

# 中国东南陆缘的深部结构与动力学过程<sup>\*</sup>

王椿镛<sup>1)</sup> 陈运泰<sup>1)</sup> 邵占英<sup>2)</sup>

〔 1) 国家地震局地球物理研究所, 北京 100081  
2) 国家地震局地震研究所, 武汉 430071 〕

AN

**摘 要** 对我国东南陆缘地区的人工地震测深、大地电磁测深、重磁测量、地热测量、地学大断面编制以及天然地震的层析成像等大量深部构造研究结果作综合分析。地热异常、地壳内存在低速层和高导层、强烈地震频繁发生等现象说明,这一地区是现代构造运动的活动区。中国东南陆缘的现今应力场主压应力方向为 NWW - SEE,认为是菲律宾板块对欧亚板块的挤压,以及冲绳海槽的扩张等联合作用的结果。因此,这一地区地壳运动的驱动力是太平洋板块和菲律宾板块向欧亚板块推挤产生的。

**主题词** 深部构造 低速层 高导层 地球动力学 现代构造运动

## DEEP STRUCTURE AND ITS GEODYNAMICS IN SOUTHEAST CONTINENTAL MARGIN OF CHINA

Wang Chunyong<sup>1)</sup>, Chen Yuntai<sup>1)</sup> and Shao Zhanying<sup>2)</sup>

〔 1) *Institute of Geophysics, SSB. Beijing 100081*  
2) *Institute of Seismology, SSB. Wuhan 430071* 〕

### Abstract

The research results from the deep seismic sounding, magnetotelluric sounding, gravity survey, aeromagnetic survey, geothermal survey, compilation of the Geoscience Transect, and seismic tomography in the southeast continental margin of China are comprehensively analyzed in this paper. The geothermal anomaly, low velocity zone and high conductivity layer in crust, and frequent occurrence of strong earthquakes show that the study area is an active area of modern tectonization. The principal compressive stress trending NWW - SEE of modern stress field in the southeast continental margin of China is attributed to the joint action by the compression of the Philippine plate to the Eurasian plate, and extension of the Okinawa trench. The driving force of

本文 1997 年 7 月 8 日收到,同年 8 月 20 日收到修改稿

\* 国家自然科学基金委员会资助项目(49474207)成果的一部分,国家地震局地球物理研究所论著 97A0069。

the crustal movement in this area is generated by the compression of the Pacific plate and the Philippine plate to the Eurasian plate.

**Key words :** deep structure , low velocity zone , high conductivity layer , geodynamics , modern tectonization

## 1 引言

我国东南陆缘地区地处欧亚板块的大陆边缘,是大陆地壳向海洋地壳的过渡地带。这一地区位于欧亚板块、太平洋板块、菲律宾板块的交汇区,区域地质构造和地球物理场复杂,是现代构造运动的异常活动带<sup>[1]</sup>。

近 20 年来,我国东南陆缘地区进行了包括人工地震测深、大地电磁测深、重磁测量、地热测量,地学大断面的编制以及天然地震的层析成像等大量深部构造研究工作。人工地震测深剖面(图 1)有:永平—宁德剖面<sup>[2]</sup>、符离集—奉贤(HQ - 13)剖面<sup>[3]</sup>、云霄—安溪剖面<sup>[4]</sup>、屯溪—温州剖面<sup>[5]</sup>、福州—泉州—汕头剖面<sup>[6]</sup>、雷琼地区剖面<sup>[7]</sup>等。地学大断面有青海门源—福建宁德断面<sup>[8]</sup>和阿尔泰—台湾断面<sup>[9]</sup>。本文在我国东南陆缘地区已有工作的基础上,研究该地区地壳上地幔结构的主要特征,并讨论有关的动力学过程。

