

# 华南岩石圈三维结构

袁学诚 华九如

(中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

**摘要:**从穿过华南陆块的 6 条 P 波地震层析剖面出发,综合引用海量出版物中部分成果,对华南岩石圈三维结构作了初步探讨。以川湘黔裂陷槽和钦杭断裂为界,可以将华南岩石圈分成三大部分。在钦杭断裂东南为华夏岩石圈。它是东南亚西太平洋低速带的一部分,它与东南亚西太平洋低速带的其他地区的共同特点是它们的岩石圈地幔都受到软流圈物质上升而被改造。部分地区幔源物质侵入地壳,形成丰富的矿藏。川湘黔裂陷槽以西的地区为上扬子岩石圈。它在地表是一个热块体,但在深部有延伸超过 200 km 的高速基底。上扬子岩石圈受到其西攀西地幔柱的改造,在壳幔过渡带产生峨眉山岩浆房,在古生代末曾引发玄武岩的大面积喷发,至今仍在滇西留有岩浆房,并产生丰富的热泉。在川湘黔裂陷槽与钦杭断裂之间的是中扬子岩石圈。中扬子在地表是一个冷块体,在湘中实测热流值低到小于  $20 \text{ mW m}^{-2}$ ,根据热流值计算得到的岩石圈厚度达到 300 km。具有低速、低电阻率特征。根据大地电磁测深得到的结果也与地热流计算得到的相似。

**关键词:**华南岩石圈;扬子岩石圈;华夏岩石圈;川湘黔裂陷槽

**中图分类号:** P313.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2011)01-0001-19

## 1 华南陆块

华南陆块由扬子及华夏等两个陆块组成(图 1)。

通常认为扬子陆块是一个克拉通。其前寒武纪基底出露在西部的康滇地轴和东部的江南古陆,以及零星分布在湖北黄陵等地。从震旦纪以来沉积稳定,岩性为砂岩、页岩及碳酸盐岩等,多为整合或假整合,岩相变化不大。

美国地质学家 Glabau 认为散布在浙江、福建等沿海地区的前寒武纪变质岩石是一个古老陆块的基底,在 1924 年将它命名为华夏古陆(Cathaysia)。但自那时以来数十年研究工作中,对它的构造属性众说纷纭。如:地槽褶皱带、中生代造山带、地台活化区、大陆边缘海、沟弧盆体系等。根据最新研究成果,趋向于它是南华期形成的陆块,又经裂解,在加里东期与扬子陆块碰撞拼合。

扬子与华夏两陆块之间的分界线是绍兴—鹰

潭—宜春—郴州—藤县—北海断裂,或称为钦—杭结合带,是一个加里东拼接带<sup>[1]</sup>。华南地区详细构造划分请见图 1<sup>[2]</sup>。

最近在 Bird<sup>[3]</sup>提出的全球板块构造新模型中对华南构造属性和构造单元划分提出了新的见解。他从板块必需具有刚性的前提出发,对全球板块作了重新划分。与中国传统大地构造划分相比,Bird 的扬子板块包括传统的中扬子、华夏和其毗邻的边缘海。他不但不认为上扬子是一个华南最稳定的地区,而将它划为造山带。

## 2 华南地区的地学断面及 P 波地震层析成像

有 4 条国际岩石圈委员会全球地学断面穿过或深入华南地区。它们是国际岩石圈委员会地学断面第 14 号青海门源—福建宁德断面<sup>[4]</sup>,第 15 号内蒙喀喇沁旗—湖北随县断面<sup>[5]</sup>,第 16 号云南遮放—马龙

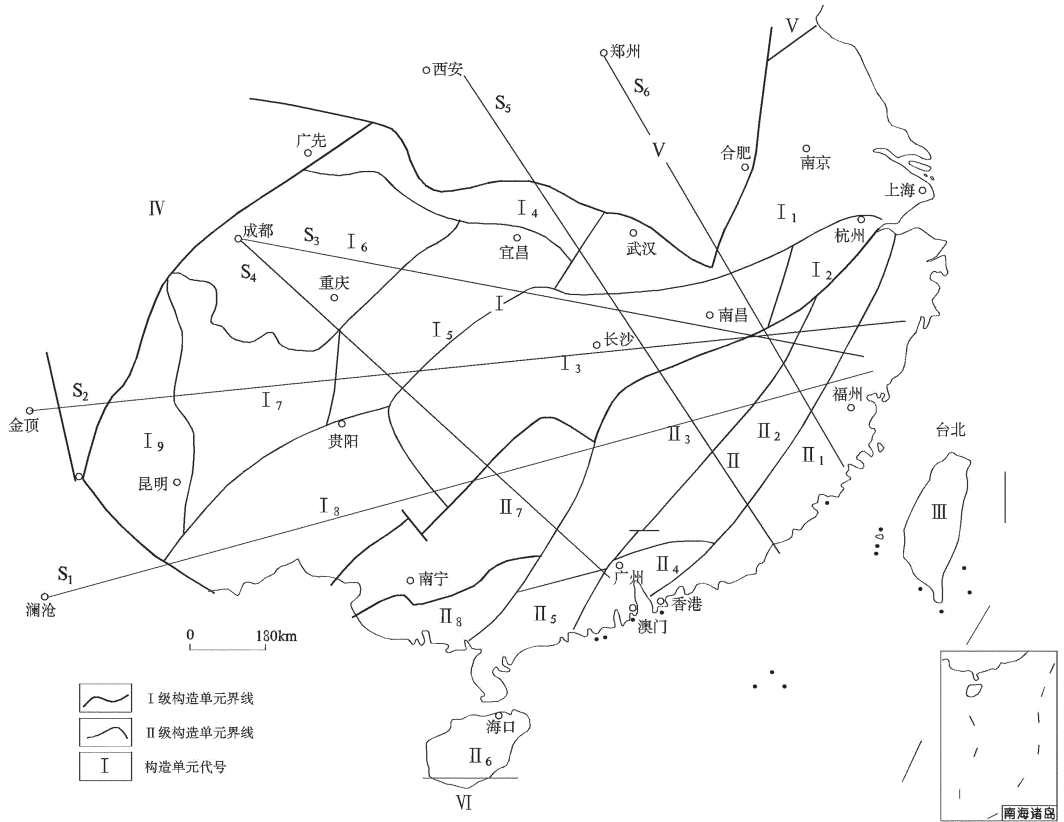


图1 南华地区构造单元划分<sup>[2]</sup>及地震层析剖面位置

I—扬子陆块；I<sub>1</sub>—下扬子地块；I<sub>2</sub>—浙西地块；I<sub>3</sub>—江南地块；I<sub>4</sub>—龙门山-大巴山陆缘活动带；I<sub>5</sub>—八面山陆缘海盆；I<sub>6</sub>—四川凹陷；I<sub>7</sub>—黔东-滇东海盆；I<sub>8</sub>—右江裂陷槽；I<sub>9</sub>—攀西裂谷；II—华夏陆块；II<sub>1</sub>—东南沿海大陆边缘活动带；II<sub>2</sub>—武夷隆起区；II<sub>3</sub>—武功山-诸广山褶皱造山带；II<sub>4</sub>—粤中凹陷；II<sub>5</sub>—云开隆起；II<sub>6</sub>—琼中裂陷槽；II<sub>7</sub>—湘中-大瑶山隆起；II<sub>8</sub>—钦州裂陷槽；III—台湾活动带；IV—松潘-甘孜活动带；V—昆仑-秦岭活动带；VI—南海盆地；S<sub>1</sub>-S<sub>6</sub> 地震层析剖面位置

Fig.1 Structural division of South China<sup>[2]</sup> and positions of the seismic tomographic profiles

I—Yangtze block; I<sub>1</sub>—Lower Yangtze block; I<sub>2</sub>—West Zhejiang block; I<sub>3</sub>—Jiangnan block; I<sub>4</sub>— Longmenshan—Dabashan epicontinental mobil belt; I<sub>5</sub>—Bamianshan epicontinental sea basin; I<sub>6</sub>—Sichuan depression; I<sub>7</sub>—East Guizhou—East Yunnan sea basin; I<sub>8</sub>—Youjiang rifting depression; I<sub>9</sub>—Panxi rift; II— Cathaysia block; II<sub>1</sub>—Southeast coast continental margin mobile belt; II<sub>2</sub>—Wuyi uplift area; II<sub>3</sub>—Wugongshan—Zhuguangshan fold orogen; II<sub>4</sub>—Central Guangdong depression; II<sub>5</sub>—Yunkai uplift; II<sub>6</sub>—Central Hainan rifting depression; II<sub>7</sub>—Central Hunan—Dayaoshan uplift; II<sub>8</sub>—Qinzhou rifting depression; III—Taiwan mobile belt; IV—Songpan—Ganzhi mobile belt; V—Kunlun—Qinlin mobile belt; VI South China Sea basin; S<sub>1</sub>-S<sub>6</sub>: Position of the seismic tomographic profiles

断面<sup>[6]</sup>和第21号北冰洋—欧亚大陆—台湾断面<sup>[7]</sup>。

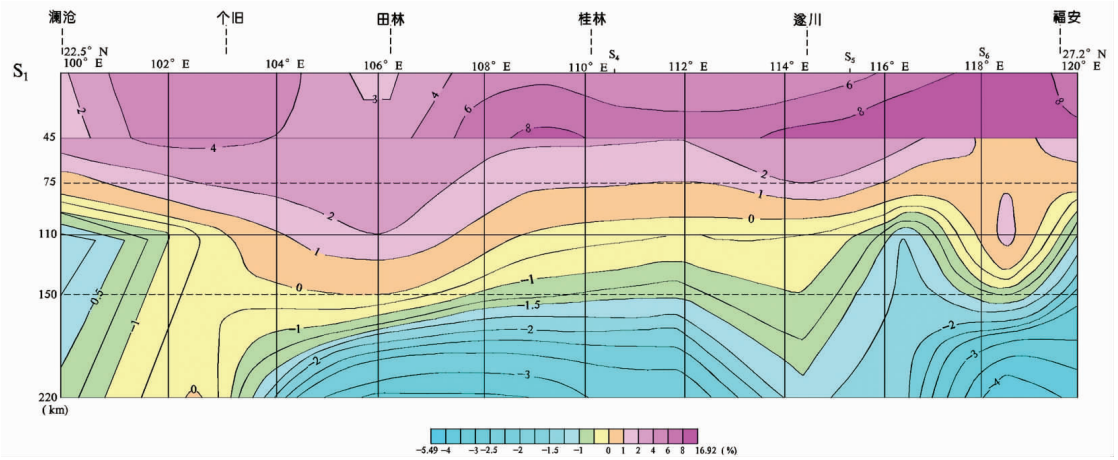
北冰洋—欧亚大陆—台湾断面是由中国两岸的地质工作者和俄罗斯、澳大利亚的地质、地球物理学家合作完成的地质断面。断面西起北冰洋的斯瓦尔巴群岛，经巴伦支海、东欧陆块、乌拉尔山、西西伯利亚盆地、新疆陆块、青藏高原、华南陆块及台湾，终止于台湾以东的太平洋内。

华南陆块构造复杂、矿藏丰富，是北冰洋—欧亚大陆—台湾地质断面试图重点剖析的一个重要地区。在测制地质断面时，为了对华南岩石圈的深部结构有更全面的理解，在地质断面的毗邻地区加测完成6条P波地震层析剖面。剖面编号及其起止点分

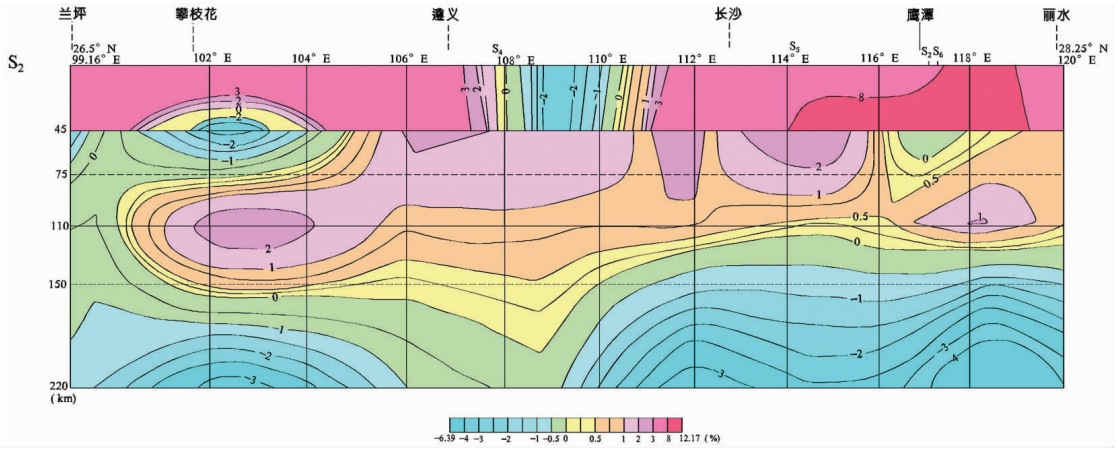
别为：S<sub>1</sub> 云南澜沧—福建福安、S<sub>2</sub> 云南兰坪—浙江丽水、S<sub>3</sub> 四川成都—浙江泰顺、S<sub>4</sub> 四川成都—广东广州、S<sub>5</sub> 广东潮州—陕西洛南以及 S<sub>6</sub> 福建泉州—河南郑州(图1)。迫于繁重的断面施工以及由此带来的其他事务，剖面完成后，对这6条剖面一直没有来得及作深入的解释和研究。但这些资料，犹如沉船中搭载的瑰宝，始终在海底发着光芒。今天进一步研究华南地区岩石圈构造，给我们带来许多有益的启示。

