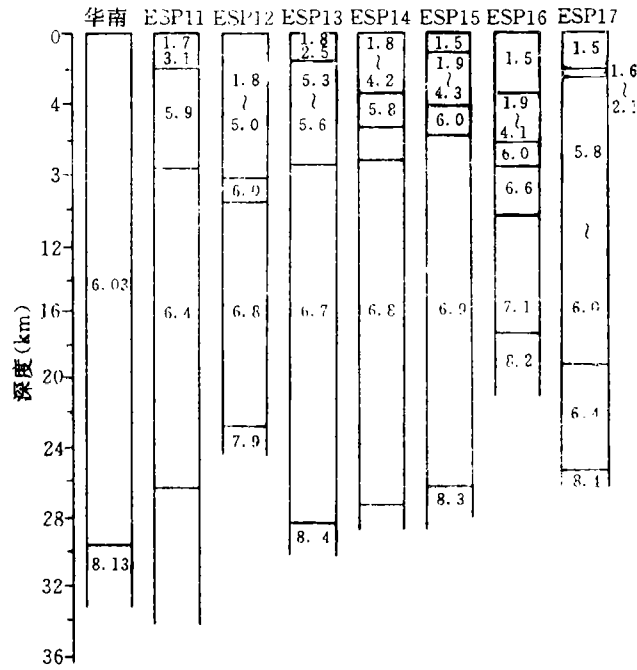


图9 西部剖面上的地壳柱状图

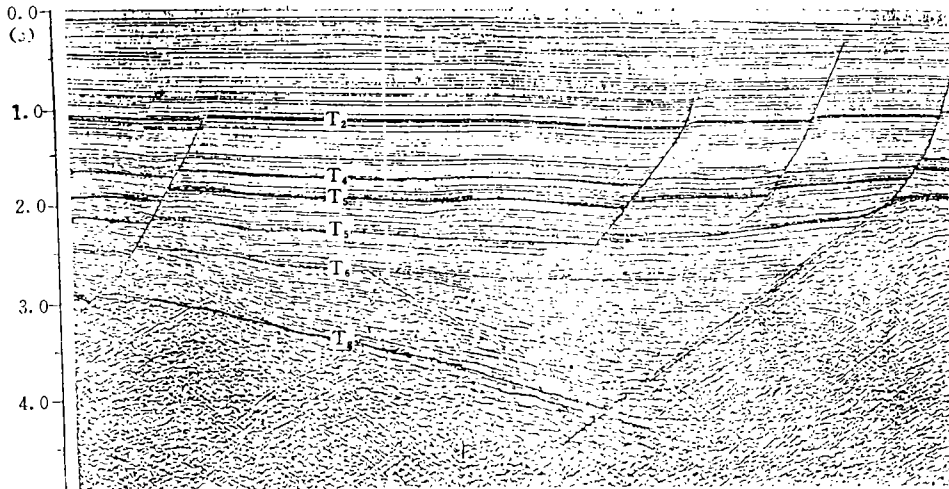


图10 穿过珠三拗陷的地震反射剖面

底，反映了中生代末至新生代初期的一次构造事件，是此次构造事件形成了珠三拗陷裂谷。

图11表示穿越西沙海槽的地震反射剖面。由图可看出，此海槽是一个地堑式裂谷，由南北相对倾斜的两条断层断开基底，基底断块沿断面下落而形成的。裂谷深2m，新生代沉积厚1.8km。此剖面位于西沙海槽东段，水深较大，为3300m。海槽北部为断阶带，断层倾角较小，呈阶梯状下降。南部断层较陡。

上述讨论了珠三拗陷和西沙海槽的地壳结构和沉积特征。表1综合了两处的地壳结构参

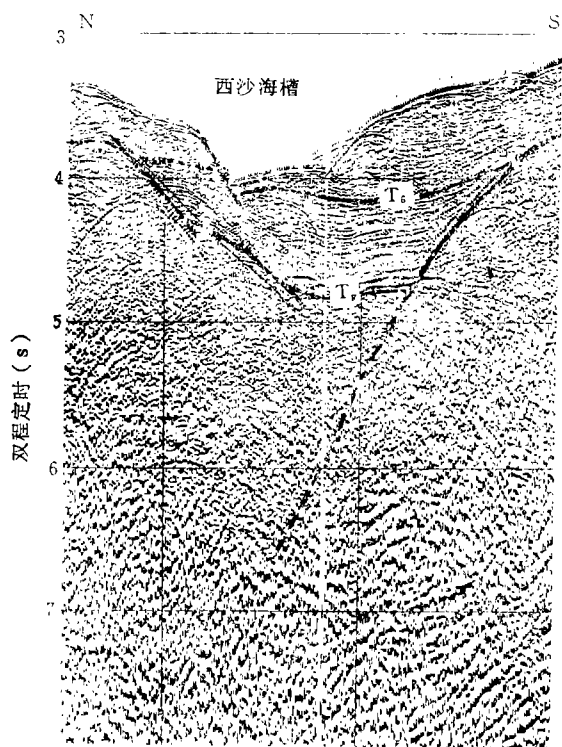


图11 穿过西沙海槽的地震反射剖面

数。表中速度单位为  $\text{km/s}$ ，厚度单位为  $\text{km}$ 。由表可看出，两处新生代沉积的厚度差异大，这主要是由于它们距物源区的远近不同所致。上地壳结构相似，皆很薄。下地壳则差异大，珠三拗陷下地壳的厚度大，西沙海槽的下地壳厚度小，且多一个高速地壳层。