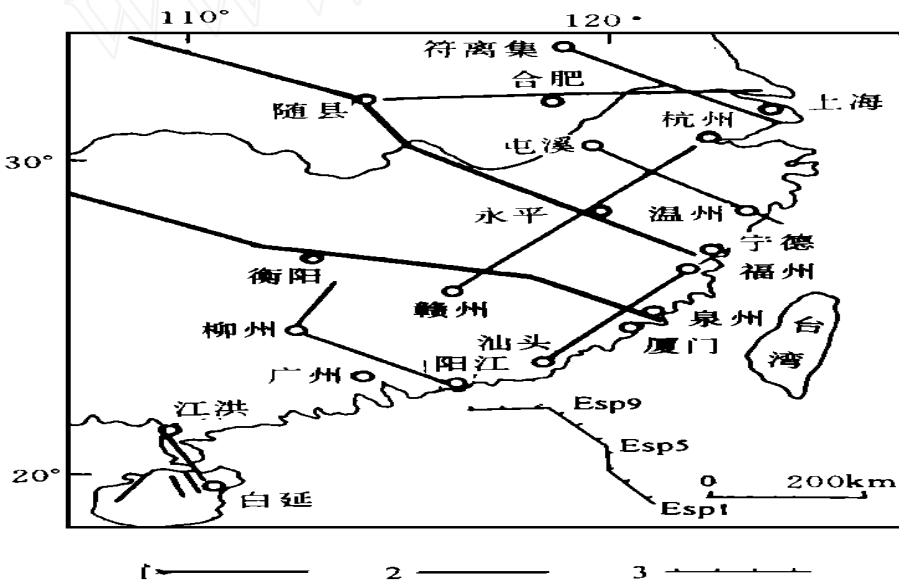


图 1 中国东南陆缘及其海域人工地震剖面位置分布图

1 地学大断面; 2 人工地震剖面; 3 南海北部深地震反射剖面

## 2 区域构造背景

我国东南陆缘地区在构造上属于扬子地台和华南褶皱系(图 2)。扬子地台分为下扬子拗陷和江南隆起,华南褶皱系分为武夷隆起和东南沿海褶皱带。属于下扬子拗陷的九江地区,其西与庐断裂带和大别隆起带相邻,东与九江断裂带和江南隆起带相邻;江南隆起带东南以常山—上饶断裂带与华南褶皱系相邻。武夷隆起带位于华南褶皱系的北东端部,东南以政和—大

埔断裂带与东南沿海褶皱带相连;东南沿海褶皱带位于福建东部,呈 NNE 向向北和向南延伸。该带为大片中生代火山岩所覆盖。燕山运动时期,太平洋板块向欧亚板块俯冲时,在华力西—印支拗陷基础上,发育了大规模的断陷和拗陷,造成巨厚的中生代沉积和巨大规模的火山喷发,形成中生代火山岩带。在巨厚的中生代火山岩堆积基础上,沿构造活动带发生强烈的区域变质和混合作用。

东南沿海褶皱带主要受 NE 或 NNE 向断裂构造所控制。较为发育的有泉州—汕头断裂,政和—海丰断裂,邵武—河源断裂等。在地震活动性方面,泉州—汕头断裂的地震活动最为强烈。自 1600 年以来,这一地区共发生 7 至 8 级强震 6 次,现今小震活动仍很频繁<sup>[11]</sup>,近期有 1994 年 9 月 16 日台湾海峡南部的 7.3 级地震。

台湾海峡是欧亚板块与太平洋板块和菲律宾板块碰撞时所产生的台湾岛弧与大陆山弧之间的前陆盆地,属新生代残留陆缘裂谷区<sup>[12]</sup>。海峡西部为闽浙中生代隆起区的扩张,东部则为台湾西部平原沉积建造的西向延续。台湾岛弧位于琉球岛弧与菲律宾岛弧的转折部位,是欧亚板块与西太平洋板块的衔接带,也是菲律宾板块与欧亚板块碰撞—仰冲带。台湾岛及其周围活动断裂主要有 NNE、近 NS 及 NW 向 3 组<sup>[13]</sup>,NNE 左旋高角度向西逆冲断裂(台东海岸山脉断裂带、花莲—台东断裂带、梨山断裂带、台北—高雄断裂带和台西平原断裂带)活动性最强,控制着台湾岛的地层分布。台中—屏东断裂带是台湾岛上最大的南北向构造。台湾地区是强烈地震高发区,冲绳海沟—纵谷裂谷是我国著名的地震活动带,震级大,频度高,地震分布集中。台湾及其邻近海域自有历史记载以来共发生  $M \geq 6.0$  的地震 200 多次。

