

# 中国大陆及邻区岩石圈地壳三维结构与动力学型式

蔡学林 朱介寿 曹家敏 程先琼

(成都理工大学, 四川 成都 610059)

**摘要:**通过中国大陆及邻区地震测深剖面的系统构造解析,建立起中国大陆岩石圈地壳厚度与速度结构模型。本文根据地壳厚度与速度结构模型、地壳变形结构样式、地壳地质结构与构造演化、地壳运动学与动力学等四方面标志,将中国大陆岩石圈地壳划分为 3 类 6 种地壳结构-动力学型式:克拉通型褶推式结构-挤压动力学型式、克拉通型地垒结构-拉伸动力学型式、增厚型高原扇形结构-碰撞楔入动力学型式、增厚型造山带楔状结构-俯冲楔入动力学型式、减薄型盆岭结构-块体伸展动力学型式和减薄型铲状结构-整体伸展动力学型式。笔者探讨了克拉通型地壳、增厚型地壳和减薄型地壳的基本特征、相互关系及其地质意义。

**关键词:**地壳;岩石圈;地震测深;构造解析;三维结构;动力学型式;中国大陆

**中图分类号:**P544      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-3657(2007)04-0543-15

大陆岩石圈地壳三维细结构的探测与构造演化动力学的研究是当代地球科学前沿领域之一。为了研究中国大陆及其海域岩石圈地壳三维细结构与性质,资源和能源聚集区的预测、寻找与勘探,及其对地质灾害和自然环境的影响与控制,从 20 世纪 50 年代开始,中国有关部门对岩石圈地壳进行了地震测深与研究<sup>[1-38]</sup>。笔者从 20 世纪 80 年代起参加原地质矿产部主持的东秦岭 QB-1 地学断面<sup>[4,27,38]</sup>和阿勒泰—台湾地学断面地震探测与地质研究<sup>[1,2,5,9]</sup>。随后,在承担国家自然科学基金重点项目和国土资源部重点科技专项研究时,对近 30 年来国土资源部(原为地质矿产部)、中国地震局和中国科学院等部门完成的中国大陆 123 条总长 55 800 km 的地震测深剖面进行了系统构造解析。为了进行大陆岩石圈地壳结构对比研究,还对欧亚地区 40 条总长 39 600 km 的地震剖面<sup>[39-45]</sup>进行了构造解析。根据 163 条总长 95 400 km 地震测深剖面资料和数据,建立起中国大陆及邻区岩石圈地壳三维速度与厚度结构模型,完成沉积层等厚度图、地壳厚度分布图和地壳  $V_p$  速度分布图、岩石圈壳幔韧性剪切带构造略图以及典型构造带地壳构造解析断面图编制。通过上述系统综合研究,获得不少新成果和新认识。在建立起中国大陆岩石圈地壳厚度与速度结构模型基础上,笔者重点论述了克拉通型地壳、增厚型地壳和减薄型地壳的基本特征、相互关系及其地质意义等。

## 1 中国大陆及邻区岩石圈地壳三维结构模型

### 1.1 地震测深剖面构造解析思路

运用地球层块构造、比较构造学与解析构造学的理论和方法<sup>[46-48]</sup>,对已完成的地震测深剖面<sup>[1-37,39-45]</sup>进行系统分析、数据采集和地质构造解析(图 1),完成众多地震测深剖面的构造解析图编制,获得 39 600 多个数据,这些数据为研究中国大陆和欧亚大陆岩石圈地壳三维结构及其动力学型式提供了重要依据。

### 1.2 地壳三维速度结构模型

国内外不少学者<sup>[35,38,46-53]</sup>对地壳结构模型进行过探讨。笔者根据 163 条总长 95 400 km 地震测深剖面的构造解析和大量数据,编制出中国及邻区地壳厚度分布图(图 2)。在建立起地壳三维速度结构模型基础上,结合地质学、构造地质学的分析研究,以地壳厚度演化为基本依据,将中国大陆地壳划分为 3 种结构构造演化类型:克拉通型地壳、增厚型地壳和减薄型地壳(图 3),并建立起中国大陆 1、2、3 级构造单元岩石圈地壳厚度与速度结构模型。

### 1.3 大陆地壳壳内低速层分布趋势

中国大陆地震测深剖面成果显示,克拉通型地壳壳内低速层不发育<sup>[2,6,16,17]</sup>,增厚型地壳普遍发育壳内低速层<sup>[7,8,18-20,23,24]</sup>,

收稿日期:2007-03-15;改回日期:2007-05-08

基金项目:国家自然科学基金重点项目(49734150、40234047)和国土资源部重点科技专项(20001010206)联合资助。

作者简介:蔡学林,男,1935 生,教授,从事构造地质和深部地质教学与研究;E-mail:Cai Xulin 1935@sohu.com。

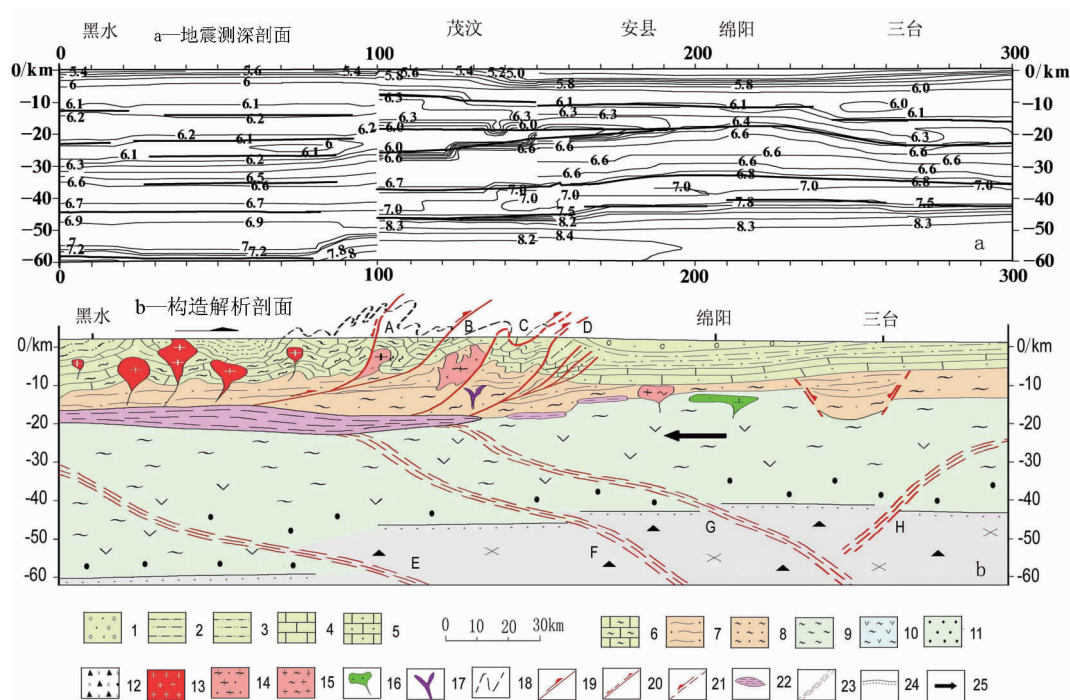


图1 龙门山造山带北段岩石圈楔状构造剖面图

- 1—白垩系—新近系沉积岩系; 2—上三叠统—侏罗系沉积岩系; 3—三叠系浅变质沉积岩系; 4—泥盆系—中三叠统碎屑—碳酸盐岩系;
- 5—震旦系—志留系碎屑—碳酸盐岩系; 6—震旦系—志留系浅变质沉积岩系; 7—中元古界—新元古界下部浅变质岩系;
- 8—古元古界中浅变质岩系; 9—太古宙深变质岩系; 10—中下地壳闪长质变质岩类; 11—下地壳碱性麻粒岩类;
- 12—岩石圈上地幔尖晶石—辉橄岩类; 13—燕山期花岗岩类; 14—晋宁期花岗岩类; 15—中条期花岗岩类; 16—太古宙碱性岩类;
- 17—中条期超碱性岩类; 18—二叠系标志层; 19—逆冲断裂带; 20—早期逆冲断裂带, 晚期伸展正断裂带; 21—伸展正断裂带;
- 22—壳内低速层; 23—壳幔韧性剪切带; 24—莫霍界面; 25—块体相对运移方向; A—汶川早期逆冲断裂带, 晚期伸展正断裂带;
- B—北川—九顶山逆冲断裂带; C—映秀逆冲断裂带; D—彭灌逆冲断裂带; E—黑水壳幔韧性剪切带; F—安县壳幔韧性剪切带;
- G—绵阳壳幔韧性剪切带; H—龙泉山壳幔韧性剪切带