这6条地震层析剖面列举如下：

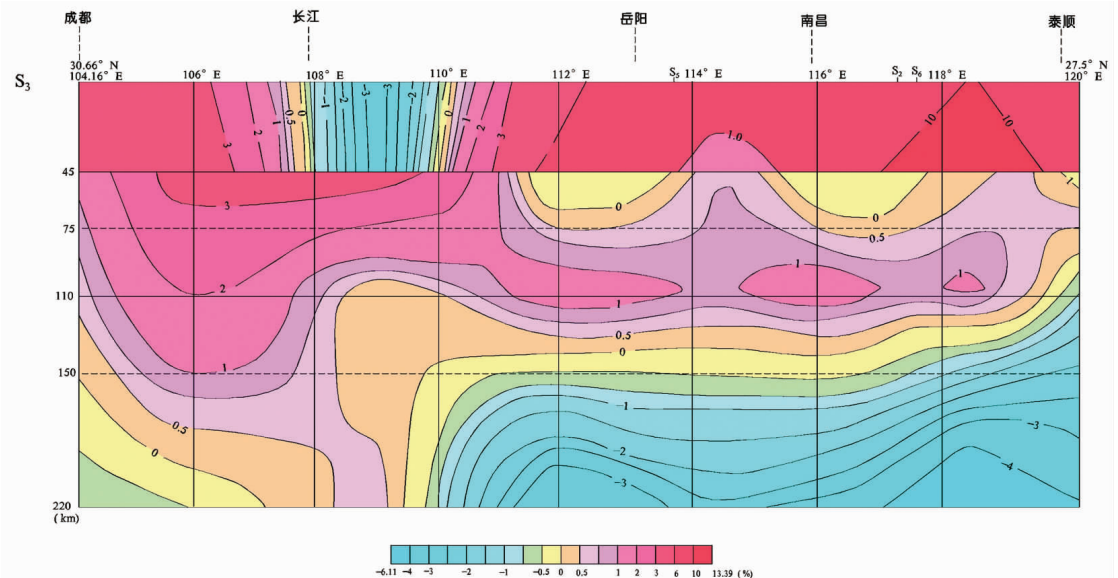
根据剖面数据，将它们投在深度为0 km, 20 km, 45<sup>-</sup> km, 45<sup>+</sup> km, 100 km, 110 km, 150 km 及 220 km 等平面上，绘成8个切片。深度为0 km 的切片



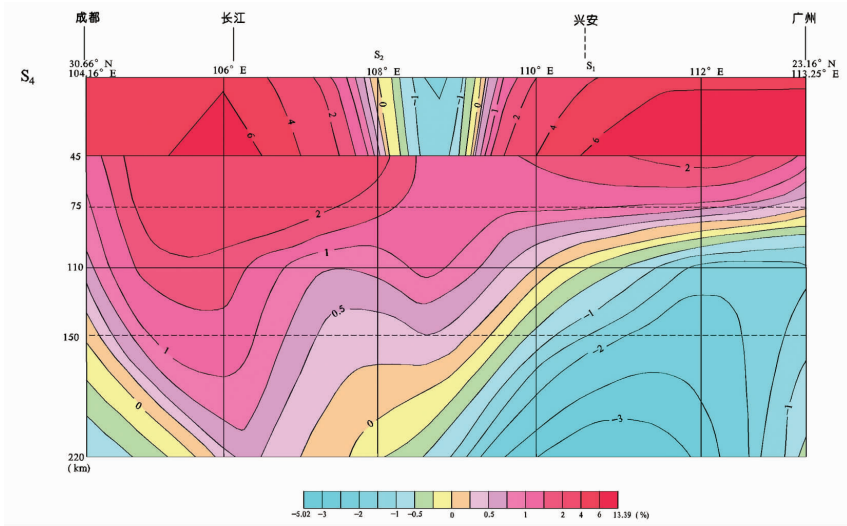
S<sub>1</sub>(云南澜沧—福建福安)地震 P 波成像



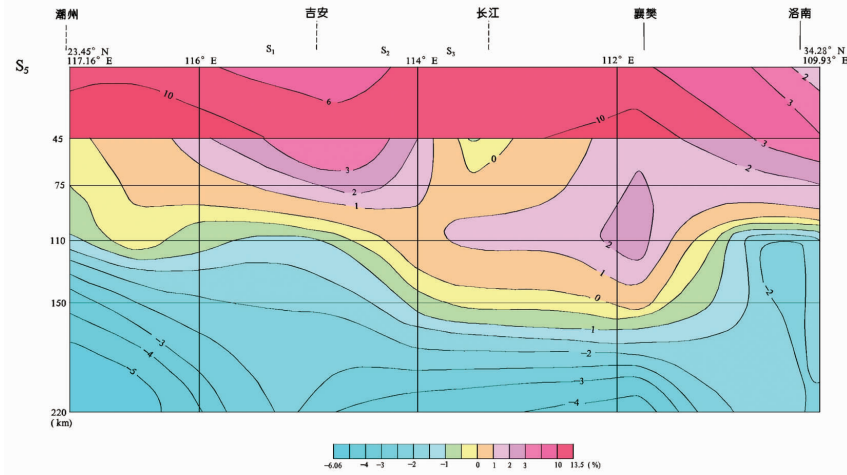
S<sub>2</sub>(云南兰坪—浙江丽水)地震 P 波成像



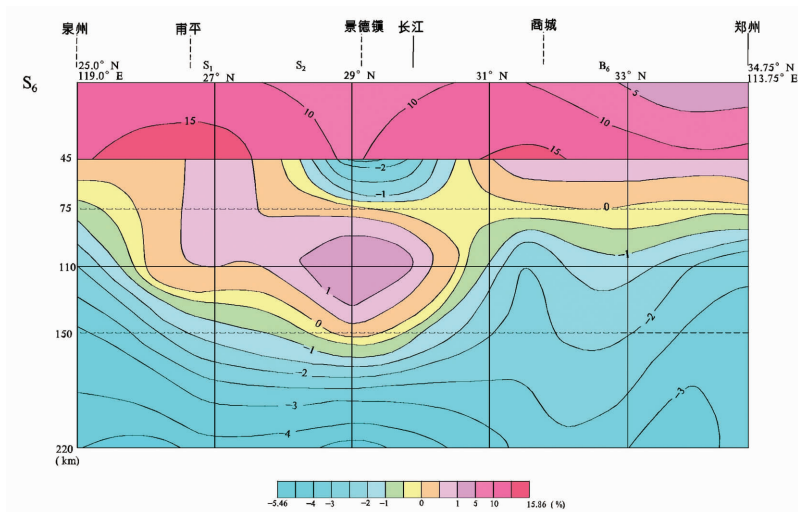
S<sub>3</sub>(四川成都—浙江泰顺)地震 P 波成像



S<sub>4</sub>(四川成都—广东广州)地震 P 波成像



S<sub>5</sub>(福建潮州—河南洛南)地震 P 波成像



S<sub>6</sub>(福建泉州—河南郑州)地震 P 波成像

图 2 地震 P 波成像剖面

Fig.2 P wave seismic tomographic profiles



用以和地表地质对比,20 km 切片主要反映上地壳的结构,45 km 和 45+km 切片反映紧挨莫霍界面上下处的结构,100 km 和 110 km 切片用来研究岩石圈地幔底部,220 km 用来研究软流圈,而 150 km 则用以对比研究东亚西太平洋低速区向华南延伸的情况。

本文即是从这 6 条 P 波地震层析剖面(图 2)出发,引用海量出版物中部分成果,对资料进行综合研究,探讨华南岩石圈三维结构。

### 3 华夏陆块岩石圈构造

根据深部地球物理探测结果,华夏陆块属中国东部中生代以来由于软流圈物质上升,岩石圈遭到破坏,“厚度减薄”的区域。

最先提出华北岩石圈减薄的是 Griffin 等<sup>[8]</sup>。他们从位于郯庐断裂东西两侧的辽宁复县和山东蒙阴奥陶纪金伯利岩的地幔捕虏体的研究中,得到一个低热导的克拉通地温,推算岩石圈与软流圈边界深约 180 km。而在涉县,鹤壁等围岩为中生代地区的捕虏体则得到高地温,岩石圈与软流圈边界的深度仅为 80 km。从而推测,华北地区岩石圈厚度自中生代以来减薄了约 100 km。图 3 是 Griffin 所作的华北地区岩石圈演化示意图。图中显示,在大兴安岭—太

行山重力梯度带(THFZ)以西,莫霍界面下为残留太古宙岩石圈,  $V_p$  为高值,达 8.1~8.3 km/s。在重力梯度带以东,除个别厚岩石圈地区外(如鲁西),为显生宙岩石圈,  $V_p$  为低值,仅 7.6~7.7 km/s。

袁学诚<sup>[9]</sup>根据 P 波地震层析研究华北岩石圈,认为所谓华北岩石圈的减薄并不是岩石圈地幔下部丢失,使得残留的岩石圈地幔直接盖在上升到约 80 km 的软流圈上,而是由于软流圈物质的上升将岩石圈地幔的下部改造成岩石圈地幔—软流圈过渡层,岩石圈地幔—软流圈过渡层由高角度并置的低速、高速层组成,它们各为外来的新生地幔与未受破坏的残留地幔,为方便计,将它们称为蘑菇云岩石圈地幔。蘑菇云地幔由于有外来新生地幔的加入,速度降低。它的顶面产生一个新的地球物理不连续面,常易误将它们当作软流圈的顶部深度。图 4 为 Griffin 与 O'Reilly 等<sup>[8]</sup>所作的这种岩石圈构造的示意模型。

Lebedev S<sup>[10]</sup>的地震层析工作发现在东南亚西太平洋地区存在区域速度异常,深度小于 200 km 时,岩石圈地幔为低速,而大于 200 km 时为高速。他所指的深度小于 200 km 的东亚西太平洋低速层应就是蘑菇云岩石圈地幔的反映。

在朱介寿等<sup>[11-12]</sup>S 波地震层析图上,东南亚西太

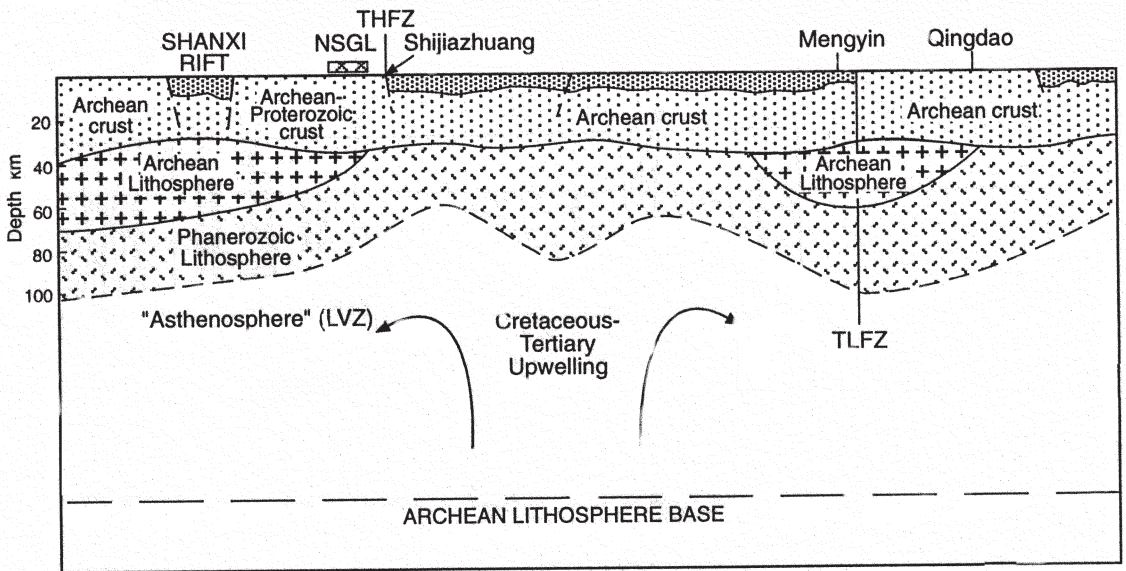


图 3 华北岩石圈演化示意图<sup>[8]</sup>

英语标注译意:THFZ—太行山断裂带,TLFZ—郯庐断裂带,Shanxi rift—汾渭裂谷;Archean crust—太古宙地壳, Archean-Proterozoic crust—太古宙-元古宙地壳;Archean lithosphere—太古宙岩石圈;Phanerozoic lithosphere—显生宙岩石圈;Asthenosphere—软流圈,Cretaceous-Tertiary upwelling—白垩纪-第三纪上升地幔流; Archean lithosphere base—太古宙岩石圈基底