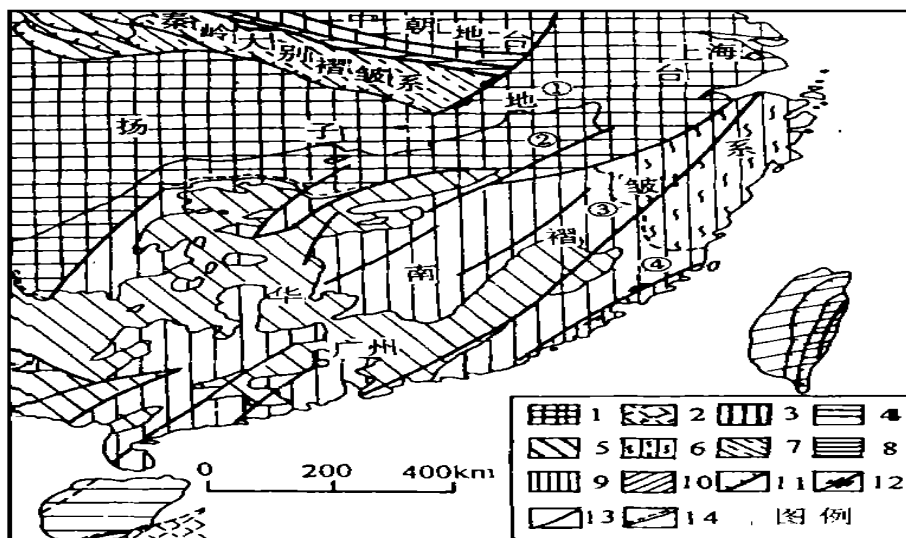


图2 中国东南陆缘地区区域地质构造示意图(引自任纪舜等,1990)

1. 前震旦纪准地台;2. 前震旦纪准地台(已裂解沉没,目前仅为大陆残块);3. 加里东褶皱带;4. 华力西褶皱带;5. 印支褶皱带;6. 强烈卷入加里东及印支、燕山造山作用的前震旦纪变质杂岩;7. 强烈卷入印支、燕山造山作用的前震旦纪变质杂岩;8. 强烈卷入印支及喜马拉雅造山作用的前震旦纪变质杂岩;9. 强烈卷入燕山造山作用的前古生代及前古生代变质杂岩;10. 强烈卷入喜马拉雅(台湾)造山作用的前古生代及中生代变质杂岩;11. 逆掩断层;12. 走滑断层;13. 断层(性质未分);14. 构造单元界线: 下扬子拗陷; 江南隆起; 武夷隆起; 东南沿海褶皱带。

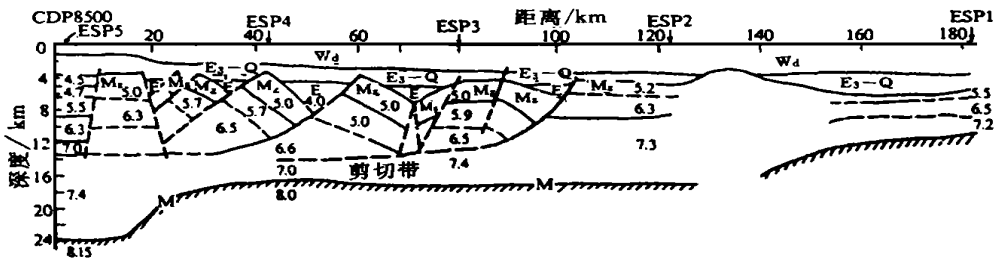
### 3 地壳上地幔结构

#### 3.1 人工地震剖面的速度结构

青海门源—福建宁德地学断面<sup>[14]</sup>的东段穿越扬子地台和华南褶皱系。华南褶皱系的地壳厚度为 30 km 左右,且在中地壳内存在 P 波速度为 5.70 km/s 的低速层,其地壳结构以政和一海丰断裂为界,断裂以西与下扬子拗陷相似,为 2 层(即上地壳和下地壳)结构,上地壳速度 5.10~6.10 km/s,厚度约 20 km;下地壳速度 6.20~6.80 km/s,厚度约 12~13 km;莫霍界面深度为 32~35 km。该断裂以东,地壳由高、低速相间的 3 层介质组成,厚度约为 29.5 km,平均速度为 6.33 km/s。地壳在约 13~16 km 深度上有一速度为 5.60 km/s 的低速层,其厚度约 3 km。莫霍界面深度为 27~34 km。上地幔顶部速度为 8.00 km/s,其速度说明该地区仍为大陆型地壳结构而不是陆—洋过渡区。台湾海峡的地壳厚度为 26~28 km;上地幔顶部速度为 7.60~7.80 km/s。岩石圈厚度在江西—福建西部地区为 90~100 km,在福建东部至台湾海峡为 60~90 km<sup>[6]</sup>。