Fig.1 Wedge-shaped tectonic section of the lithosphere in the northern segment of the Longmen Mountains orogenic belt

- 1—Cretaceous—Neogene sedimentary series; 2—Upper Triassic—Jurassic sedimentary series; 3—Triassic low-grade metasedimentary series;
- 4—Devonian—Middle Triassic clastic—carbonate series; 5—Sinian—Silurian clastic—carbonate series; 6—Sinian—Silurian low-grade metasedimentary series; 7—Mesoproterozoic—lower Neoproterozoic low-grade metamorphic series; 8—Paleoproterozoic medium- and low-grade metamorphic series; 9—Archean high-grade metamorphic series; 10—Dioritic metamorphic rocks in the middle and lower crust;
- 11—Basic granulite in the lower crust; 12—Spinel lherzolite of the upper mantle; 13—Yanshanian granitoids; 14—Jinningian granitoids;
- 15—Zhongtiaoan granitoids; 16—Archean basic rocks; 17—Zhongtiaoan ultrabasic rocks; 18—Permian marker bed; 19—Thrust zone;
- 20—Thrust zone in the early stage and extensional normal fault zone in the late stage; 21—Extensional normal fault zone;
- 22—Intracrustal low-velocity layer; 23—Crust—mantle ductile shear zone; 24—Moho; 25—Directions of relative movements of blocks;
- A—Wenchuan thrust zone in the early stage and extensional normal fault zone in the late stage; B—Beichuan—Jiudingshan thrust zone;
- C—Yingxiu thrust zone; D—Pengxian—Guanxian thrust zone; E—Heishui crust—mantle ductile shear zone; F—Anxian crust—mantle ductile shear zone; G—Mianyang crust—mantle ductile shear zone; H—Longquanshan crust—mantle ductile shear zone

例如, 青藏高原东缘断续发育壳内低速层, 由东南向西北壳内低速层埋藏逐渐加深, 在汶川地区壳内低速层埋深在 15~18 km, 厚 2~3 km, 向西北到阿坝一线, 加深到 23~28 km, 厚约 5 km, 层速度为 6.00~6.10 km/s(图 1)。在减薄型地壳中构造变形较强的地区或裂谷拗陷带内多存在壳内低速层 [3,5,9-14], 例如, 湘中到罗霄山一线壳内低速层埋深在 13~16 km, 厚 2~3 km, 层速度为 5.60~5.80 km/s [5-9]。壳内低速层的发育为增厚型地壳和减薄型地壳的构造变形提供了重要的动力学边界条件之一。

#### 1.4 大陆莫霍界面或壳幔过渡带类型

莫霍界面是地球层圈结构非常重要的一级间断面, 以此

为依据, 编制出全球或地区性莫霍界面埋深图 [53-54]。近年的地震测深研究表明, 莫霍界面不完全是一简单的界面, 而是具有一定厚度的过渡带, 通常称为壳幔过渡带 [57-59]。经初步研究 [57], 中国大陆壳幔过渡带大体有 3 种类型: 一级间断面壳幔过渡带 [57,59]、多薄层状结构壳幔过渡带 [57-59] 和叠瓦式壳幔过渡带 [4,36,57]。

#### 1.5 中国大陆岩石圈的两套断裂系统

根据众多地震测深剖面的构造解析, 结合地壳表层构造研究和天然地震面波层析成像成果 [8,60-62], 发现大陆岩石圈存在既有联系, 又有显著区别的两套断裂系统: 一套是地壳表