Fig.3 Schematic representation of lithosphere evolution in the northeastern Sino-Korean craton<sup>[8]</sup>

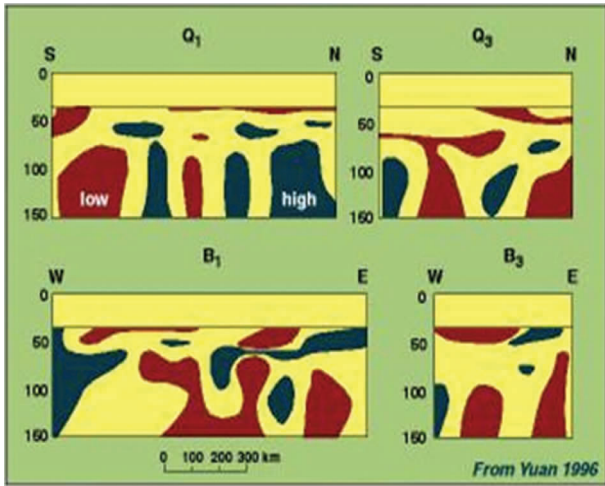


图4 华北岩石圈蘑菇云构造<sup>⑧</sup>  
(暖色为上升软流圈物质,冷色为残留地幔。  
Q1,Q3,B1,B3 为层析剖面编号<sup>⑨</sup>)

Fig.4 Tomographic sections in the Sino-Korean Craton<sup>⑧</sup>

平洋岩石圈是以一个巨大规模的葫芦状低速体出现的。深 200~250 km 处的葫芦状低速体下果室是软流圈,呈透镜体状。葫芦状低速体的上果室应是蘑菇云岩石圈地幔。上果室与下果室之间的细颈部分是软流圈物质上升的通道,它的深度约为 150 km。取葫芦状低速体的细颈构造部位速度为 4.4 km/s 的等值线处的地表投影作为低速岩石圈的边界。低速岩石圈的地表投影如图 5<sup>[13]</sup>。这个岩石圈低速区(蘑菇云地幔)席卷整个东南亚和西太平洋。

在中国东部,蘑菇云地幔的西界沿太行山南下,绕过大别山后,向南经湘中盆地的东缘,华南地块的南缘,经广西桂林,云南昆明,阿拉干褶皱带出境后,沿安达曼海沟、爪哇—苏门达拉海沟向东延伸<sup>[13]</sup>。

将图 5 的低速岩石圈边界投到华南深度为 150 km 的 P 波层析切片图中作详细对比,两者在区域轮廓上基本符合(图 6)。

## 4 扬子地块岩石圈构造

### 4.1 川湘黔裂陷槽

在云南金顶—浙江丽水、四川成都—浙江泰顺以及四川成都—广东广州等 3 条地震层析剖面上均可见到在扬子地壳内有一个明显的对称局部低速异常。从地表一直延伸整个地壳,向下宽度递减。它是一个裂陷带。裂陷槽中心的平面位置约位于湖南的凤凰,往北经花垣、黔江到四川万县。南部进入江南古陆南部,到达贵州凯里被阻于钦杭结合带,拐向右

江裂陷槽。万县往北缺少数据,走向不明,极可能延伸到勉略地区(图 6~8)。这个裂陷槽可能是元古宙便已形成,沉积了元古宙以来的巨厚沉积物。裂陷槽将扬子陆块分割成上扬子与中下扬子等两个性质和特征均不相同的块体。

图 9 是穿过四川盆地的反射地震剖面的地质解释(张云湘提供)。反射地震剖面显示四川盆地东西部沉积环境存在差异。西部三叠纪地层沉积巨厚,缺失志留纪、泥盆纪和石炭纪地层,褶皱平缓。盆地东部是川湘黔裂陷槽所处位置,有巨厚古生代—新生代地层沉积,可能有比东部有更巨厚的元古宙沉积,褶皱强烈。

为什么在地表华蓥山和八面山的褶皱方向均为北东向,而川湘黔裂陷槽的走向却为北北西向?推测造成这种构造形式差异的原因是,川湘黔裂陷槽是在元古宙开始形成的裂陷槽,一直延续到中生代。而八面山、华蓥山地表褶皱则是在新生代喜山运动的作用下形成的褶皱。喜山运动使四川盆地基底中部形成北北东向隆升,在其两侧形成基底凹陷(图 10~11),在四川盆地基底斜向自西南向北东隆升的影响下,使得裂陷槽地表沉积与其下地层脱耦,经受到北西向和南东向挤压,形成北西西和北东向等两组褶皱。

### 4.2 攀西岩浆房

在兰坪—丽水剖面上(图 2, S<sub>2</sub>),东经 105°~116°之间的是正常的克拉通岩石圈地幔,在东经 108°~110°处,也就是在湘西凤凰—花垣的江南古陆下,岩石圈厚达 190 多千米。在东经 102°~104°处岩石圈次厚,达到 150 多千米。在兰坪东的攀西地区,整个岩石圈地幔均为低速。意味着曾有软流圈物质上升直达莫霍界面。在兰坪—丽水层析剖面的 45°和 45°深度处,可以看到深 20~75 km 处,有一个局部低速体(图 12)。推测它是由于软流圈物质上升在壳幔边界处产生的岩浆房。

万战生等<sup>⑩</sup>完成的冕宁—宜宾及石棉—乐山等 2 条大地电磁剖面(图 13)位于低速带之北。二维电性结构显示,康滇地轴和大凉山地块地壳中存在向上拱起的高导层,顶面埋深为 10~15 km,最浅处小于 10 km,厚度为 15~25 km,最小电阻率小于 10 Ωm。他们推断与壳内高导层与岩石的部分熔融有关。

这个地区,在中二叠世晚期到晚二叠世早期,曾有陆相裂隙式峨眉山玄武岩的大喷发,地域覆盖川西、滇东、黔西及西藏昌都等地。在四川西昌及云南



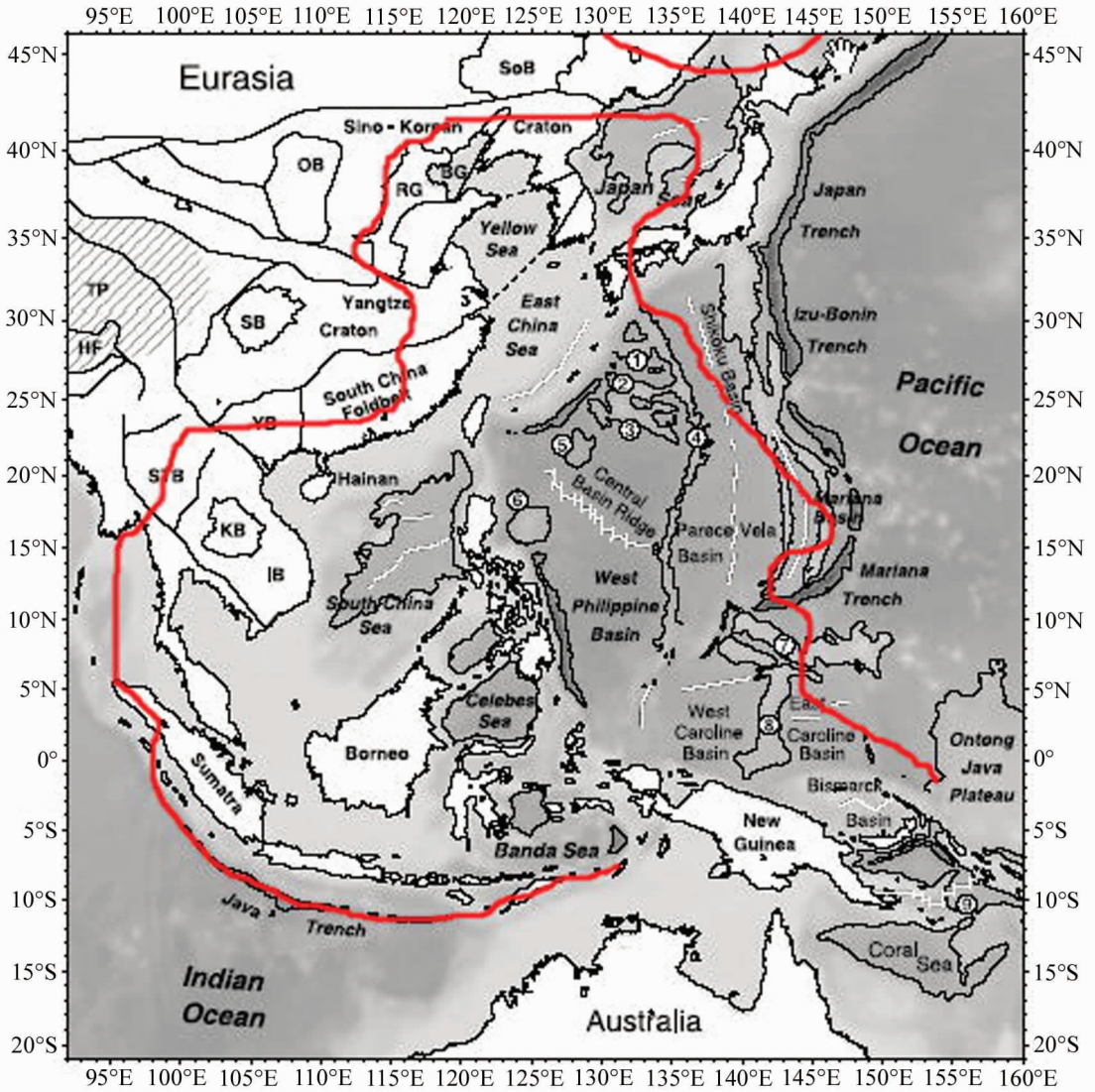


图 5 东南亚—西太平洋低速岩石圈范围<sup>[13]</sup>  
(构造底图引自 Lebedev<sup>[10]</sup>)

Fig.5 Low-velocity lithosphere of SE Asia and Western Pacific Ocean<sup>[13]</sup>  
(Tectonic basemap from Lebedev<sup>[10]</sup>)

等地,玄武岩覆盖厚度达到 1000~2000 m(图 14)。

攀西低速带、冕宁—宜宾大地电磁剖面低阻带和石棉—乐山大地电磁剖面低阻带呈线状分布,总长约 500 km,它们均属同一地质体的反映。这个地质体应即是形成峨眉山玄武岩喷发的岩浆房。而这个低速低阻带即是峨眉山玄武岩喷发的主要通道。地表观察,在峨眉山大火成岩省中,这个地区的溢流玄武岩厚度最大,发育较为完整,岩石成因与地幔柱的活动有关<sup>[17-19]</sup>。在它之上的地壳内为地震密集区,在它内部及下部,没有或极少发生地震(图 13)。

### 4.3 江南古陆

江南古陆是华南地区分布极广的元古宙浅变质火山—沉积岩系分布区,它的构造属性众说纷纭。黄汲清<sup>[20]</sup>认为,江南古陆是在前震旦纪褶皱的基础上形成的加里东褶皱带。陈国达认为是地台的活化区。许靖华等<sup>[21]</sup>认为是由印支碰撞造山作用形成的构造混杂带。