关于大陆裂谷的形成机制，已有很多学者进行了探讨。对于珠三拗陷和西沙海槽裂谷，根据其地壳结构及沉积特征，现提出下述形成机制。在区域张性应力场作用下，大陆岩石圈的上地壳呈脆性，可发生断裂；下地壳呈塑性，可被拉伸；而岩石圈上地幔由于其组成物质不同，仍呈脆性，可发生拉伸断裂(图12a)。当区域张性应力继续作用时，上地壳被拉断，基底断块沿断面转动，在地表形完成地堑半地堑；下地壳被拉薄，整个岩石圈的厚度减小了，因而上地幔的压力也降低了，产生了部分熔融(图12b)。当区域张性应力场

表1 珠三拗陷和西沙海槽的地壳参数

地壳参数	沉积厚度 (km)	上地壳		下地壳		莫霍速度 (km/s)	地壳厚度 (km)
		速度 (km/s)	厚度 (km)	速度 (km/s)	厚度 (km)		
珠三拗陷	7.9	6.0	1.1	6.8	14	7.9	23.0
西沙海槽	1.63	6.0	1.52	6.6~7.1	9.97	8.2	14.5

进一步作用时，岩石圈的厚度进一步减小，上地幔的熔融物质越来越多，它们沿着岩石圈下部的断裂上升，至地壳底部(图12c)。这些熔融物质后来冷却，形成了今日我们观测到的高速地壳层。由于岩石圈而发生区域均衡调整，以及区域张性事件停止后的冷却沉降，使地表不断沉降，地表的地堑半地堑接受沉积。此后，由于沉积的负载作用，使断陷进一步沉降，形成了今日我们所观测到的结果。图12中，裂谷内的沉积未予表示，高速地壳层的体积也是示意的。

### 3 讨论

南海北部陆缘西部的地壳结构独具特色。在整个剖面上，地壳厚度及速度结构变化较大，尤其是西沙海槽的北部和南部差异更大。这反映在新生代早期张裂事件之前地壳结构的差异。由此推测，西沙海槽应是大地构造的重要界线，即它是华南地块和西沙-中沙地块的缝合线。这条缝合线向东延伸，可沿着今日的盆-坡边界展布。由于缝合线处岩石圈结构比较脆弱，在新生代早期张性应力场作用下，它又被拉开，在其东部产生了海底扩张，形成了南海小洋盆；其西部岩石圈未被拉开，形成了今日的西沙海槽。

中国科学院院士刘光鼎教授领导和指导了中美南海合作项目；广州海洋地质调查局教授级高工王光宇具体领导了本项目，陈邦彦总工程师、陈永清、张国楨、王复元、王一如等高级工程师为本项目作出了贡献，在此表示感谢。另外，美国拉蒙特-多尔蒂地质观测所的S Lewis博士/K Hegarty博士和T. Aitken先生为本项目作了具体贡献，在此一并表示感谢。

#### 参考文献

- 1 刘昭蜀, 杨树康, 黄慈流等. 南海地质构造与陆缘扩张. 北京: 科学出版社, 1988, 120~122
- 2 金庆焕, 陈邦彦, 吴进民等. 南海地质与油气资源. 北京: 地质出版社, 1989, 125~148
- 3 姚伯初, 何廉声. 南海北部大陆边缘上的声纳浮标测量(一). 海洋地质研究, 1982, 2(3): 11~23
- 4 姚伯初. 南海海盆在新生代的构造演化. 南海地质研究, 第三期, 广州: 广东科技出版社, 1991, 9~23
- 5 姚伯初. 南海北部陆缘在新生代的构造运动. 南海地质研究, 第五期, 武汉: 中国地质大学出版社, 1992,
- 6 陈圣源. 南海磁力异常图. 南海地质地球物理图集, 广州: 广东地图出版社, 1987.
- 7 姚伯初, 曾维军等. 南海北部陆缘东部的地壳结构. 地球物理学报, 1993, 37(1): 27~35
- 8 White N. Nature of lithosphere extension in the North Sea. *Geology*, 1989, 17, 111~114
- 9 Beaumont C. On the evolution of rifted continental margins: comparison of models and observations of the Nova Scotia margin. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1982, 70, 667~715
- 10 Cochran J R. A model for the development of the Red Sea. *AAPG Bull.*, 1983, 67, 41~69
- 11 Gibbs A D. Structural evolution of extensional basin margins. *J. Geol. London*, 1984, 141, 609~620
- 12 Jarvis G T. Sedimentary basin formation with finite extension rates. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1980, 48: 42~52
- 13 Keen C E. The dynamics of rifting: deformation of the lithosphere by active and passive driving mechanisms. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1985, 80, 95~120

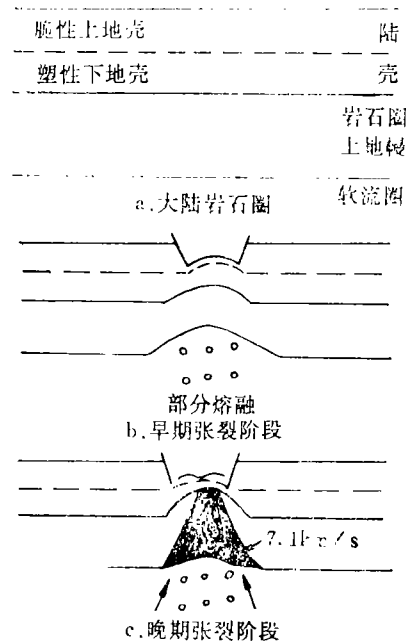


图12 裂谷发育史示意图