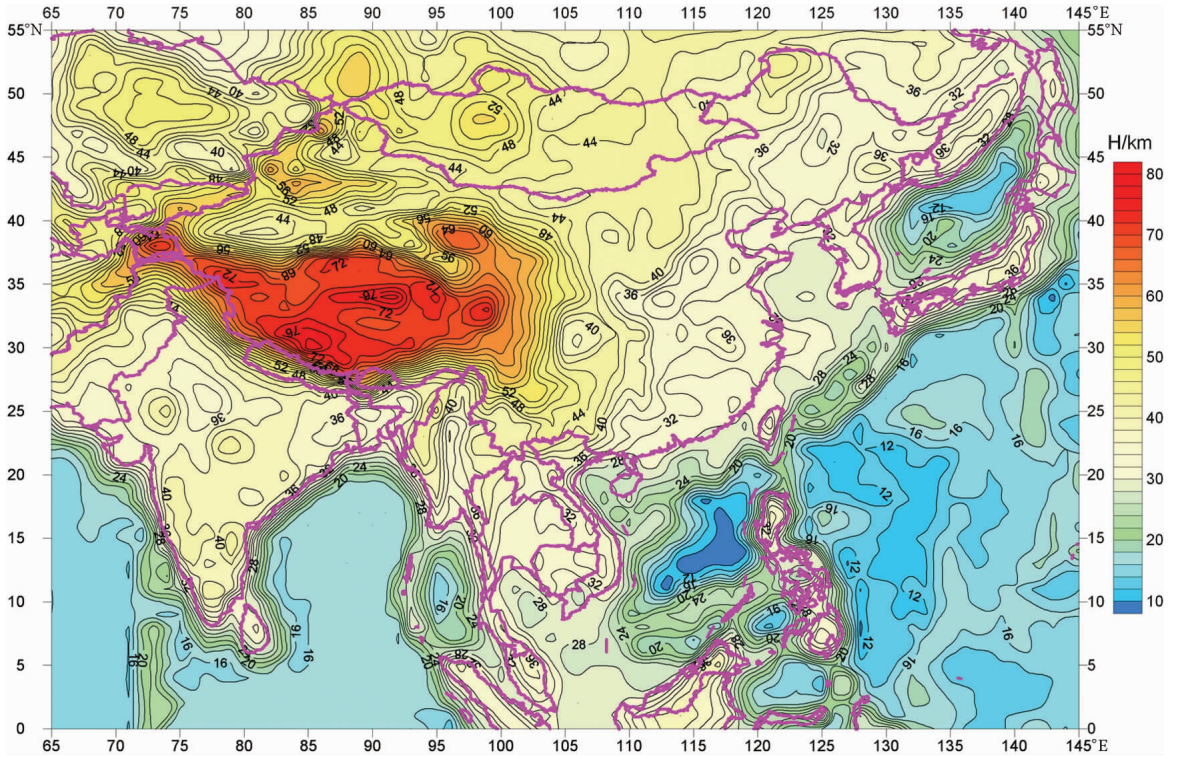


图 2 中国及邻区地壳厚度分布

Fig.2 Crust thickness distribution of China and its adjacent regions

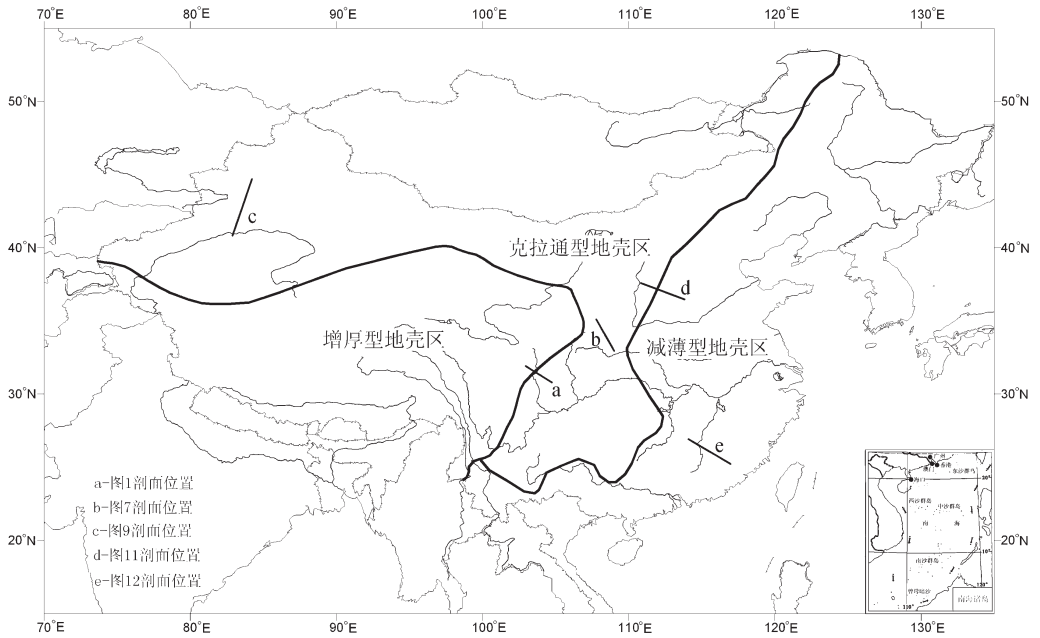


图 3 中国大陆岩石圈地壳结构类型分布

Fig.3 Distribution of structure types of lithospheric crust of continental China

层存在的以脆性剪切带为主的断裂系统,向深部多消失在壳内低速层中;另一套是以切割莫霍界面或壳幔过渡带的韧性剪切带系统,存在幔源糜棱岩结构<sup>[64-69]</sup>称为壳幔韧性剪切带<sup>[64]</sup>或岩石圈韧性剪切带<sup>[63]</sup>。研究表明,相当一部分壳幔韧性剪切带并未向上延伸到地壳浅部(图 1),二者关系比较复杂。关于岩石圈两套断裂系统的特征、几何关系及其成因问题,另有文章论述<sup>①</sup>。大陆岩石圈两套断裂系统的发现与研究,为建立大陆岩石圈地壳结构模型及其结构样式提供了较可靠的依据,并将壳幔韧性剪切带作为划分大陆岩石圈构造单元的标志之一。

1.6 岩石圈地壳三维变形结构样式

很多研究者对中国大陆地壳的变形结构样式进行过研究<sup>[11,27,48-50]</sup>,笔者以地震测深剖面为依据,结合地壳表层地质构造的研究、典型地区深地震测深剖面的构造解析(图 1)、壳

内低速层性质与分布规律,以及中国大陆岩石圈壳幔韧性剪切带<sup>[63-69]</sup>等的系统综合研究,初步建立起中国大陆岩石圈地壳 6 种三维变形结构样式(表 1):褶推式结构、地垒式结构、扇形结构、楔状结构、铲形结构和盆岭结构,并建立起相应的地壳厚度与速度结构模型(图 4)。

1.7 岩石圈地壳三维结构-动力学型式

根据上述地壳厚度与速度结构模型、地壳变形结构样式、地壳物质结构与构造演化特征、地壳的运动学与动力学型式等 4 方面标志,笔者将中国大陆岩石圈地壳划分为 6 种结构-动力学型式:褶推式结构——挤压动力学型式、地垒式结构——拉伸动力学型式、高原扇形结构——碰撞楔入动力学型式、造山带楔状结构——俯冲楔入动力学型式、铲形结构——整体伸展动力学型式和盆岭结构——块体伸展动力学型式(表 1,图 5)。对比研究表明,中国大陆是全球大陆岩

表 1 中国大陆地壳结构模型简表

Table 1 Summary of structural types of continental crust in China

地壳结构类型	构造单元名称	地壳 $V_p$ 速度结构模型 (km/s)					地壳厚度结构模型(km)				变形结构样式	运动学与动力学型式	地壳结构——动力学型式
		上地壳速度平均值	中地壳速度平均值	下地壳速度平均值	地壳速度平均值	上地幔顶部 Pn 波	上地壳厚度平均值	中地壳厚度平均值	下地壳厚度平均值	地壳厚度平均值			
克拉通型地壳	塔里木地块 (107)	5.73	6.38	6.83	6.26	8.03	18.11	13.09	16.00	47.20	褶推式结构	挤压	褶推式结构——挤压动力学型式
	上扬子地块 (98)	5.83	6.24	6.71	6.28	7.88	15.88	13.21	17.53	46.62	褶推式结构	挤压	
	准噶尔地块 (72)	5.87	6.34	6.94	6.39	7.95	15.65	16.48	17.69	49.84	褶推式结构	挤压	
	鄂尔多斯地块 (58)	5.78	6.34	6.73	6.24	8.01	16.43	11.84	14.21	42.48	地垒式结构	拉伸裂陷	地垒式结构——拉伸动力学型式
增厚型地壳	青藏地块(216)	5.86	6.32	6.74	6.29	7.97	23.25	16.31	23.56	63.09	扇形结构	三向碰撞楔入	高原扇形结构——碰撞楔入动力学型式
	天山造山带 (10)	6.05	6.29	6.83	6.40	8.01	15.78	13.20	21.36	50.50	楔状结构	俯冲楔入	造山带楔状结构——俯冲楔入动力学型式
减薄型地壳	华南地块(176)	5.84	6.24	6.82	6.26	8.02	12.43	10.70	10.49	33.57	铲形结构	整体伸展	铲形结构——整体伸展动力学型式
	华北地块 (230)	5.80	6.28	6.76	6.20	8.02	13.80	10.63	10.04	34.58	盆岭结构	块体伸展裂陷	盆岭结构——块体伸展裂陷动力学型式
	吉黑地块 (36)	5.95	6.43	6.84	6.36	7.99	13.31	11.59	11.95	36.86	盆岭结构	块体伸展裂陷	

注:括弧内数字代表参加地壳 P 波速度和厚度的数据数。

①蔡学林,曹家敏,朱介寿. 中国大陆岩石圈壳幔韧性剪切带系统. 见:东亚西太平洋边缘海岩石圈软流圈细结构及其深部过程, 国家自然科学基金重点项目(40234047)研究报告, 2007:216-263.

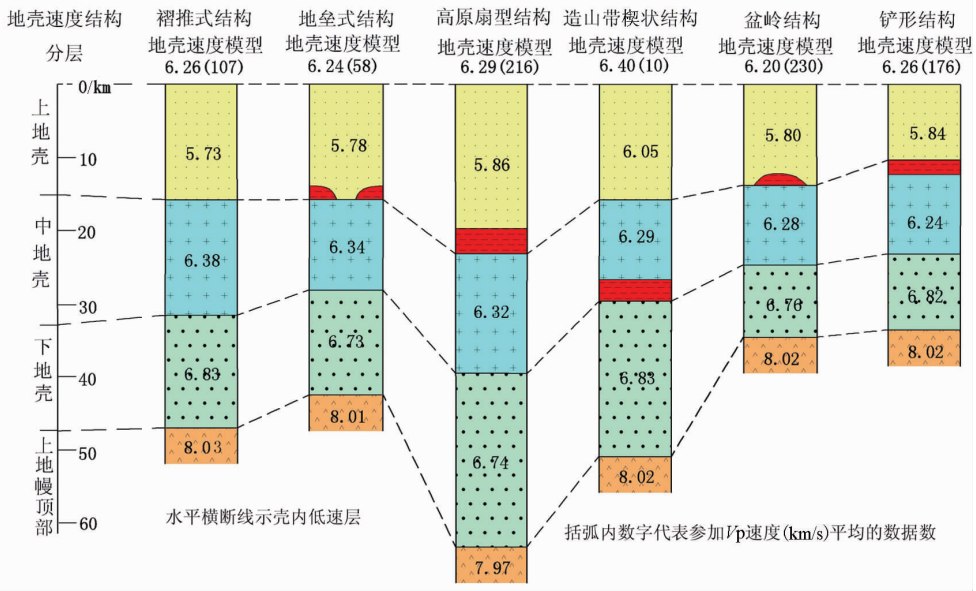


图 4 中国大陆地壳 6 种变形结构样式厚度与速度模型

Fig.4 Model of thickness and P-wave velocities of six deformation structure types of continental crust in China