为揭示江南古陆的深部细结构,笔者曾在江南古陆西南部的雪峰山地区,从湖南凤凰经麻阳到同平完成一条反射地震剖面(图 15),用以探测江南古

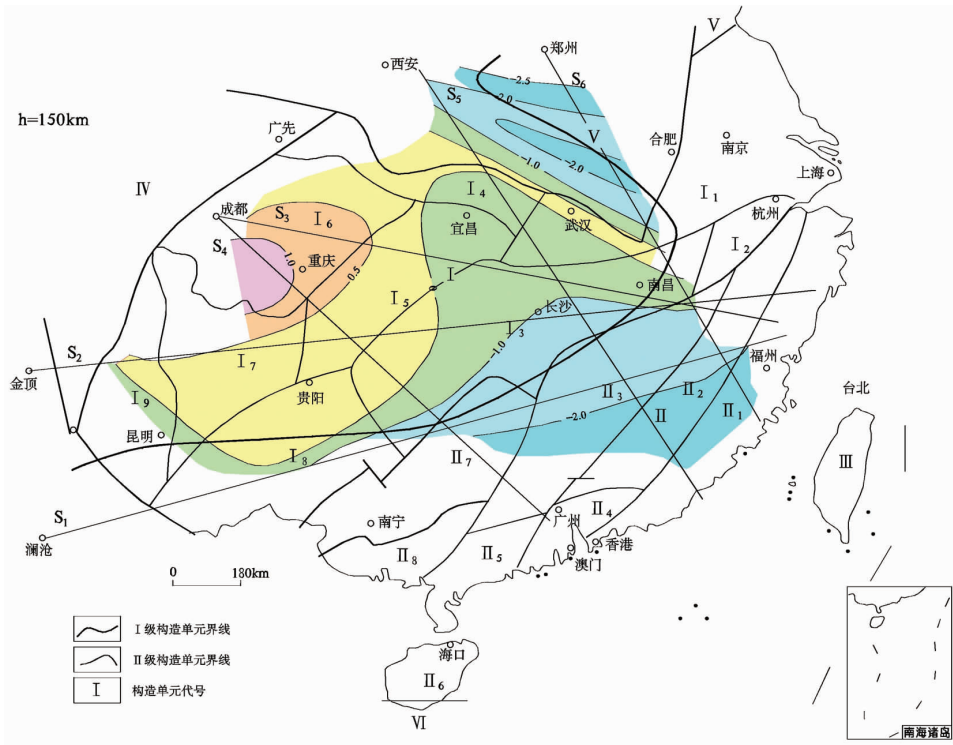


图6 深度为150 km的P波地震层析  
 (粗黑线为根据S波层析圈定的东南亚-西太平洋低速带边界)  
 Fig.6 P wave seismic tomography at the depth of 150 km. Bold black line shows boundary of SE Asia-West Pacific low velocity region determined by S wave tomography

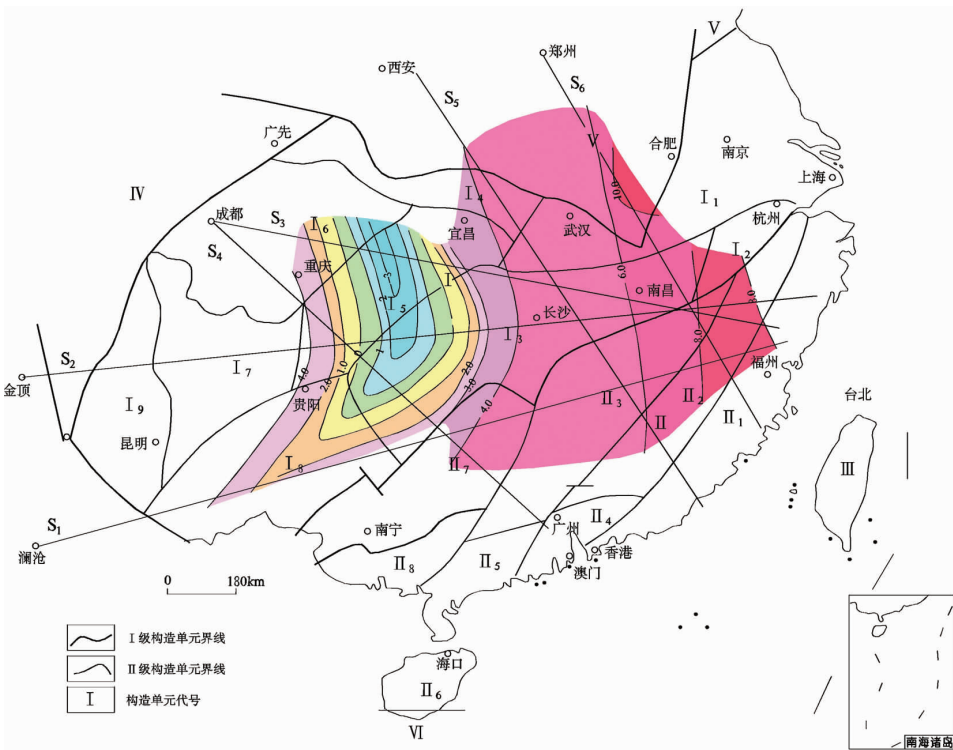


图7 深度为零处P波地震层析  
 Fig.7 P wave seismic tomography at the depth of 0 km



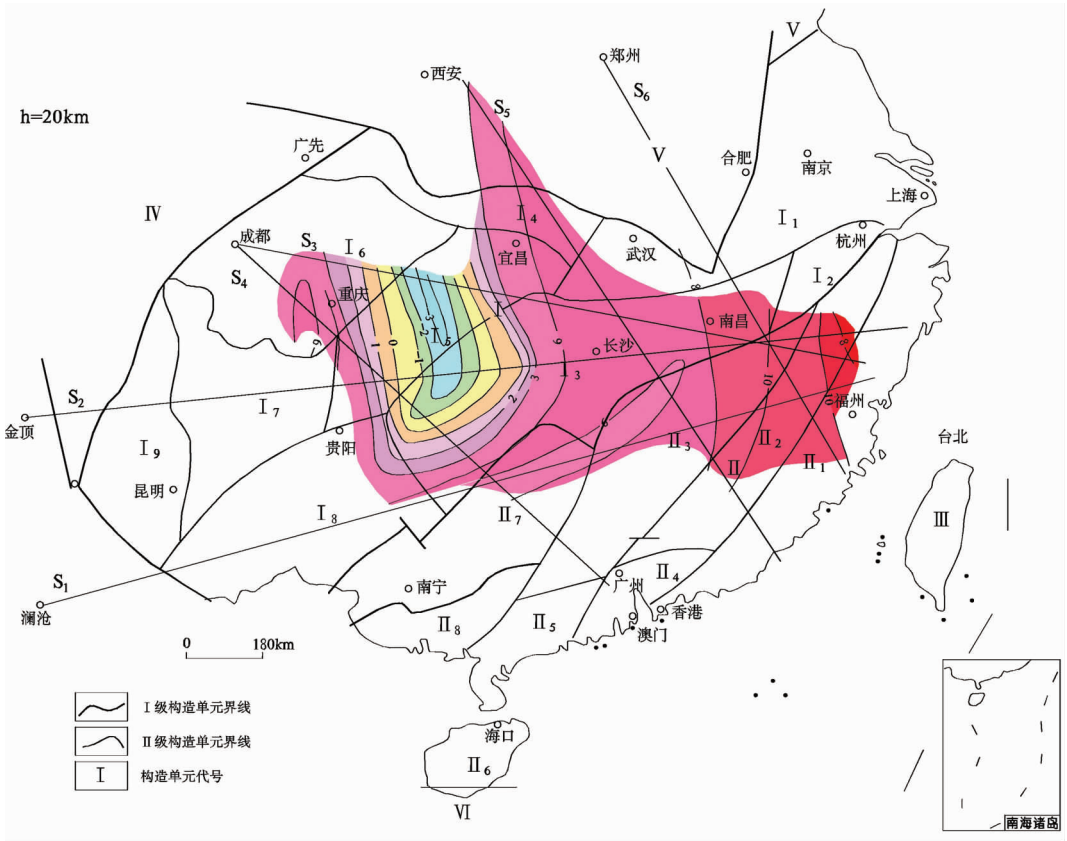


图 8 深度为 20 km 的 P 波地震层析  
 Fig.8 P wave seismic tomography at the depth of 20 km

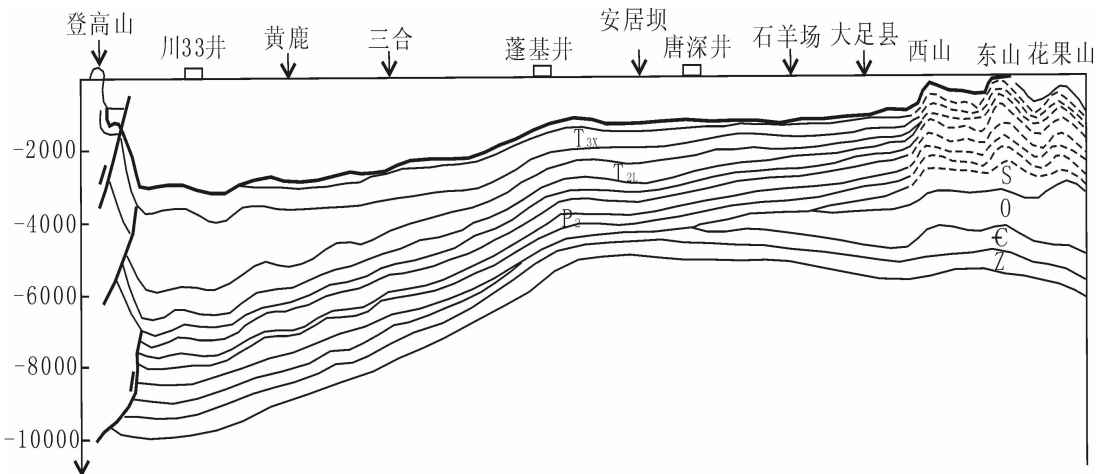


图 9 安县—温水反射地震剖面(据张云湘)  
 Fig.9 Reflection profile from Anxian to Wenshui(after Zhang Yunxiang)

陆的深部构造。使用 SN348 地震仪,4 台 18t 可控震源,扫描频率 8~40 Hz,道间距 100 m,36 个检波器组合,24 次叠加。

在麻阳盆地内有中生代碎屑岩覆盖的地区,可以取得弱信号;在古生代灰岩出露的地区,几乎收不

到信号。

反射地震剖面结果显示:在麻阳西,从深度 2.52 s(约 7 km)到深度 5.5 s(约 16 km)有一个明显的高角度不连续面。这个不连续面之西为川湘黔裂陷槽,以东为江南古陆。江南古陆上部反射为缓倾斜层状

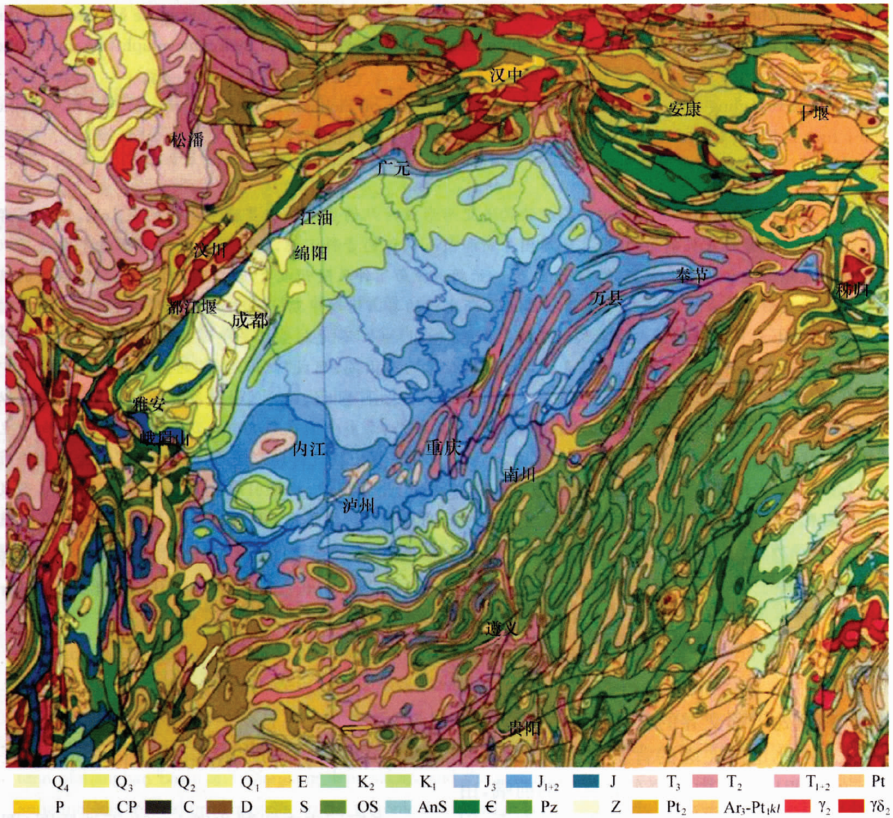


图 10 四川盆地及其邻区地质图<sup>[14]</sup>

Fig.10 Geological map of the Sichuan basin and its surrounding areas<sup>[14]</sup>