台湾的地壳厚度在中部为 40 km 左右,西部平原和海峡地区为 30~33 km,属大陆型地壳。台东纵谷以东地壳厚度急剧减薄,至兰屿、火烧岛一带为 27 km,属过渡型地壳;再往东,进入菲律宾海盆,地壳约 9 km 厚,属洋壳型。

位于南海北部的中美联合调查的东部剖面北起广东大陆,经陆架(珠江口盆地)、陆坡(东沙群岛),直至深海平原(图 3)。这一剖面的北端 ESP9 位于陆架区,ESP8 - ESP2 位于陆坡上,南端 ESP1 在南海中央海盆地的北部边缘。地壳结构具有如下特征<sup>[15]</sup>:



### 3.2 电性结构

门源—宁德地学断面<sup>[14]</sup>显示,在扬子地台和武夷隆起带的地壳内部没有出现高导层,而在深度大于 33 km 的上地幔顶部普遍存在高导层。

福建东部电性结构的主要特征是,在中地壳存在电阻为  $5 \sim 30 \text{ m}$ 、厚度约  $5 \text{ km}$  的高导层;上地幔的高导层的电阻值为  $0.5 \sim 10 \text{ m}$ ,深度为  $60 \sim 90 \text{ km}$ <sup>[11]</sup>。

### 3.3 重力和航磁异常分布

布格重力异常可以划分 2 个 NE 向的重力场,即东南沿海重力梯级带和浦城—屏南负异常带。东南沿海梯级带斜贯于沿海地区,带宽 60~70 km,由东部的台湾海峡的正异常带和西部的福建沿海负异常带组成。布格异常零值线与福建海岸走向基本吻合。东部异常的最大重力值为  $+35.5 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$ ,西侧为  $-40 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$ 。浦城—屏南负异常带包括福建的大部分地区,东侧与东南沿海梯级带相连,异常值在  $(-6 \sim -25) \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$  之间。向东异常继续增大到  $+10 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$ 。