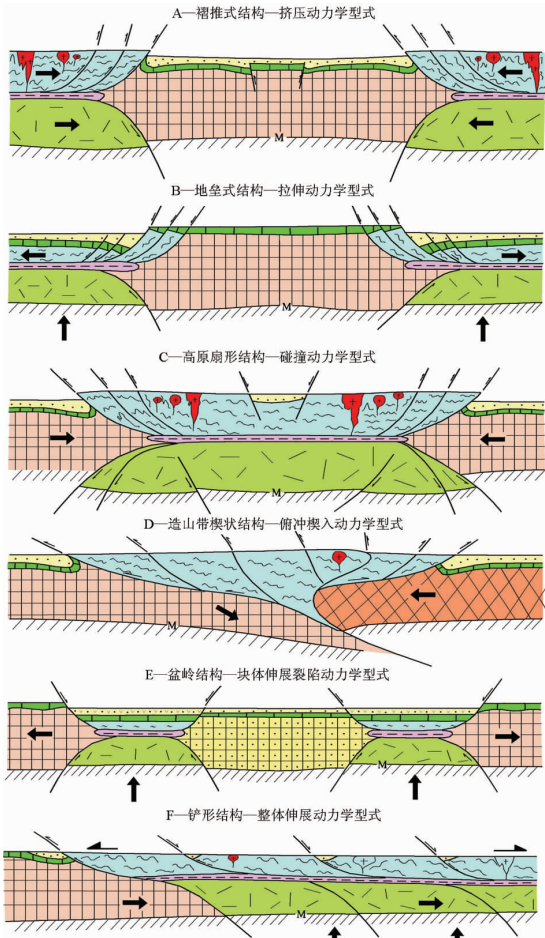


图 5 中国大陆地壳三维结构—动力学型式

Fig.5 3D structural and dynamic types of continental crust in China

石圈地壳结构—动力学型式发育最典型、类型最多的地区之一。

## 2 克拉通型地壳结构——动力学型式

在地壳演化过程中,太古—元古宙已形成大陆地壳,显生宙相对稳定发展的地壳称克拉通型地壳,按有无沉积盖层分地盾结构与地台结构;前者基本无显生宙沉积盖层的地壳,如波罗的地盾,地震测深显示<sup>[41-42]</sup>,该地盾地壳厚度平均值为 48.07 km,地壳  $V_p$  速度平均值大,为 6.56 km/s;后者显生宙以来存在沉积盖层的地壳,如上扬子地块、塔里木地块和鄂尔多斯地块等(图 3、表 1)。中国大陆地壳仅有克拉通型地台结构,地震测深表明,中国大陆克拉通型地壳厚度平均值为 46.77 km,地壳  $V_p$  速度平均值较低为 6.29 km/s。根据地壳变形结构样式、运动学与动力学方式,可将中国大陆克拉通型地壳分为:褶皱推式结构——挤压动力学型式和地垒式结构——拉伸动力学型式。

### 2.1 褶皱推式结构——挤压动力学型式

以上扬子地块、塔里木地块和准噶尔地块的地壳结构为代表,塔里木地块和上扬子地块基底分别发育 3 263 Ma 和 2 957 Ma<sup>[66]</sup>太古宙岩石矿物信息,存在太古宙古陆核,古生代发育台型海相沉积,古生代晚期发育大面积玄武岩,中生代叠置了挤压沉积盆地。地震测深表明,塔里木地块地壳厚度平均值为 47.20 km,  $V_p$  速度平均值为 6.26 km/s,  $P_n$  波速度平均值为 8.03 km/s(表 1),莫霍界面或壳幔过渡带表现为一级间断面<sup>[9]</sup>,上扬子地块地壳厚度平均值为 46.60 km,  $V_p$  速度平均值为 6.28 km/s,  $P_n$  波速度平均值为 7.88 km/s(表 1)。该类型地壳内低速层不发育,仅在边缘碰撞造山带中发育

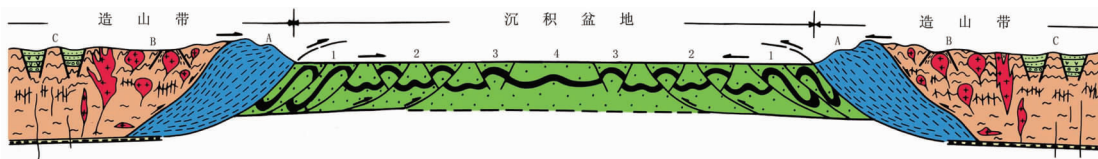


图6 克拉通型地壳浅层变形构造样式

1—盆缘叠瓦逆冲断裂构造带;2—盆内断层三角构造带;3—盆内冲起构造带;4—中央宽缓褶皱构造带;A—造山带边缘逆冲推覆构造带;B—造山带内部挤压—伸展花岗岩构造带;C—造山带中央伸展火山—沉积盆地构造带

Fig.6 Structural styles of deformation at the shallow level of craton-type crust

1—Imbricate thrust structure zone at basin margins;2—Fault triangle structure zone in a basin;3—Pop-up structure zone in a basin;4—Gentle fold structure zone in the basin center;A—Thrust-nappe structure zone at the margin of an orogenic belt;

B—Compressional-extensional granite structure zone in the orogenic belt;

C—Extensional volcano-sedimentary structure zone in the center of an orogenic belt

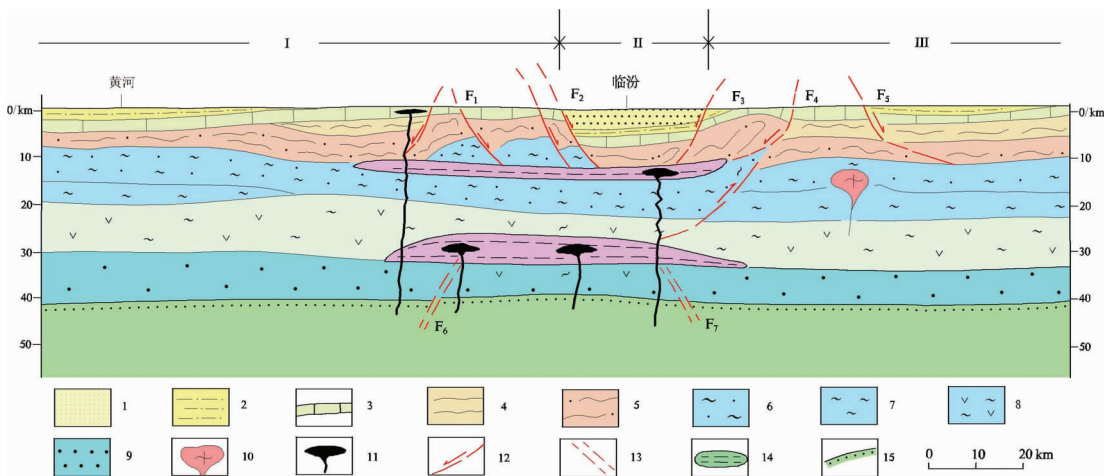


图7 汾河裂谷及邻区地壳结构略图(据地震测深剖面<sup>[16]</sup>的构造解析)