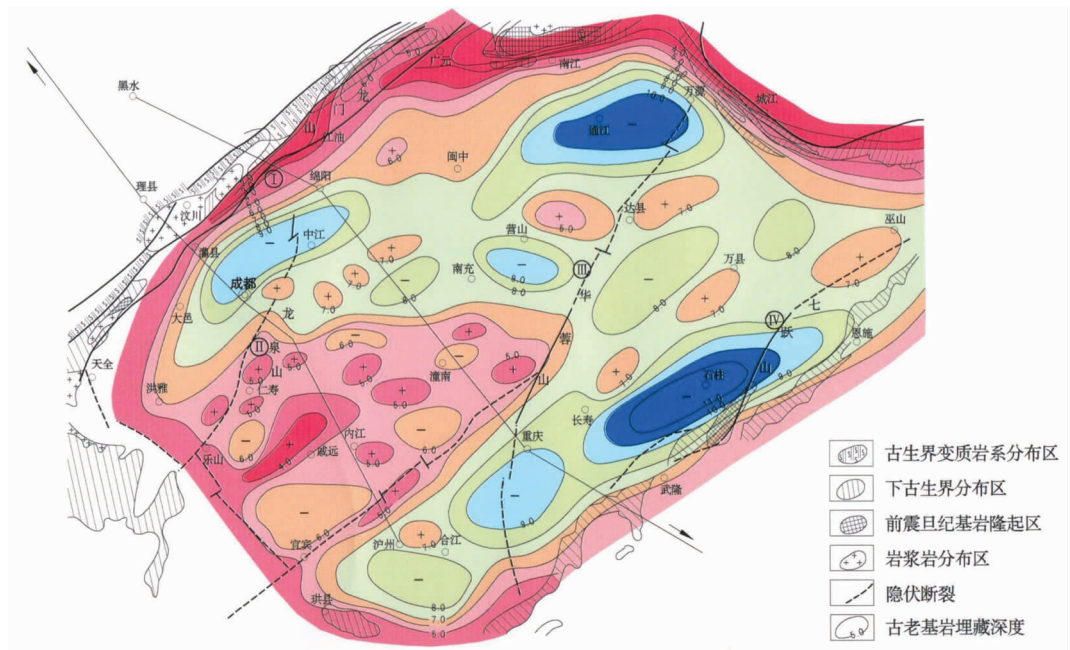


图 11 四川盆地基底构造(据张云湘)

Fig.11 Basement structure of the Sichuan basin (after Zhang Yunxiang)



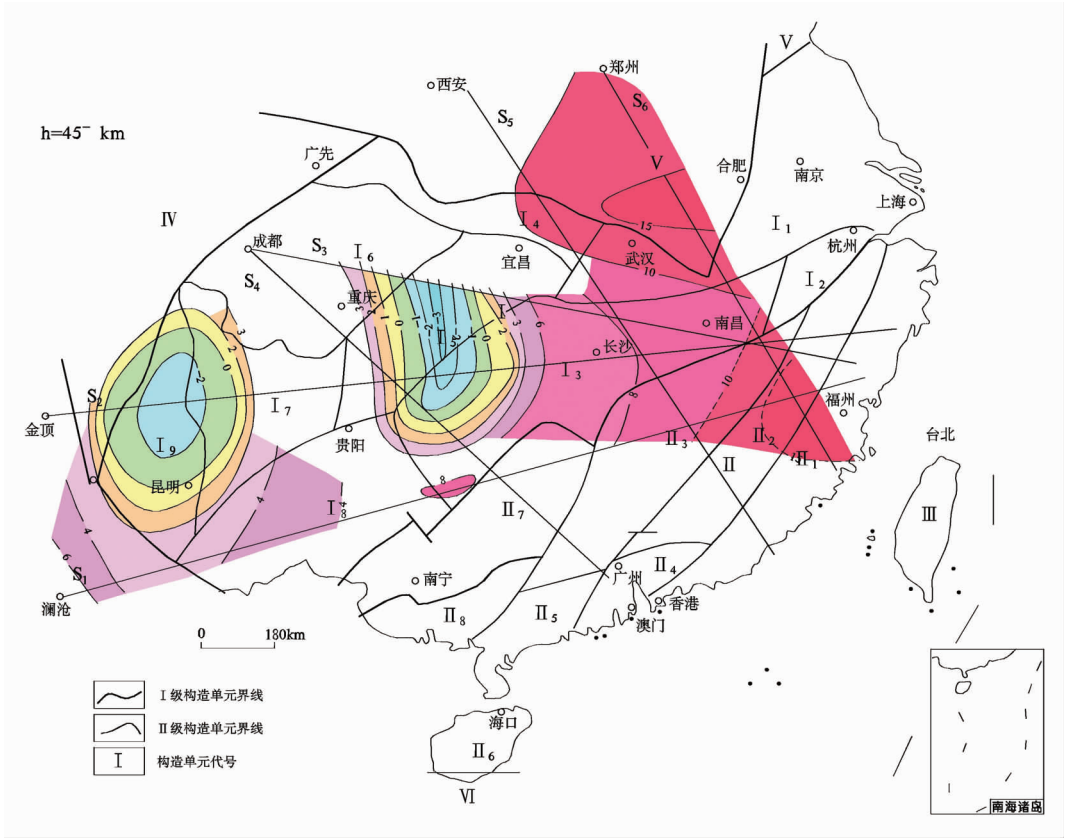


图 12 深度为 45-km 的 P 波地震层析

Fig.12 P wave seismic tomography at the depth of 45 km

板溪群的反映,深度在 2.52 s 以下为透明体,应为武陵运动形成的元古宙冷家溪群强烈褶皱基底。川湘黔裂陷槽在 2.52 s 到 5.5 s 之间,有密集反射,意味着一直到深 5.5 s 还都是新元古代—显生宙巨厚沉积,还未遇到冷家溪群。宽角反射地震在此不连续面以东,得到莫霍界面深度约 38 km,在此不连续面以西则为 43 km,高差达 5 km。

虽然近年来多认为江南古陆是一个造山带,但在 P 波层析剖面图上,江南古陆没有特殊的反映。综合层析剖面和反射地震结果,笔者赞同黄汲清最初提出的观点,即江南古陆是基岩隆升形成的一个背形构造,至少在它的东南端湘黔地区是如此。

#### 4.4 扬子地块岩石圈地幔构造

深度为 110 km 的地震成像图上,可以看到川滇地区有明显的高速区,应为未遭破坏的川滇古老岩石圈地幔块体。攀西地幔柱沿着这个古老块体的西侧,超越它上升到莫霍界面处后,向东挤入到壳幔边界,形成岩浆房。这个岩浆房的底界深度为 75 km。在 110 km 的切片上没有反映(图 16)。

深度为 100 km 的地震层析图上(图 17),在江西的吉安与福建的清流间,长江成矿带,以及三江地区出现低速异常外,其他地区均为高速。并且高速异常出现环带,但环带与环带的速度差不大,说明在这个深度岩石圈地幔较均匀并且受到上升软流圈物质的冲击较少。

在  $h=45$  km 的地震层析图(图 18)上出现景德镇—常德与西昌等两个低速异常区,川中和吉安等两个高速异常区。景德镇—常德低速体从景德镇经通山、岳阳到常德,在莫霍面下向下延伸约 75 km。几乎所有长江中下游成矿区和江南成矿区的重要矿床都在它的范围内。

从世界矿集区的宏观分布来看,中国东部成矿带与东太平洋成矿带、西太平洋岛弧成矿带同属环太平洋带成矿带,但它们各有其特点。东太平洋成矿带和西太平洋成矿带的成矿时代均为新生代,而中国东部成矿带的成矿时代则为中生代,尤其是侏罗—白垩纪。矿床类型也不相同,东太平洋以大陆边缘斑岩铜钼矿床和陆相火山热液矿床为主,西太平洋岛弧成矿带以火山作用有关的浅成热液贵金属和

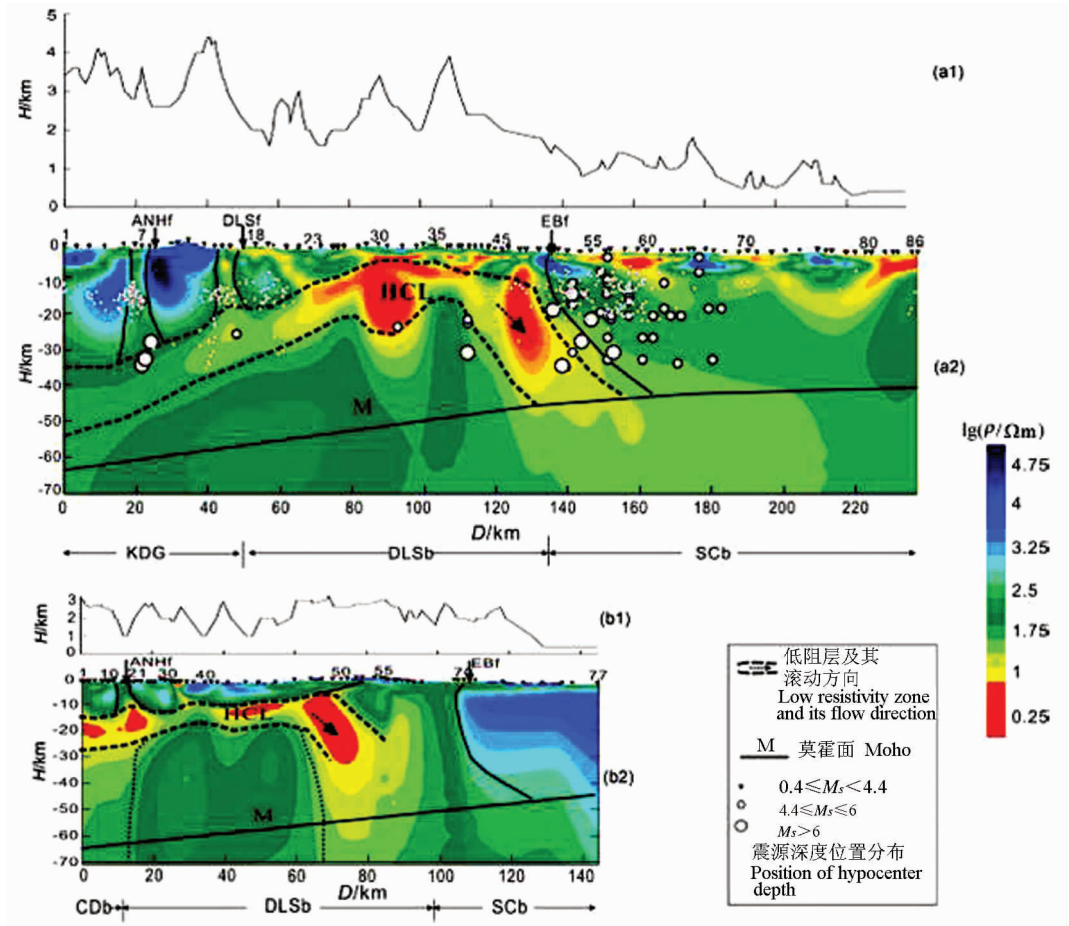


图 13 冕宁—宜宾及石棉—乐山大地电磁剖面<sup>[15]</sup>  
 (a1)—沿冕宁—宜宾剖面的地形高度;(a2)—冕宁—宜宾剖面的二维电性结构;(b1)—沿石棉—乐山剖面的地形高度;(b2)—石棉—乐山剖面二维电性结构;KDG—康滇地轴;CDb—川滇地块;DLSb—大凉山地块;SCb—四川盆地; ANHf—安宁河断裂;DLSf—大凉山断裂;EBf—峨边断裂;HCL—壳内高导层;D—距离; $\rho$ —电阻率;  
 红色区域电阻率 $<10\Omega\text{m}$ , $0.4\leq M_s<4.4$  ( $28.5^\circ\text{N}\sim 29^\circ\text{N}$ )(1992—2002)  
 Fig.13 Magnetotelluric profile from Mianning to Yibin and magnetotelluric profile from Shimian to Leshan<sup>[15]</sup>  
 (a1)—Topography elevation (H) sketch along Mianning—Yibin profile;(a2)—2D electrical structure along Mianning—Yibin profile;(b1)—Topography elevation (H) sketch along Shimian—Leshan profile;(b2)—2D electrical structure along Shimian—Leshan profile;KDG—Kangian-axis;CDb—Sichuan—Yunnan block;DLSb Daliangshan block; SCb—Sichuan basin; ANHf—Anninhe fault; DLSf—Daliangshan fault;EBf—Ebian fault;HCL—Crustal high conductivity layer; D—Distance;  $\rho$ —Resistivity. The red area is resistivity  $<10\Omega\text{m}$ , $0.4\leq M_s<4.4$  ( $28.5^\circ\text{N}\sim 29^\circ\text{N}$ )(1992—2002)