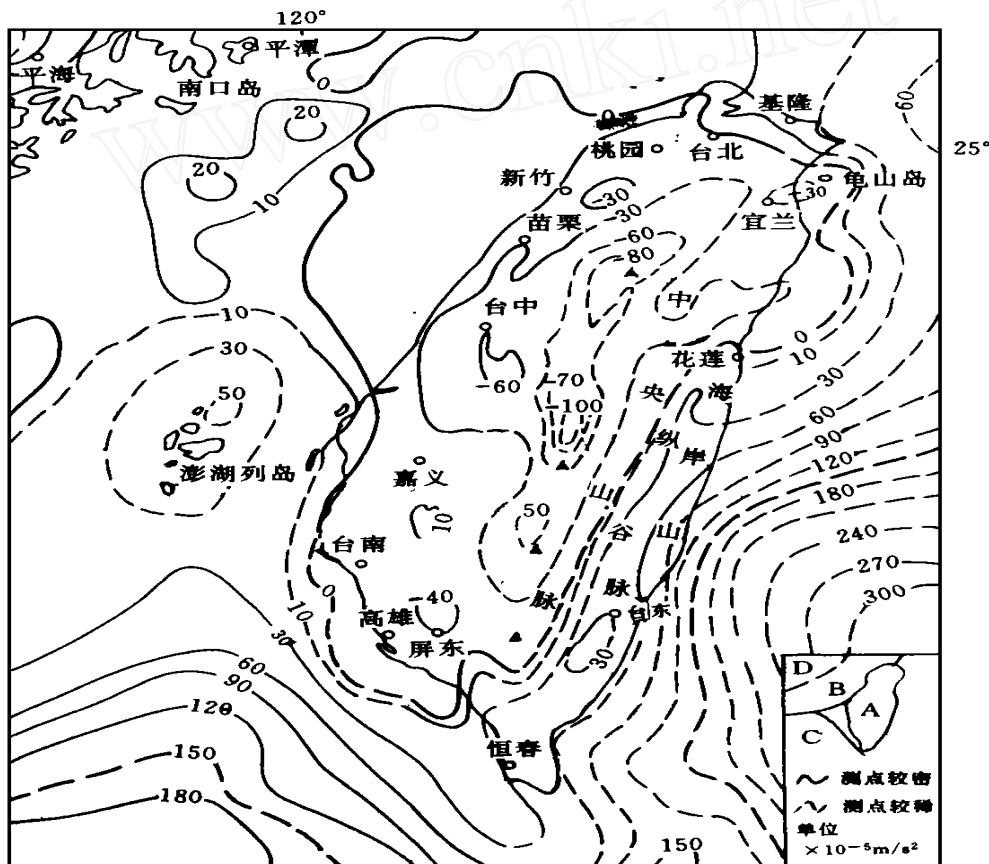


图 4 台湾及其周围区域布格重力异常分布图

A - Chang et al. ,1981 ;B - 中国科学院南海研究所 ,1981 ;

C- 地质矿产第二海洋地质调查大队,1987:D- 福建省地矿局物探队,1975

台湾海峡布格重力异常为 NNE 向狭长闭圈的高值正异常,福建地区东部为 NE 向,变化

范围为  $0 \sim -135 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ , 在晋江—嘉义断裂附近异常值有一 NW 向的明显扭曲。晋江—嘉义断裂以北, 异常走向与海岸线平行, 变化范围为  $0 \sim +10 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ , 以南由西向东从西岸的  $-20 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  增加到澎湖列岛的  $+20 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。台湾岛布格重力异常<sup>[16]</sup> 主轴方向也为 NNE 向, 与浅部构造一致。异常分布以纵谷为界, 以西为一近椭圆形闭合重力异常, 以东为正重力异常梯级带, 其值往东不断增大, 东南部最大达  $300 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。中央山脉主峰为台湾地区的最低值, 达  $-100 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。台湾海峡的地磁场分布特征与重力场基本相似, 晋江—嘉义断裂以北磁性基底和居里等温面深度分别比以南地区浅  $1 \sim 2 \text{ km}$  和  $3 \sim 4 \text{ km}$ <sup>[17]</sup>。台湾周边海域的磁异常分布也与重力异常大体一致<sup>[18]</sup>。

南海北部重力场的特征是: 以澎湖列岛、东沙群岛、中沙群岛至马来半岛的锡里布阿群岛一线为异常的分界线, 东部以高值布格异常、正的空间异常为特征, 均衡异常亦为正值。剖面北端的大陆沿海地区磁异常正负交替变化, 异常值一般为  $\pm 100 \sim 300 \text{ nT}$ , 极值达  $+480 \text{ nT}$  和  $-420 \text{ nT}$ 。异常梯度陡, 呈北东向条带状展布。单个异常宽  $20 \sim 30 \text{ km}$ , 长  $50 \sim 60 \text{ km}$ 。陆架地区在  $0 \sim -50 \text{ nT}$  的磁背景下发育若干局部的伴生异常、正异常和负异常, 异常值为  $\pm 50 \sim \pm 100 \text{ nT}$ 。陆架边缘至陆坡上部存在特别显著的磁异常, 该异常在  $50 \text{ nT}$  的背景上, 发育有  $130, 150, 200, 247 \text{ nT}$  的局部正异常, 组成宽  $50 \sim 100 \text{ km}$ , 长  $700 \text{ km}$ , 北东走向的正异常带。在陆坡中部和下部, 磁异常变化缓慢。在南海中央海盆, 磁异常呈正负相间, 异常强度大, 并由中心向两侧增强。

### 3.4 大地热流分布

根据门源—宁德地学断面<sup>[14]</sup>, 华南褶皱系平均大地热流值较高, 武夷隆起带为  $68.97 \text{ mW/m}^2$ , 东南沿海褶皱带为  $77.38 \text{ mW/m}^2$ 。闽浙沿海一带的热流值为  $70 \sim 90 \text{ mW/m}^2$ , 东海陆架、台湾西南至东沙群岛热流值大于  $60 \text{ mW/m}^2$ , 台湾岛及东邻海域、巴士海峡为  $80 \sim 180 \text{ mW/m}^2$ 。高热流值可以认为是地壳内具备部分熔融的条件和有热储存在, 这可能与现代岩浆活动有关。