1—新生界沉积岩系;2—中生界沉积岩系;3—古生界沉积岩系;4—中新元古界浅变质岩系;5—古元古界中浅变质岩系;6—新太古界中深变质岩系;7—中古太古界深变质岩系;8—中下地壳闪长质变质岩类;9—下地壳基性麻粒岩类;10—太古宙TTG岩套;11—基性侵入岩;12—伸展正断裂带;13—壳幔韧性剪切带;14—壳内低速层;15—莫霍界面;F<sub>1</sub>—离石伸展正断裂带;F<sub>2</sub>—罗云伸展正断裂带;F<sub>3</sub>—霍山伸展正断裂带;F<sub>4</sub>—浮山伸展正断裂带;F<sub>5</sub>—郭店伸展正断裂带;F<sub>6</sub>—吕梁壳幔韧性剪切带;F<sub>7</sub>—临汾壳幔韧性剪切带;I—鄂尔多斯地块;II—汾河裂谷;III—太行山构造带

Fig.7 Schematic crustal structure map of the Fenhe rift and its adjacent areas

(Structural analysis of the seismic sounding section<sup>[16]</sup>)

1—Cenozoic sedimentary series;2—Mesozoic sedimentary series;3—Paleozoic sedimentary series;4—Meso- and Neoproterozoic low-grade metamorphic series;5—Paleoproterozoic medium- and low-grade metamorphic series;6—Neoproterozoic medium- and high-grade metamorphic series;7—Meso- and Paleoproterozoic high-grade metamorphic series;8—Dioritic metamorphic rocks in the middle and lower crust;9—Basic granulite in the lower crust;10—Archean TTG suite;11—Basic intrusive rocks;12—Extensional normal fault zone;

13—Crust-mantle ductile shear zone;14—Intracrustal low-velocity layer;15—Moho;F<sub>1</sub>—Lishi extensional normal fault zone;

F<sub>2</sub>—Luoyun extensional normal fault zone;F<sub>3</sub>—Huoshan extensional normal fault;F<sub>4</sub>—Fushan extensional normal fault zone;

F<sub>5</sub>—Guodian extensional normal fault zone; F<sub>6</sub>—Lüliang crust-mantle ductile shear zone;F<sub>7</sub>—Linfen crust-mantle ductile shear zone;

I—Ordos block;II—Fenhe rift;III—Taihangshan structural zone

壳内低速层和壳幔韧性剪切带(图1)。挤压沉积盆地内隆起区地壳厚度相对较小, V<sub>p</sub> 速度相对较大, 如塔中隆起地壳厚度平均值仅有 40.03 km, 地壳 V<sub>p</sub> 速度平均值为 6.34 km/s, 坳陷带地壳厚度较大, V<sub>p</sub> 速度相对较小, 如塔西南坳陷带地壳厚度平均值为 48.31 km, 地壳 V<sub>p</sub> 速度平均值为 6.14 km/s。盆地边缘造山带发育向盆地逆冲的大型推覆构造(图1), 由盆地边

缘到中心构造变形强度逐渐减弱, 与盆缘逆冲推覆构造一起, 构成褶皱推式结构<sup>[67-68]</sup>(图5-A、图6), 在沉积盆地与造山带之间岩石圈地壳断面发育楔状构造(图1), 这些特征表明该地壳在中新生代以来具有挤压构造变形特征(图5-A)。

### 2.2 地垒式结构——拉伸动力学型式

以鄂尔多斯地块为代表, 该地块太古宙时期存在古陆

核,元古宙克拉通化,古生代处于相对稳定的地台发展阶段,中生代叠置了鄂尔多斯陆相沉积盆地,新生代时期地块边缘发育新生代伸展裂谷,如银川裂谷、呼包裂谷、渭河裂谷和汾河裂谷(图7)等,仅在地块西南缘发育新生代晚期的六盘山逆冲推覆构造。地震测深表明,该地块地壳  $V_p$  速度平均值为 6.24 km/s, 上地幔顶部 Pn 波速度平均值为 8.01 km/s, 地壳厚度平均值较小,仅 42.48 km(表1、图4),在鄂尔多斯地块或鄂尔多斯沉积盆地中部地壳相对隆起,地壳厚度相对较小,向外略有增大趋势,在向周边裂谷带地壳厚度减薄幅度较大,其中渭河裂谷地壳厚度平均值仅有 34.5 km,相应上地幔隆起。地块内部多发育大型宽缓褶皱带,壳内低速层不发育<sup>[11-14,16]</sup>;地块边缘发育阶梯状伸展正断裂带,这些正断层多向地块外倾斜,地表倾角较陡向深处变缓,多消失在裂谷带深部壳内低速层中(图7),很可能壳内低速层的存在是该地块边缘新生代构造活动性标志之一。在地块边缘,根据地震测深推断发育向地块内倾斜的伸展型壳幔韧性剪切带<sup>[11-14,16]</sup>(图7)。这些特征显示,该地块新生代以来具有拉伸变形的特性,从而形成了地垒式结构,因此,鄂尔多斯地块属克拉通型地垒式结构——拉伸动力学型式(图5-B)。

### 3 增厚型地壳结构-动力学型式

增厚型地壳在构造演化过程中地壳是逐渐增厚的,或者是地壳逐渐增厚到逐渐减薄再到逐渐增厚,与克拉通型地壳相比,此类地壳厚度是增厚的,青藏地区是中国大陆增厚型地壳的典型代表(图2-3),亦是全球大陆增厚型地壳的典型代表。根据变形结构样式以及动力学特征可分两种:高原扇形结构——碰撞楔入动力学型式和造山带楔状结构——俯冲楔入动力学型式。

#### 3.1 高原扇形结构——碰撞楔入动力学型式

青藏高原是增厚型地壳的典型地区,地质地球化学研究表明,青藏高原羌塘地块结晶基底存在 3204 Ma 和 2762 Ma 的太古宙岩石矿物信息,羌塘地块可能存在太古宙古陆核<sup>[9]</sup>。地震测深数据显示,青藏增厚型地壳  $V_p$  速度为 6.15~6.43 km/s(图8),地壳  $V_p$  速度平均值为 6.29 km/s,与克拉通型地壳  $V_p$  速度平均值相似(表1,图4),上地幔顶部 Pn 波速度平均值为 7.97 km/s。青藏高原地壳厚度巨大(图8),其中在藏南最大,达 78.5 km,祁连山构造带内亦高达 74.7 km,地壳厚度平均值为 63.09 km(表1)。据深源包体岩石地球化学研究<sup>[4]</sup>,中更新世以来西昆仑构造带地壳快速增厚 11 km 以上。从增厚型上、中、下地壳分别统计表明,地壳的增厚主要体现在上地壳与下地壳中,前者厚度平均值达 23.25 km,后者厚度平均值达 23.56 km,而中地壳厚度仅有 16.31 km,增厚幅度很小(表1,图4,8)。根据地震测深  $V_p$  速度结构的系统分析,结合深源包体岩石学和地球化学等研究<sup>[4]</sup>,青藏高原地壳物质结构大体可分4层:沉积浅变质褶皱—花岗岩层、闪长质中深变质岩层、长英质麻粒岩层和基性麻粒岩层。高原内部和边

缘碰撞造山带上地壳底部与中地壳顶部普遍发育壳内低速层(图8),它可能是高原最重要的动力学构造变形面之一,其上的断裂带在剖面上构成扇形结构,推断其下的壳幔韧性剪切带<sup>[6]</sup>在断面上构成倒扇形结构<sup>[7]</sup>(图5-C),高原周边发育向四周逆冲的巨型推覆构造,青藏高原边缘岩石圈地壳断面普遍存在楔状构造或鳄鱼构造<sup>[21,71]</sup>(图1),三向碰撞楔入作用<sup>[25,71]</sup>(图5-C)可能是高原增厚和高原隆升构造变形最重要的动力学边界条件之一。