贱金属矿床为主。但在中国东部许多矿床的形成都与深源或幔源流体的参与有关<sup>[22]</sup>。蘑菇云岩石圈带来的丰富的矿源是造成中国东部特殊成矿作用的主要原因。

### 5 华南地区的软流圈结构

深度为 220 km 处应是软流圈分布的深度段。在华南地区 220 km 处速度最高，呈现为正值的地带是在四川盆地东南，其中心沿綦江、武隆到湖北的利川、恩施(图 19)。

由此可见，软流圈具有流变性质，但它并非是一个可以自由流动的均匀物体。华南地区高速异常出现在四川盆地的东南。速度最低的地区是在东南沿海，与在《中国岩石圈三维结构》项目中圈定的东南亚西太平洋低速区范围一致。但有一个重要的修正，即是景德镇—常德有一个拗拉槽式的软流圈低速带。它对华南成矿起着至关重要的控制作用。

### 6 小结

华南岩石圈可以钦杭断裂和川湘黔裂陷槽为



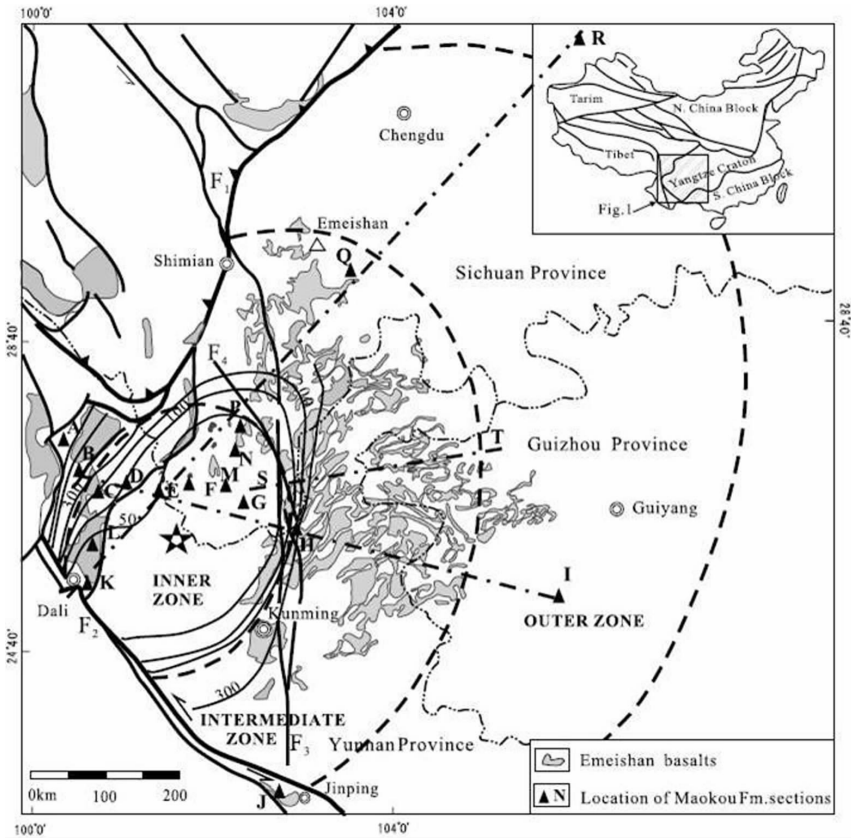


图 14 峨眉山大火山岩省地质概要图<sup>[6]</sup>

点划线: 穿过茅口建造(A-I 及 K-R)和穿过冲积扇(S-T)的剖面; 虚线: 侵蚀内带, 中带及外带的大致界限; 实线: 茅口建造的等厚线; 数字示厚度(m); 标有 F 的实线表示断层;

F<sub>1</sub>—龙门山逆冲断层; F<sub>2</sub>—哀牢山—红河走滑断层; F<sub>3</sub>—小江断层; F<sub>4</sub>—西昌—巧家断层

Fig.14 Schematic geological map of the Emeishan large igneous province<sup>[6]</sup>

Dash-dotted lines: profiles across the Maokou Formation (A-I and K-R) and across the alluvial fan (S-T); Dashed lines: estimated boundaries of the eroded zone, defining the inner zone, intermediate and the outer zone; Solid line: iso-thickness contours of the Maokou Formation. Numbers indicate the thickness in meters; Solid lines labeled with F indicate faults; F<sub>1</sub>—Longmenshan thrust fault;

F<sub>2</sub>—Ailaoshan—Red River slip fault; F<sub>3</sub>—Xiaojiang fault; F<sub>4</sub>—Xichang—Qiaojia fault