云霄—安溪剖面<sup>[4]</sup> 揭示, 在地热活动区(漳州)下方的一准透镜状的低速异常结构, 可能是漳州热田的深部热源体, 其周边为断裂所围。

### 3.5 地震层析成像

根据福建和台湾地震台网共 37 个台站自 1980 年至 1987 年对 1 557 个地震的 P 波到时数据进行层析成像, 得到了台湾海峡及其邻近地区的 3 维速度结构<sup>[19]</sup>。在  $4 \text{ km}$  深度上, 速度分布以海峡中部为界, 其西侧以高速异常为主, 东侧以低速异常为主。从高速区的分布形态来看, 东南沿海的中生代火山岩带一直延伸到台湾海峡中部。低速异常区则与海峡东侧的新生代沉积有关。  $18 \text{ km}$  深度的速度图像表明, 在台湾海峡东南部有一东西向展布的高速区, 它对应于澎湖—北港隆起区, 区内主要分布更新世的玄武岩和凝灰岩。在  $30 \text{ km}$  深度上, 台湾岛及其 NE 向延伸的海域为相应低速区, 大部分地区

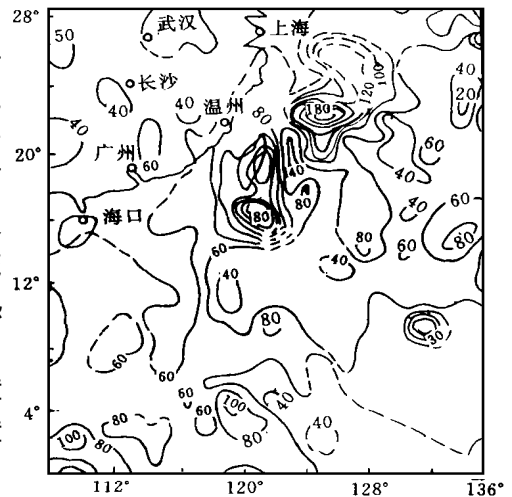


图 5 研究区域的大地热流分布图  
(单位:  $\text{mW/m}^2$ )

速度为  $7.30 \sim 7.50 \text{ km/s}$ 。海峡地区为高速区,速度大于  $8.00 \text{ km/s}$ 。由此还可以推断,海峡地区莫霍界面深度小于  $30 \text{ km}$ ,而台湾岛上则大于这一深度,这与深部地球物理探测的结果一致。从台湾海峡地区的地壳平均速度看,台湾海峡地壳仍属于大陆地壳的范围。在  $70 \text{ km}$  深度上,速度分布有明显的不同,台湾岛以东和以北地区为低速异常区,另外在西南部的台南附近局部的低速异常区,其它地区为高速区。低速异常区可能与菲律宾板块的作用有关。

## 4 讨 论

(1) 根据地球物理观测资料,武夷隆起带由南向北推覆,华南褶皱系的褶皱回返,其东侧东南沿海褶皱带为沟—弧—盆的演化形式。自老至新经历4期造山运动的迁移和增生、碰撞、拼贴过程,表现为由东南向西北的仰冲叠置形式。南海北部陆缘的地壳构造表明:从陆架、陆坡到深海平原地壳厚度呈4个台阶状减薄,反映地壳的拉张运动是以幕式方式进行的。在新生代早期,南海北部陆缘发生过3幕拉张,使陆缘地壳厚度呈3个阶梯减薄。第四幕拉张则开始海底扩张,产生了新的南海中央海盆地。在引张力场作用下结晶的上地壳显著拉伸减薄;在上地幔隆起的地壳伸展过程中,原有的下地壳也显著地伸展减薄。这一地区存在低速的异常上地幔结构<sup>[20]</sup>。

(2) 在东南沿海一带,特别是台湾地区,第四纪以来地壳构造运动仍相当剧烈,与菲律宾板块向西北方向强烈俯冲、碰撞和仰冲有关。这一地区热泉较多,是环太平洋热流带的一部分,它们的生成除与花岗岩的余热有关外,还与近期火山活动有关。高地表热流值的热源可能主要来自地幔低速层和板块的相互作用产生的热场效应。闻昆梯等<sup>[21]</sup>认为,东南陆缘地区的莫霍界面不是尖锐的间断面,而是由高、低速薄层相间组成的壳幔过渡带。岩石圈结构的横向不均匀性及地幔物质上涌使得地壳具有异常的热结构,是这一地区构造活动的深部原因。