#### 3.2 造山带楔状结构——俯冲楔入动力学型式

以天山造山带地壳结构和台湾中央造山带地壳结构为代表。人工地震测深表明<sup>[17-18]</sup>,天山造山带地壳厚度平均值为 51 km(图4),最厚可达 62 km。天山造山带地壳地质构造演化表明,该造山带在古生代晚期地壳厚度可能由薄逐渐增厚,到中生代时期地壳厚度可能由厚变薄,新生代以来,地壳厚度再由薄逐渐增厚到现今的地壳厚度。地壳  $V_p$  速度平均值为 6.40 km/s, 上地幔顶部 Pn 波速度平均值为 7.99~8.01 km<sup>[18]</sup>。天山造山带中南段向北倾斜的逆冲断裂带和北段向南倾斜的逆冲断裂带向中下地壳延深时,逐渐汇聚到向北倾斜的壳幔韧性剪切带上<sup>[72]</sup>(图9和图5-D),显示天山造山带南侧塔里木地块向北深俯冲,而天山造山带北侧准噶尔地块向南楔入的动力学态势(图9)。祁连山造山带地壳亦显示楔状结构——俯冲楔入动力学型式<sup>[9]</sup>。地震测深表明<sup>[2]</sup>,台湾中央造山带地壳急剧增厚,最厚可达 54.4 km,对应地表玉山高达 3 997 m,系华南最高峰,亦是华南地壳厚度最大的造山带,地壳  $V_p$  速度平均值为 6.29 km/s。台东纵谷以西向东倾斜的逆冲断裂带,向深部汇聚到向东缓倾的主滑脱拆离面上,台东纵谷以东的逆冲断裂带多向西倾斜,向深部汇聚到花莲—台东碰撞缝合带中,推断该碰撞缝合带延深到中地壳底部转向东倾斜,与现今正在活动的东倾主滑脱拆离面切交,并切割莫霍界面,使两侧莫霍面埋深相差高达 20 km,显示台湾中央造山带以东地壳断面存在楔状构造或鳄鱼构造<sup>[61,73]</sup>,由此表明台湾中央造山带西侧的华南地块向东深俯冲,台湾中央造山带东侧的菲律宾板块向西楔入的动力学态势,从而形成晚新生代以来发育的台湾中央造山带。阿尔卑斯造山带岩石圈中上部亦显示楔状结构——俯冲楔入动力学型式<sup>[74,75]</sup>。由此表明,楔状结构——俯冲楔入动力学型式可能是碰撞造山带最基本的结构-动力学型式。

### 4 减薄型地壳结构-动力学型式

减薄型地壳可由增厚型地壳或克拉通型地壳经构造演化逐渐减薄形成,大兴安岭—太行山—雪峰山及其以东地区属减薄型地壳结构(图3)。中国大陆岩石圈减薄型地壳  $V_p$  速度平均值为 6.24 km/s,地壳厚度平均值为 34.18 km。根据构造变形和运动学及动力学特征可将它分为两种结构-动力学型式:盆岭结构——块体伸展动力学型式和铲形结构——整体伸展动力学型式。

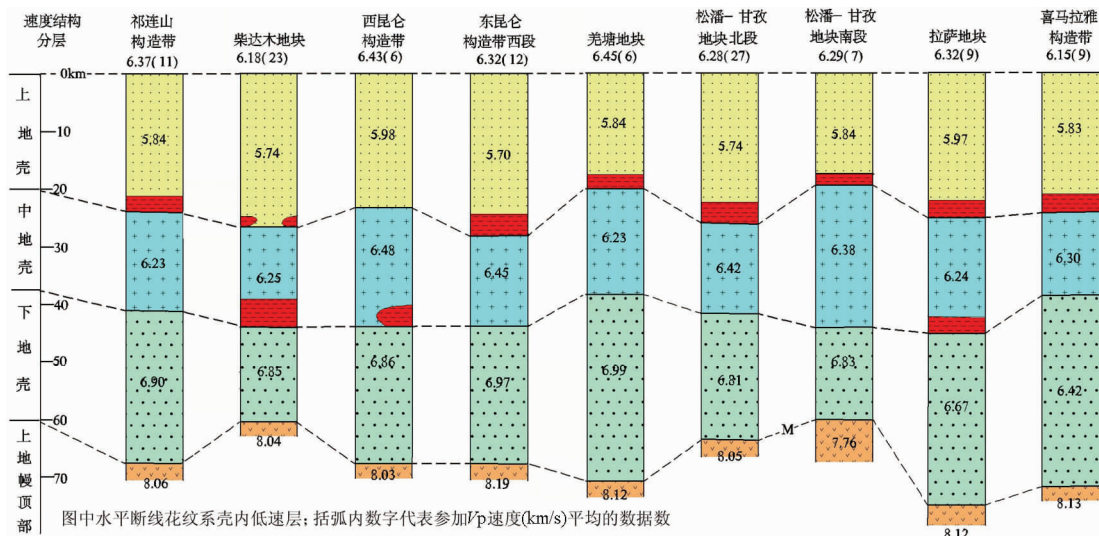


图 8 青藏地壳厚度与速度结构模型

Fig.8 Model of crustal thickness and velocity structure on the Qinghai-Tibet Plateau

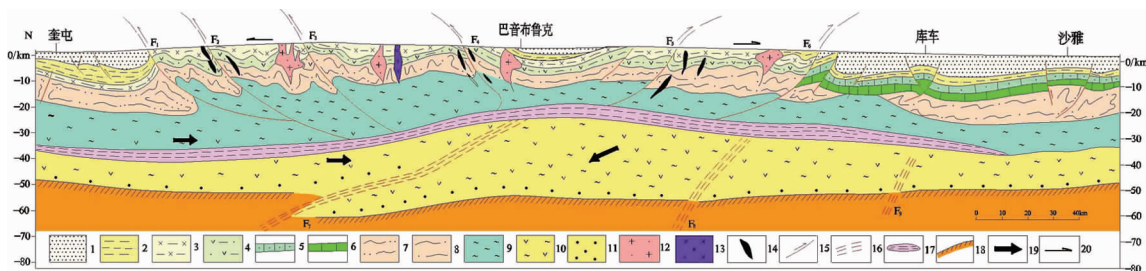


图 9 天山造山带地壳结构略图(地震测深剖面<sup>[18]</sup>的构造解析)

- 1—新生界沉积岩系;2—中生界沉积岩系;3—上古生界火山—沉积—浅变质岩系;4—下古生界火山—沉积—浅变质岩系;
- 5—上古生界碎屑—碳酸盐岩系;6—下古生界—震旦系碎屑—碳酸盐岩系;7—下古生界—元古宇中浅变质岩系;
- 8—元古宇中浅变质岩系;9—太古宇深变质岩系;10—中下地壳闪长质变质岩类;
- 11—下地壳底部基性麻岩类;12—华力西期花岗岩类;13—辉长岩类;14—蛇绿岩;15—逆冲断裂带;
- 16—壳内低速层;17—壳幔韧性剪切带;18—莫霍界面;19—块体相对运移方向;20—推覆体相对运移方向;
- F<sub>1</sub>—准噶尔南缘断裂带;F<sub>2</sub>—博罗科努断裂带;F<sub>3</sub>—尼勒克断裂带;F<sub>4</sub>—那拉提碰撞缝合带;
- F<sub>5</sub>—哈尔克山碰撞缝合带;F<sub>6</sub>—库尔勒断裂带;F<sub>7</sub>—北天山壳幔韧性剪切带;
- F<sub>8</sub>—南天山壳幔韧性剪切带;F<sub>9</sub>—库车壳幔韧性剪切带

Fig.9 Schematic crustal structure map of the Tianshan orogenic belt (Structural analysis of the seismic sounding section<sup>[18]</sup>)