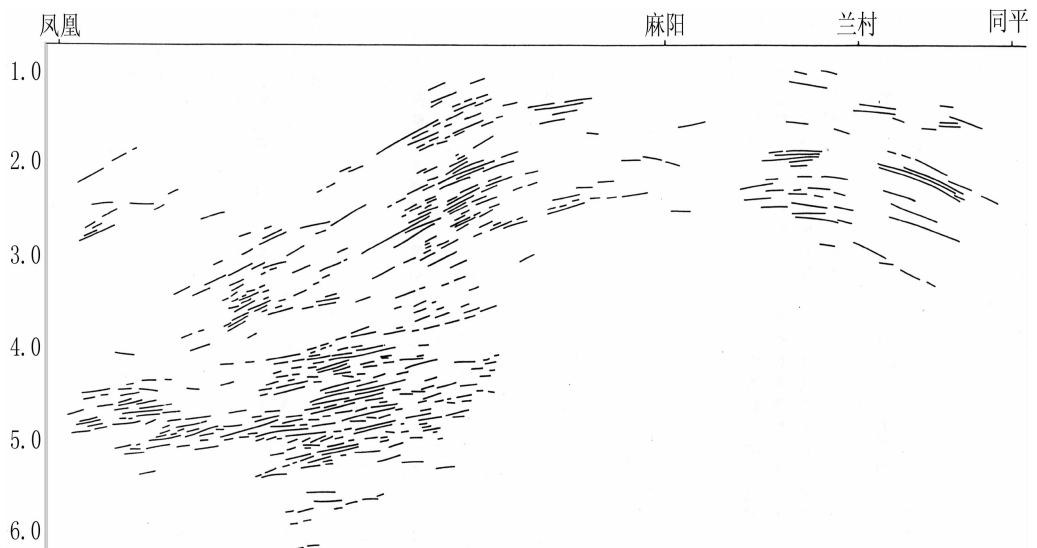


图 15 雪峰山陆壳反射地震剖面

Fig.15 Reflection seismic profile across the Xuefeng Mountain

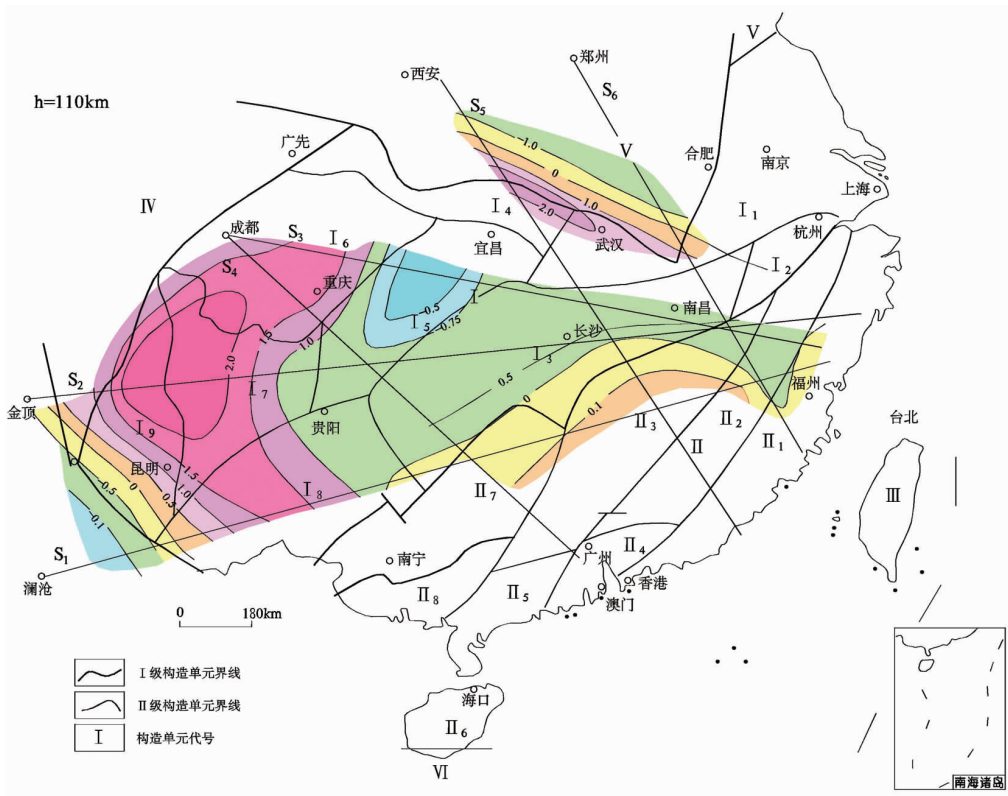


图 16 深度为 110 km 的 P 波地震层析

Fig.16 P wave seismic tomography at the depth of 110 km

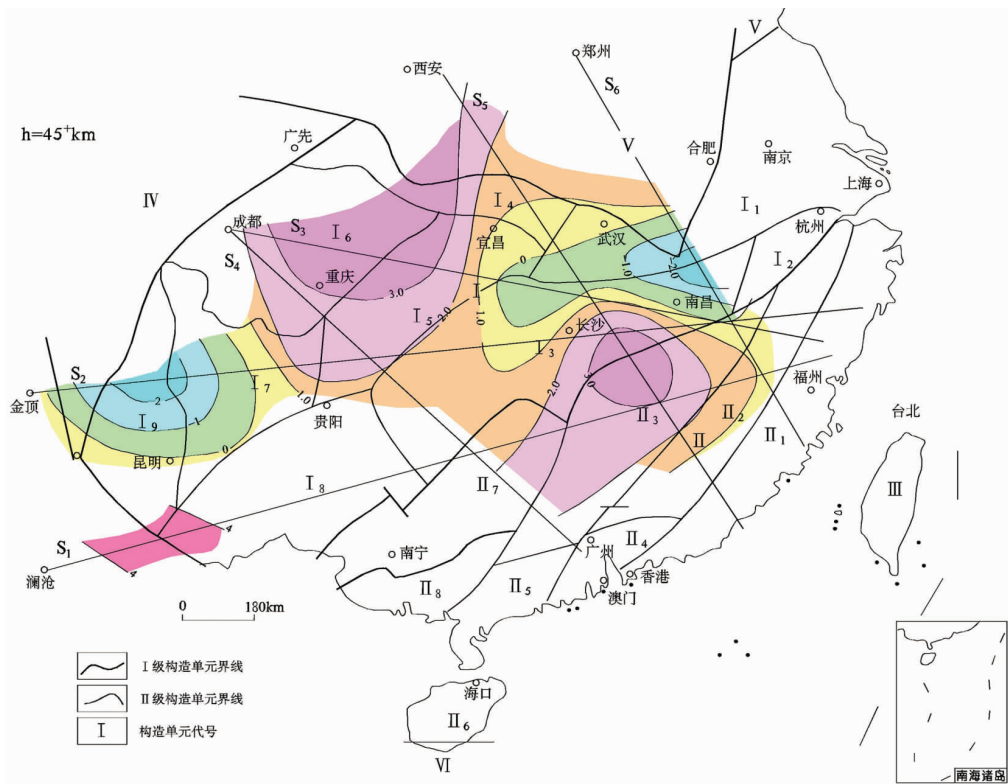


图 17 深度为 100 km 的 P 波地震层析

Fig.17 P wave seismic tomography at the depth of 100 km

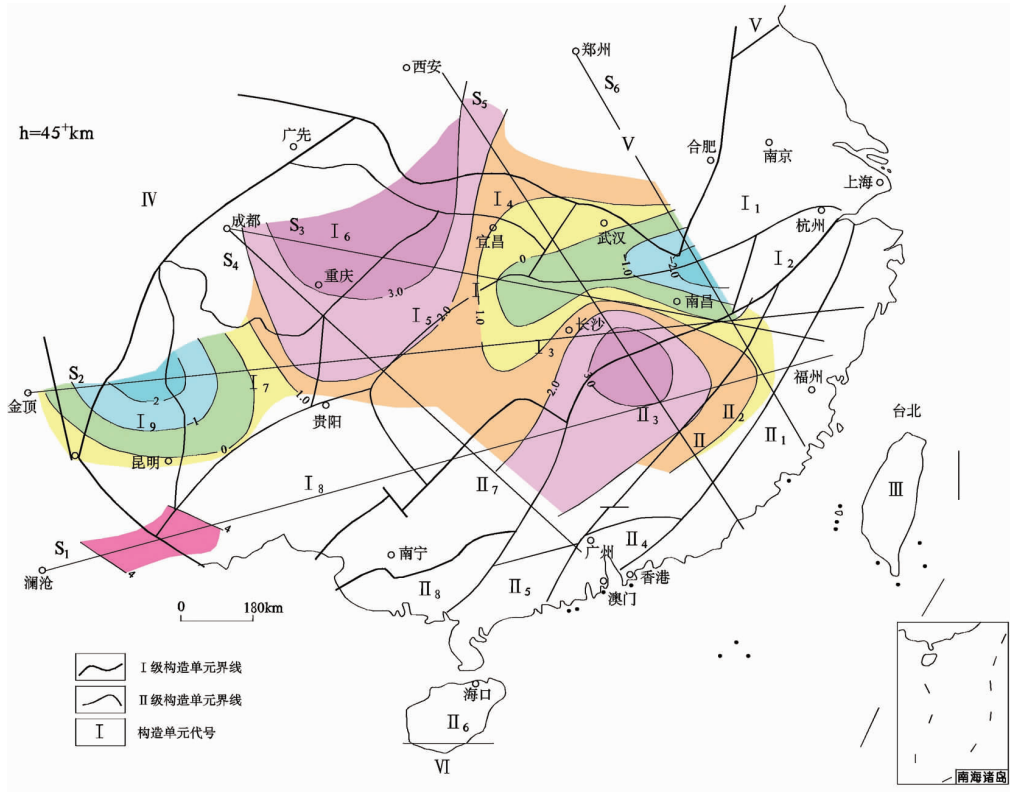


图 18 深度为  $45^+ \text{ km}$  的 P 波地震层析

Fig.18 P wave seismic tomography at the depth of  $45^+ \text{ km}$

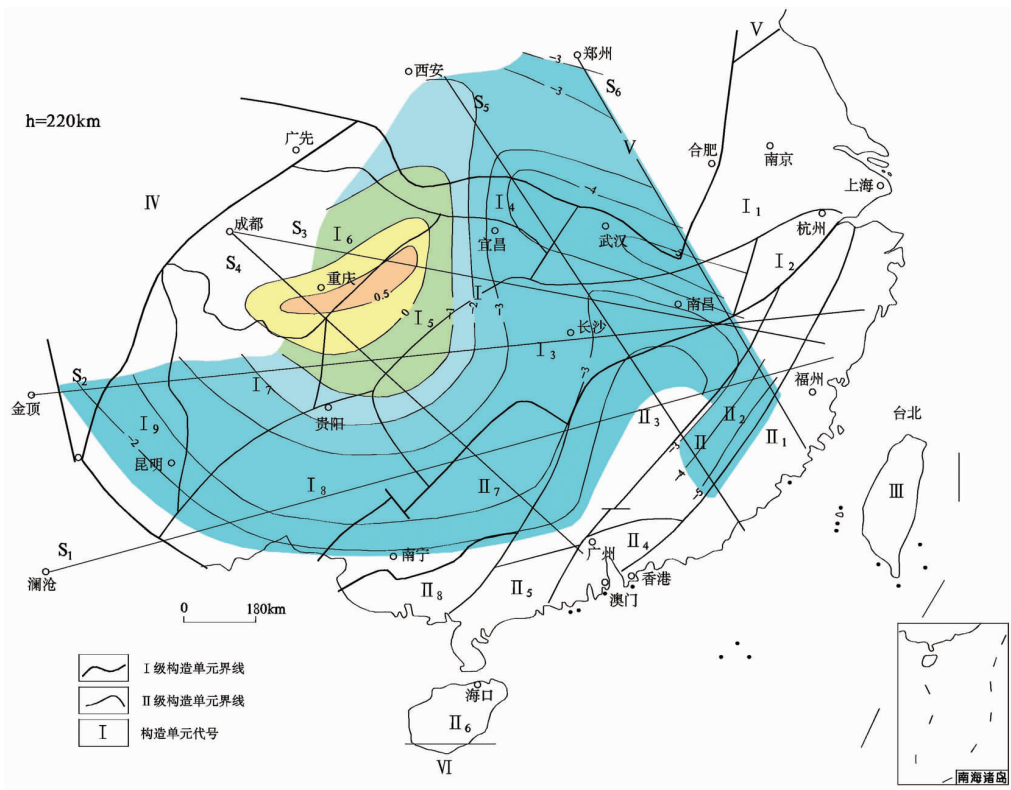


图 19 深度为  $220 \text{ km}$  的 P 波地震层析

Fig.19 P wave seismic tomography at the depth of  $220 \text{ km}$

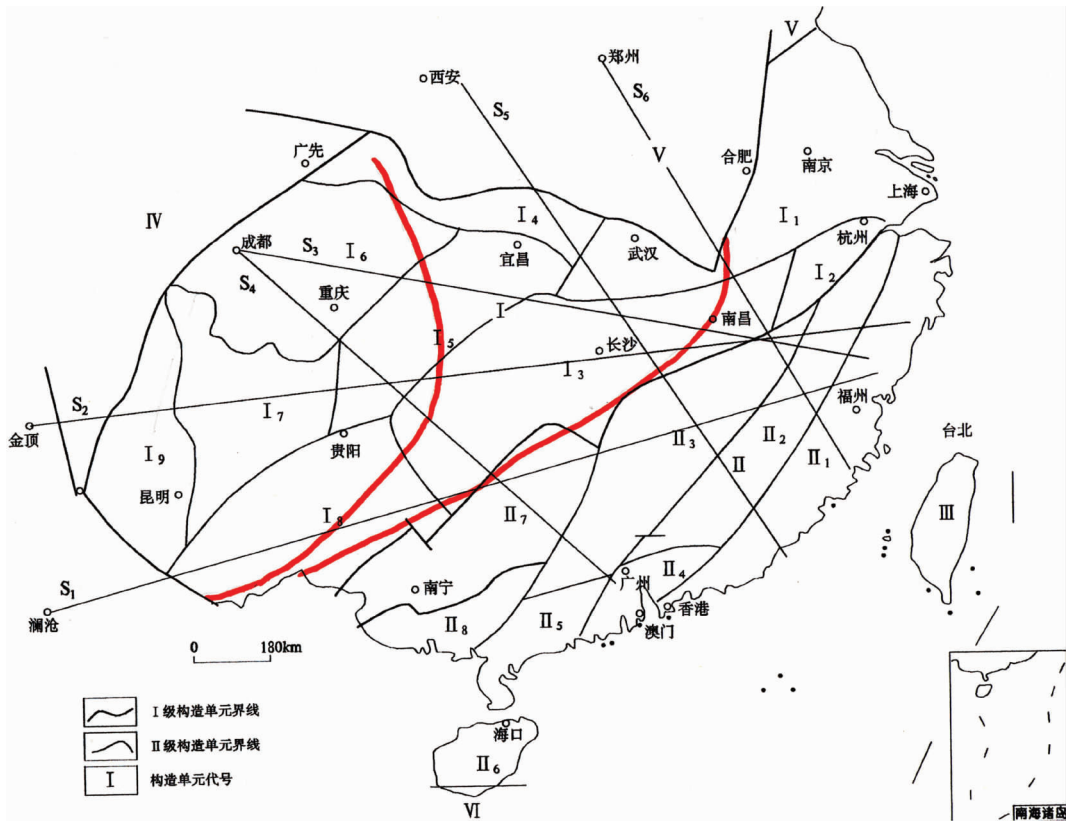


图 20 华南陆块岩石圈分区示意图

Fig.20 Schematic lithospheric divisions of Southeast China

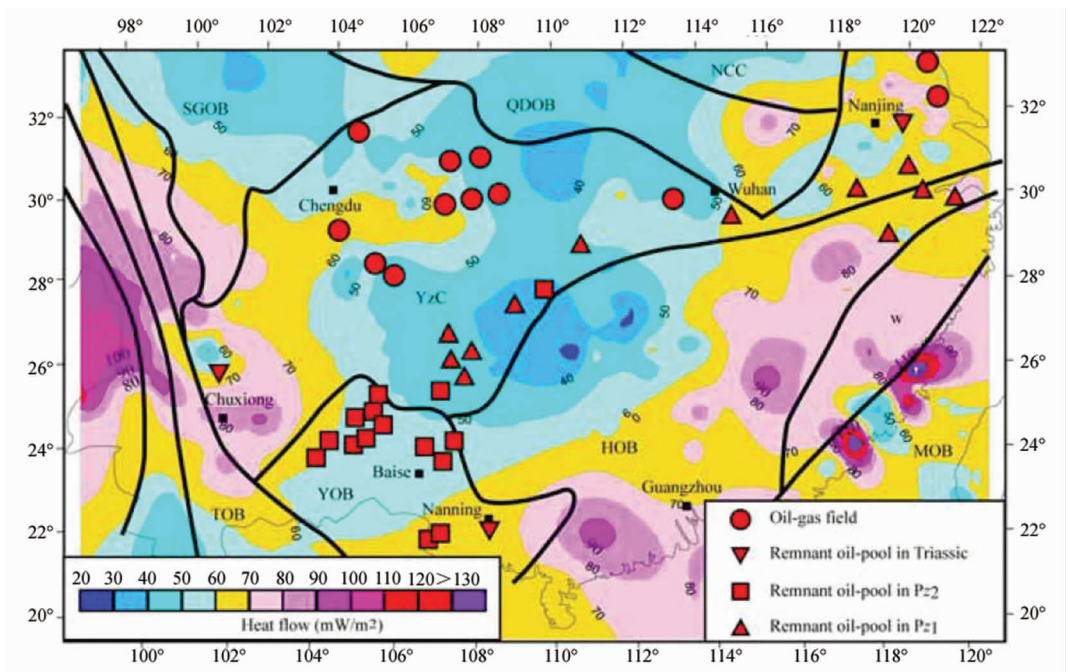


图 21 华南陆块地热流图<sup>[23]</sup>

Fig.21 Heat flow map of Southeast China<sup>[23]</sup>



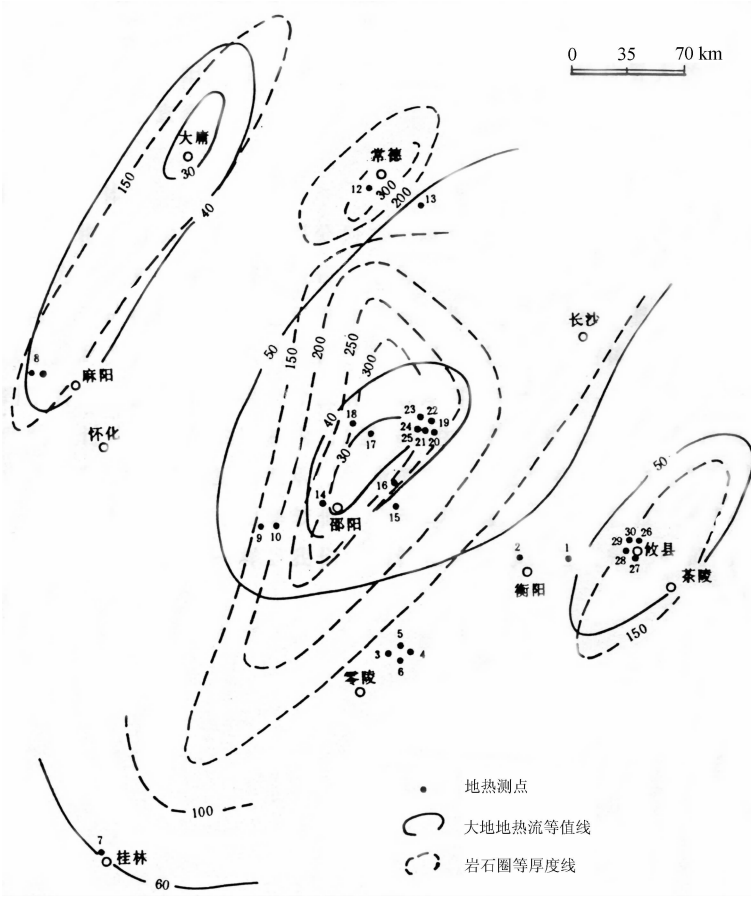


图 22 湘中地热流推断岩石圈地幔熔融层等深度图(金昕, 未发表)  
 Fig.22 Isobath map of inferred lithosphere mantle melted layer of Central Hunan geothermal flow (after Jin Xin, unpublished)