(3) 我国东南陆缘地区地壳内存在低速层和高导层,强烈地震频繁发生,这些都是活动构造的标志。根据中国及其邻区周围板块作用力的研究<sup>[22]</sup>,中国东南陆缘的现今应力场主压应力方向为  $\text{NWW} - \text{SEE}$ ,被认为是菲律宾板块对欧亚板块的挤压,以及冲绳海槽的扩张等联合作用的结果。因此,这一地区地壳运动的驱动力是太平洋板块和菲律宾板块向欧亚板块推挤产生的。

致谢:李强、蔡晋安和刘瑞丰提供了台湾海峡地区地壳上地幔的3维速度结构,李桂银清绘了有关图件,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 曾融生,胡鸿翔,高世玉. 岩石圈下部的速度结构. 地球物理学报, 1984, 27, 31~41.
- 2 国家地震局永平爆破联合观测小组. 永平爆破与我国东南地区深部构造的初步研究. 见:国家地震局科技监测司编,中国大陆深部构造的研究与进展,北京:地质出版社,1988,140~153.
- 3 张四维,张锁喜,唐荣余,等. 下扬子地区符离集—奉贤地震测深资料解释. 地球物理学报, 1988, 31, 637~648.
- 4 熊绍柏,金东敏,孙克忠,等. 福建漳州地热田及其邻近地区地壳深部构造特征. 地球物理学报, 1991, 34, 55~63.
- 5 熊绍柏,赖明惠,刘宏宾. 屯溪—温州地带岩石圈结构与速度分布. 见:东南大陆岩石圈结构与地质演化,北

- 京:冶金工业出版社,1993,250~256.
- 6 廖其林,王振明,王屏路,等.福州—泉州—汕头地区地壳结构的爆破地震研究,地球物理学报,1988,31,270~280.
  - 7 林中洋,胡鸿翔,朱良保,等.雷琼地区地壳结构研究初步结果.见:海南岛北部地震研究文集,北京:地震出版社,1988,127~139.
  - 8 林中洋,蔡文伯,陈学波,等.青海门源至福建宁德地质断面说明书.北京:地震出版社,1992.
  - 9 袁学诚,左曼,蔡学彬,等.华南板块岩石层构造与地球物理.见:八十年代中国地球物理学进展,北京:学术书刊出版社,1989,243~249.
  - 10 任纪舜,陈廷愚,牛宝贵,等.中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿.北京:科学出版社,1990,67~72.
  - 11 廖其林,王振明,刘宝诚,等.中国福建—台湾海峡地区地球物理特征与地震活动性的研究.见:陈运泰等主编,中国固体地球物理学进展.北京:海洋出版社,1994,107~112.
  - 12 郭令智.论现代海沟岛弧系和海沟弧形山脉系的形成和演化.福建地质,1997,4,25~50.
  - 13 吴大铭,吕际平.台湾现代构造.见:台湾地质调查所汇刊,1976,25.
  - 14 王椿镛,林中洋,陈学波.青海门源—福建宁德地质断面的综合地球物理研究.地球物理学报,1995,39,590~598.
  - 15 姚伯初,曾维军,陈艺中,等.张性应力场作用下的岩石圈变形.见:陈运泰等主编,中国固体地球物理学进展.北京:海洋出版社,1994,190~199.
  - 16 刘光夏,赵文俊,任文菊,等.台湾地壳构造的三维重力正演研究.地震学报,1992,14,316~324.
  - 17 中国科学院南海海洋研究所和福建省海洋研究所台湾海峡课题组.台湾海峡西部石油地质地球物理调查研究.北京:海洋出版社,1989,8~23.
  - 18 胡锦涛,卢世民.台湾近海的磁力异常.海域地质调查,1980,210~239.
  - 19 姚伯初,何廉声.南海北部大陆边缘下的异常上地幔.海洋地质与第四纪地质,1985,5,65~72.
  - 20 李强,蔡晋安,林树,等.台湾海峡地区的地震层析成像,中国地球物理学会年刊.北京:地震出版社,1990,70.
  - 21 闻昆娣,朱振宇,章云林,等.中国东南陆缘地区上地幔顶部速度结构特征.见:陈运泰等主编,中国固体地球物理学进展.北京:海洋出版社,1994,81~90.
  - 22 汪素云,许忠淮,俞言祥,等.中国及其邻区周围板块作用力的研究.地球物理学报,1996,39,764~771.