- 1—Cenozoic sedimentary series;2—Mesozoic sedimentary series;3—Upper Paleozoic volcanic—sedimentary—low—grade metamorphic series;4—Lower Paleozoic volcanic—sedimentary—low—grade metamorphic series;5—Upper Paleozoic clastic—carbonate series;
- 6—Lower Paleozoic—Sinian clastic—carbonate series;7—Lower Paleozoic—Proterozoic medium— and low—grade metamorphic series;8—Proterozoic medium— and low—grade metamorphic series;9—Archean high—grade metamorphic series;
- 10—Dioritic metamorphic series in the middle and lower crust;11—Basic granulite at the base of the lower crust;
- 12—Variscan granitoids;13—Gabbros;14—Ophiolite;15—Thrust zone;16—Intracrustal low—velocity layer;
- 17—Crust—mantle ductile shear zone;18—Moho;19—Directions of relative movements of blocks;
- 20—Directions of relative movements of nappes;F<sub>1</sub>—Southern Junggar marginal thrust zone;
- F<sub>2</sub>—Borohoro fault zone;F<sub>3</sub>—Nilka fault zone;F<sub>4</sub>—Narat collisional suture zone;
- F<sub>5</sub>—Halik collisional suture zone;F<sub>6</sub>—Korla fault zone;F<sub>7</sub>—North Tianshan crust—mantle ductile shear zone;
- F<sub>8</sub>—South Tianshan crust—mantle ductile shear zone;F<sub>9</sub>—Kuqa crust—mantle ductile shear zone



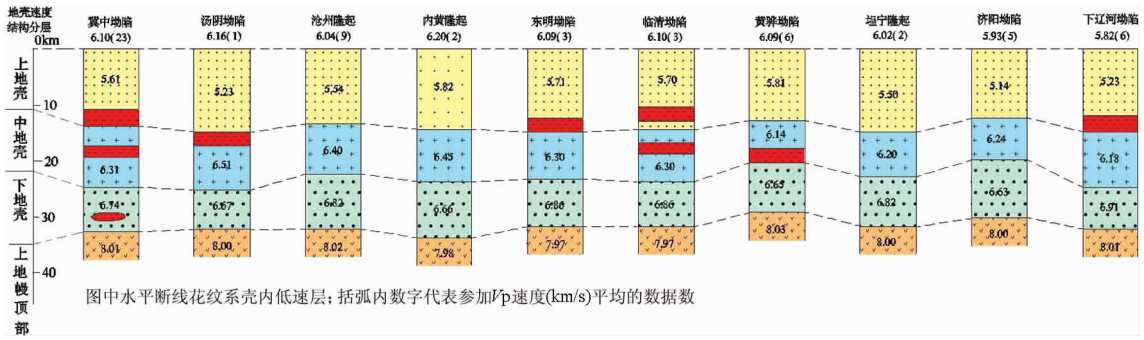


图 10 华北裂谷带地壳厚度与速度结构模型

Fig.10 Model of crustal thickness and velocity structure of the North China rift zone

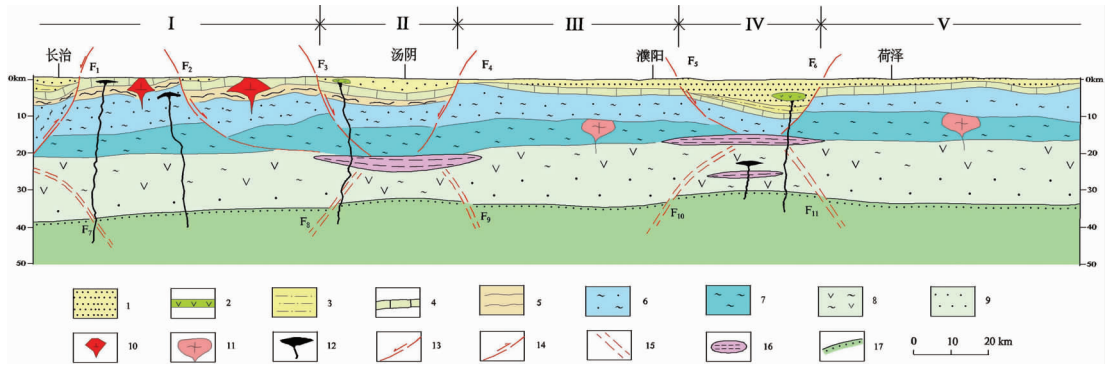


图 11 长治—菏泽断面地壳结构图(据地震测深剖面<sup>[31]</sup>的构造解析)

- 1—新生界沉积岩系;2—新生界玄武岩系;3—中生界沉积岩系;4—古生界沉积岩系;5—元古宙中浅变质岩系;
- 6—中新太古界中深变质岩系;7—古太古界深变质岩系;8—中下地壳闪长质变质岩类;9—下地壳碱性麻粒岩类;
- 10—印支—燕山期闪长岩类;11—太古宙 TTG 岩套;12—碱性侵入岩;13—伸展正断裂带;14—逆冲断裂带;
- 15—壳幔韧性剪切带;16—壳内低速层;17—莫霍界面;F<sub>1</sub>—太行山西缘断裂带;F<sub>2</sub>—西平罗断裂带;
- F<sub>3</sub>—太行山东麓断裂带;F<sub>4</sub>—汤阴断裂带;F<sub>5</sub>—长垣断裂带;F<sub>6</sub>—聊城断裂带;F<sub>7</sub>—长治壳幔韧性剪切带;
- F<sub>8</sub>—三河壳幔韧性剪切带;F<sub>9</sub>—东汪壳幔韧性剪切带;F<sub>10</sub>—濮阳壳幔韧性剪切带;F<sub>11</sub>—鲁西壳幔韧性剪切带;
- I—太行山构造带;II—汤阴拗陷;III—内黄隆起;IV—东明拗陷;V—菏泽隆起

Fig.11 Crustal structure of the Changzhi-Heze transect (structural analysis of the seismic sounding section<sup>[31]</sup>)

- 1—Cenozoic sedimentary series;2—Cenozoic basalt series;3—Mesozoic sedimentary series;4—Paleozoic sedimentary series;
- 5—Proterozoic medium- and low-grade metamorphic series;6—Neo- and Mesoproterozoic medium- and high-grade metamorphic series;
- 7—Paleoproterozoic high-grade metamorphic series;8—Dioritic metamorphic series in the middle and lower crust;
- 9—Basic granulite in the lower crust;10—Indosinian-Yanshanian diorites;11—Archean TTG suite;12—Basic intrusive rocks;
- 13—Extensional normal fault zone;14—Thrust zone;15—Crust-mantle ductile shear zone;16—Intracrustal low-velocity layer;
- 17—Moho;F<sub>1</sub>—Western Taihangshan marginal fault zone;F<sub>2</sub>—Xipingluo fault zone;F<sub>3</sub>—Eastern Taihangshan piedmont fault zone;
- F<sub>4</sub>—Tangyin fault zone;F<sub>5</sub>—Changyuan fault zone;F<sub>6</sub>—Liaocheng fault zone;F<sub>7</sub>—Changzhi crust-mantle ductile shear zone;
- F<sub>8</sub>—Sanhe crust-mantle ductile shear zone;F<sub>9</sub>—Dongwang crust-mantle ductile shear zone;F<sub>10</sub>—Puyang crust-mantle ductile shear zone;
- F<sub>11</sub>—Western Shandong crust-mantle ductile shear zone; I—Taihangshan structural zone;
- II—Tangyin depression; III—Neihuang uplift; IV—Dongming depression; V—Heze uplift

### 4.1 盆岭结构——块体伸展动力学型式

华北地块、吉黑地块和下扬子地块属此类减薄型地壳，以华北地块地壳结构最典型，华北地块基底存在 3 804 Ma<sup>[64]</sup>早太古代岩石矿物信息，发育古陆核。华北地块和下扬子地块系克拉通型地壳经中生代以来地壳呈块体伸展变形逐渐减薄形成的，并叠置了晚中生代以来的大型裂谷盆地。吉黑地块系古生代造山带增厚型地壳经晚中生代以来地壳呈块体

展变形逐渐减薄形成的。地震测深显示，该类型地壳  $V_p$  速度平均值最低，华北地块地壳  $V_p$  速度平均值仅有 6.20 km/s，吉黑地块地壳  $V_p$  速度平均值较高，为 6.36 km/s(表 1)。该类型地壳厚度亦大幅度减薄，下扬子地块地壳厚度平均值仅有 31.99 km，吉黑地块地壳厚度平均值为 36.86 km，华北地块地壳厚度平均值为 34.58 km(图 4，表 1)，其中黄骅拗陷地壳厚度减薄幅度最大，仅有 29.91 km。华北裂谷带内拗陷区与