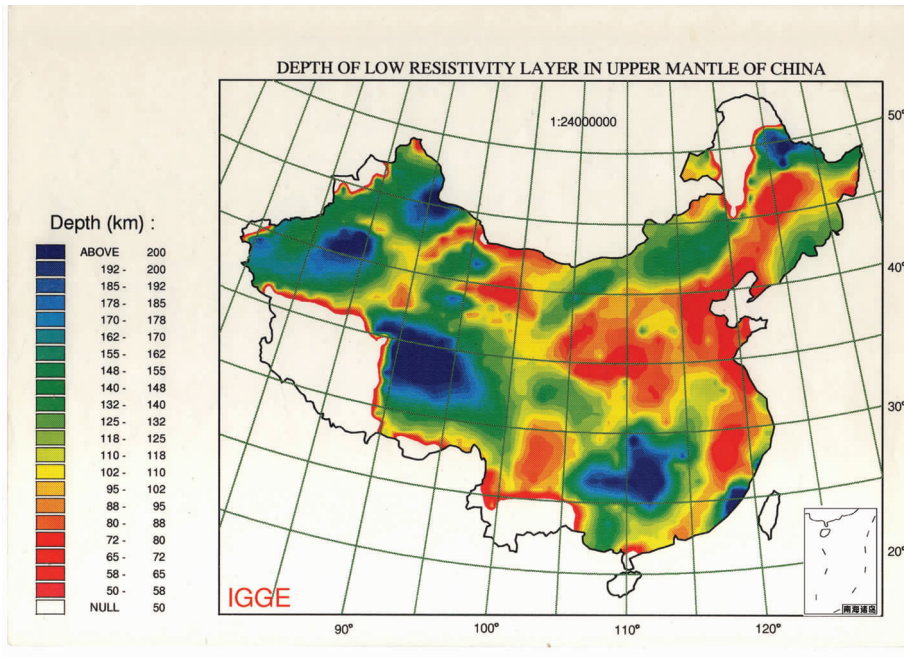


图 23 中国幔内低阻层深度<sup>[24]</sup>  
 Fig.23 Depth of low resistivity layer in upper mantle of China<sup>[24]</sup>

界,分成三大部分(图 20)。

在钦—杭断裂东南为华夏岩石圈。它是东南亚西太平洋低速带的一部分,它与东南亚西太平洋低速带的其他地区的共同特点是它们的岩石圈地幔都受到软流圈物质上升而被改造成蘑菇云型地幔。部分地区幔源物质侵入地壳,形成蕴藏丰富的矿藏。

川湘黔裂陷槽以西的地区为上扬子岩石圈。它在地表是一个热块体,但在深部有延伸超过 200 km 的高速基底。上扬子岩石圈受到其西攀西地幔柱的改造,在壳幔过渡带产生峨眉山岩浆房,在古生代末曾引发玄武岩的大面积喷发,至今仍在滇西留有岩浆房,并产生丰富的热泉。

在川湘黔裂陷槽与钦杭断裂之间的是中扬子岩石圈。中扬子在地表是一个冷块体(图 21),在湘中实测热流值低到小于  $20 \text{ mWm}^{-2}$ (图 22)根据热流值计算得到的岩石圈厚度达到 300 km。具有低速、低电阻率特征。根据大地电磁测深得到的结果也与地热流计算得到的相似(图 23)。

**致谢:**衷心感谢中国科学院地质地球物理研究所刘建华研究员为我们提供了高质量的地震层析剖面,并对本文提出宝贵修改意见。

## 参考文献(References):

- [1] 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 等. 中国东南陆区的岩石圈结构与大规模成矿作用[J]. 中国地质, 2009, 36(3):528-543.  
Yang Minggui, Huang Shuibao, Lou Fasheng, et al. Lithospheric structure and large-scale metallogenic process in Southeast China continental area [J]. *Geology in China*, 2009, 36 (3):528-543(in Chinese with English abstract).
- [2] 陈毓川, 等. 中国成矿体系与区域成矿评价[M]. 北京:地质出版社, 2007.  
Chen Yuchuan, et al. Chinese Mineralization System and Assessment of Regional Mineralization [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2007(in Chinese with English abstract).
- [3] Bird P. An updated digital model of plate boundaries [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2003, 4 (3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.
- [4] 林中洋, 等. 青海门源—福建宁德断面[C]//国际岩石圈委员会全球地学断面计划编号 GGT14; 国际岩石圈委员会出版号 ILP272. 北京:地震出版社, 1992.  
Lin Zhongyang, et al. Global Geoscience Transect 14:Menyuan, -Ningde. Beijing:Seismological Press, 1992(in Chinese).
- [5] 孙武城, 等. 内蒙喀喇沁旗—湖北随县断面[C]//国际岩石圈委员会全球地学断面计划编号 GGT15; 国际岩石圈委员会出版号 ILP273. 北京:地震出版社, 1992.  
Sun Wucheng, et al. Global Geoscience Transect 15:Harqin Qi-Suixian. Beijing:Seismological Press, 1992(in Chinese).
- [6] 阚荣举, 等. 云南遮放—马龙断面. 国际岩石圈委员会全球地学断面计划编号 GGT16; 国际岩石圈委员会出版号 ILP274. 北京:地震出版社, 1992.  
Kan Rongju, et al. Global Geoscience Transect 16:Zhe Fang - Malong. Beijing:Seismological Press, 1992(in Chinese).
- [7] 袁学诚, Egorov A S, GEMOC, 等. 北冰洋—欧亚大陆—台湾断面. 国际岩石圈委员会全球地学断面计划编号 GGT21; 国际岩石圈委员会出版号 ILP276. 北京:科学出版社, 2000.  
Yuan Xuecheng, Egorov A S, GEMOC, et al. A Short Introduction to Global Geoscience Transect 21:Arctic Ocean -Eurasia -Pacific Ocean. Beijing:Science Press, 2000 (in Chinese).
- [8] Griffin W. Zhang L A, O'Reilly S Y, Ryan C G. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton[C]//AGU Geodynamic series, Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia, 1996.
- [9] 袁学诚. 秦岭岩石圈速度结构与蘑菇云构造模型[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26, (3):209-215.  
Yuan Xuecheng. Velocity structure of the Qinling lithosphere and mushroom cloud model [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 36, (3): 235-244(in Chinese).
- [10] Lebedev S, Guust Nolet. Upper mantle beneath Southeast Asia from S velocity tomography [J]. *Journal of Geophysical Research*, 108, no. b1, 2048, doi:10.1029/2000jb000073, 2003.
- [11] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 东亚及太平洋边缘海高分辨率面波层析成像[J]. 地球物理学报, 2002, 45(5):646-663.  
Zhu Jieshou. Cao Jiamin, Cai Xuelin, et al. High resolution surface wave tomography in east Asia and west Pacific marginal sea [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2002, 45 (5):679-698 (in Chinese with English abstract).
- [12] 朱介寿, 蔡学林, 曹家敏, 等. 中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化[M]. 北京:地质出版社, 2005.  
Zhu Jieshou, Cai Xuelin, Cao Jiamin, et al. The Three Dimension Structure of Lithosphere and Its Evolution in South China and East China Sea [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2005 (in Chinese).
- [13] 袁学诚. 再论岩石圈地幔蘑菇云构造及其深部成因 [J]. 中国地质, 2007, 34(5), 737-758.  
Yuan Xuecheng. Mushroom structure of the lithospheric mantle and its genesis at depth:revisited [J]. *Geology in China*, 2007, 34 (5):737-758(in Chinese with English abstract).
- [14] 葛肖虹, 王敏沛, 刘俊来. 重新厘定“四川运动”与青藏高原初始隆升的时代、背景: 黄陵背斜构造形成的启示 [J]. 地学前缘, 2010, 17(4):206-217.  
Ge Xiaohong, Wang Minpei, Liu Junlai. Redefining the Sichuan movement and the age and background of Qingzang plateau's first uplift:The implication of Huangling anticline and its enlightenment[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(4):206-217(in Chinese with English abstract).
- [15] 万战生, 赵国泽, 汤吉, 等. 青藏高原东边缘冕宁—宜宾剖面电

- 性结构及其构造意义[J]. 地球物理学报, 2010, 53(3):585-594.
- Wan Zhansheng, Zhao Guoze, Tang Ji, et al. The electric structure of the crust along Mianning-Yibin profile in the eastern edge of Tibetan plateau and its tectonic implications [J]. Chinese J. Geophys., 2010, 53(3):585-594(in Chinese with English abstract).
- [16] He Bin, Xu Yigang, Chung Sunling. Sedimentary evidence for a rapid, kilometer-scale crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 213:391-405.
- [17] 徐义刚, 钟孙霖. 峨眉山大火成省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件[J]. 地球化学, 2001, 30(1):1-9.
- Xu Yigang, Zhong Sunlin. The Emeishan large igneous province: evidence for mantle plume activity and melting conditions [J]. Geochimica, 2001, 30(1):1-9(in Chinese with English abstract).
- [18] 宋谢炎, 侯增谦, 曹志敏, 等. 峨眉山大火成省省的岩石地球化学特征及时限[J]. 地质学报, 2001, 75(4):498-505.
- Song Xieyan, Hou Zengqian, Cao Zhimin, et al. Geochemical characteristics and period of the emei igneous province [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75 (4):498-505 (in Chinese with English abstract).
- [19] 朱士飞, 秦勇, 钱壮志, 等. 宾川—丽江地区二叠纪玄武岩岩石地球化学特征及其成因[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(2):130-138.
- Zhu Shifei, Qin Yong, Qian Zhuangzhi, et al. Geochemical characteristics and origin of Permian basalts in Binchuan-Lijiang Area, Yunnan Province[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(2):130-138 (in Chinese with English abstract).
- [20] 黄汲清. 中国主要地质构造单位[M]. 北京:地质出版社, 1954.
- Huang Jiqing. China Main Structure Unit [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1954(in Chinese).
- [21] 许靖华, 孙枢, 李继亮. 是华南造山带而不是华南地台 [J]. 中国科学(B辑), 1987, 10:1107-1115.
- Xu Jinghua, Sun Shu, Li Jiliang. South China is an orogenic rather than a cratonic [J]. Science in China (Series B), 1987, 10:1107-1115(in Chinese).
- [22] 华仁民, 毛景文. 试论中国东部中生代成矿大爆发[J]. 矿床地质, 1999, 18(4):300-308.
- Hua Renmin, Mao Jingwen. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in East China[J]. Mineral Deposit, 1999, 18(4):300-308(in Chinese with English abstract).
- [23] Wang Qingchen, Liu Jinsong, Du Zhili, et al. Tectonic framework and deep structure of South China and their constraint to oil-gas field distribution[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(1):180-178.
- [24] 李立. 上地幔低阻层顶面深度图 [C]//袁学诚主编. 中国地球物理图集. 北京:地质出版社, 1996.
- Li Li. Depth of the resistivity layer in upper mantle [C]//Yuan Xuecheng (ed.). Atlas of Geophysics in China. Beijing:Geological Publishing House, 1996(in Chinese).

### 3D Lithospheric structure of South China

YUAN Xue-cheng, HUA Jiu-ru

(Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Starting with 6 P wave tomography profiles across the South China block, the authors approached 3D structure of the South China lithosphere. The South China block can be divided into three parts bounded by Qin-Hang fault zone and Chuan-Xiang-Gui rift. To the southeast of Qin-Hang fault zone there is Cathaysia lithosphere which is a part of the SE Asia-West Pacific low velocity lithosphere, formed by intrusive uplifting of athenospheric materials. To the west of Chuan-Xiang-Gui rift is the Upper Yangtze lithosphere, which is hot near the surface but has a high velocity root at depth. On the west part of upper Yangtze block, Paleozoic mantle plume in the Panxi area formed a magma chamber at the crust-mantle transformed zone, resulting in basalt eruption in vast areas. Between the Chuan-Xiang-Gui rift and the Qin-Hang fault zone is mid-Yangtze lithosphere, which is cold and whose resistivity is low. The thickness calculated by heat flow and magnetotelluric sounding reached 300 km.

**Key words:** lithosphere of South China; Yangtze lithosphere; Huaxia lithosphere; Chuan-Xiang-Gui rift

**About the first author:** YUAN Xue-cheng, male, born in 1928, professor, engages mainly in the study of deep geophysics; E-mail: xcyuan@263.net.cn.