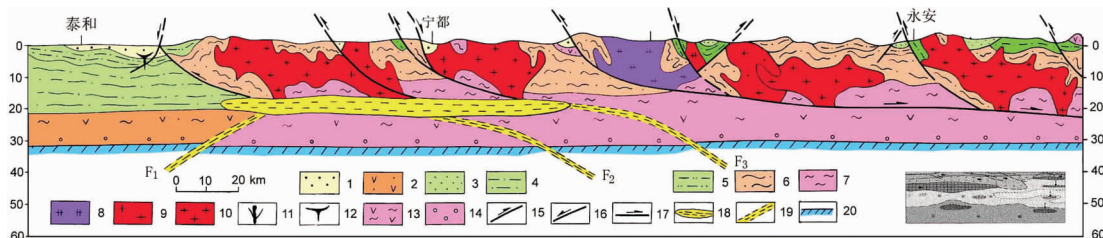


图 12 江西泰和—福建永安地壳结构略图(据地震测深剖面<sup>[9]</sup>的构造解析)

1—上白垩统沉积岩系;2—上侏罗统—下白垩统火山—沉积岩系;3—下侏罗统沉积岩系;4—泥盆系—三叠系沉积岩系,5—下古生界沉积岩系;6—中新元古界浅变质岩系;7—太古宇至古元古界中深变质岩系;8—加里东期花岗岩类;9—华力西期花岗岩类;10—燕山期花岗岩类;11—晚白垩世基性喷出岩;12—中下地壳闪长质变质岩类;13—下地壳基性麻粒岩类;14—逆冲断裂带;15—伸展正断裂带;16—滑脱拆离带;17—壳内低速层;18—壳幔韧性剪切带;19—莫霍界面;F<sub>1</sub>—兴国壳幔韧性剪切带;F<sub>2</sub>—宁都壳幔韧性剪切带;F<sub>3</sub>—宁化壳幔韧性剪切带

Fig.12 Crustal structure of the Taihe (Jiangxi)-Yong'an (Fujian) area (structural analysis of the seismic sounding section<sup>[5]</sup>)

1—Upper Cretaceous sedimentary series;2—Upper Jurassic-Lower Cretaceous volcanic-Sedimentary series;3—Lower Jurassic sedimentary series;4—Devonian-Triassic sedimentary series;5—Paleoproterozoic sedimentary series;6—Meso- and Neoproterozoic low-grade metamorphic series;7—Archean-Paleoproterozoic medium- and high-grade metamorphic series;8—Caledonian granitoids;9—Variscan granitoids;10—Yanshanian granitoids;11—Late Cretaceous basic extrusive rocks;12—Dioritic metamorphic series in the middle and lower crust;13—Basic granulites in the lower crust;14—Thrust zone;15—Extensional normal fault zone;16—Detachment zone;17—Intracrustal low-velocity layer;18—Crust-mantle ductile shear zone;19—Moho;F<sub>1</sub>—Xingguo crust-mantle ductile shear zone;F<sub>2</sub>—Ningdu crust-mantle ductile shear zone;F<sub>3</sub>—Ninghua crust-mantle ductile shear zone

隆起区地壳结构有较大差异,前者地壳普遍发育壳内低速层,地壳厚度最小,地壳 V<sub>p</sub> 速度相对较低,莫霍界面多显示为多薄层结构壳幔过渡带<sup>[59]</sup>,新生代玄武岩发育,构造变形较强;后者壳内低速层不发育,莫霍界面多表现为单一的一级间断面<sup>[59]</sup>,地壳 V<sub>p</sub> 速度和厚度相对较大(图 10),新生代玄武岩不发育,构造变形相对较弱<sup>[11]</sup>。整个华北地块内构造带与裂谷带、裂谷带内隆起和坳陷相间排列,在地壳表层为盆岭构造,在岩石圈地壳断面形似香肠状构造(图 5-E 和图 11),地壳厚度由西向东呈香肠状减薄。这些特征表明,地壳的减薄可能受地壳断块式伸展变形与上地幔物质上涌的联合作用引起的<sup>[76]</sup>。在这一动力学背景下,上地壳发育的正断裂带在浅部向坳陷带内陡倾,向深处逐渐变缓呈犁式断裂,多消失在壳内低速层<sup>[11]</sup>或滑脱带中<sup>[77,78]</sup>,在壳幔过渡带发育与地表断裂带呈反向陡倾的部分隐伏壳幔韧性剪切带可能逐渐向中地壳内发展<sup>[79]</sup>,成为地震的发震断裂带<sup>[77-78]</sup>,或岩浆以及无机成因天然气等深部流体上升的通道,另一部分壳幔韧性剪切带向地壳上部发展,多消失在壳内低速层中(图 11)。由此表明,研究壳幔韧性剪切带对深部资源和能源的预测与寻找,构造地震的发震构造等研究方面有重要意义。

#### 4.2 铲形结构——整体伸展动力学型式

华南地块包括中扬子地块、华夏地块和赣湘桂构造带属减薄型地壳,前两者系克拉通型地块经中生代以来地壳伸展变形逐渐减薄形成的,后者系加里东造山带增厚型地壳经晚古生代平稳发展,发育台型碳酸盐岩沉积,到中生代以来地壳伸展变形逐渐减薄形成的。地震测深显示<sup>[5,14,36]</sup>,地壳 V<sub>p</sub> 速度值偏低,一般在 6.13~6.44 km/s,由西向东地壳 V<sub>p</sub> 速度平均值有降低的趋势,例如,中扬子地块地壳 V<sub>p</sub> 速度平均值为

6.29 km/s,向东到华夏地块地壳 V<sub>p</sub> 速度平均值减小到 6.24 km/s。整个华南地区 V<sub>p</sub> 速度平均值为 6.26 km/s (表 1、图 4)。华南地区由西向东地壳厚度亦逐渐减薄,如中扬子地块地壳平均厚度为 35.45 km,赣湘桂构造带地壳平均厚度为 33.78 km,华夏地块地壳厚度减薄幅度较大,仅有 30.89 km。华南部分地区莫霍界面显示为叠瓦式壳幔过渡带<sup>[80]</sup>。华南地区上下地壳之间普遍发育壳内低速层,壳内低速层以上的断裂带前期表现为逆冲,后期表现为伸展,在地壳断面上构成铲形结构<sup>[61,80]</sup>(图 5-F 和图 12),显示华南中生代晚期以来具有整体伸展变形,向东地壳均匀减薄的特征<sup>[5-6,61,80-81]</sup>。

### 5 结论

(1)根据地震测深剖面的系统分析与研究,建立起中国大陆岩石圈地壳的三维速度结构模型,以地壳厚度演化为基本依据,结合地质构造研究,将中国大陆岩石圈地壳划分为克拉通型地壳结构、增厚型地壳结构和减薄型地壳结构 3 个一级地壳构造单元。并建立起中国大陆 1、2、3 级构造单元岩石圈地壳厚度与速度结构模型。

(2)中国大陆内地壳具有 6 种地壳结构-动力学型式:褶皱式结构——挤压动力学型式(塔里木式)、地垒式结构——拉伸动力学型式(鄂尔多斯式)、扇形结构——碰撞楔入动力学型式(青藏高原式)、楔状结构——俯冲楔入动力学型式(天山式)、铲形结构——整体伸展动力学型式(华南式)和盆岭结构——块体伸展动力学型式(华北式)。对比研究表明,中国大陆是全球大陆岩石圈地壳结构-动力学型式发育最典型、类型最多的地区之一。

(3)地震测深的构造解析结果表明,大陆地壳的增厚与

减薄主要体现在上地壳和下地壳的增厚与减薄,由此显示,地壳的构造变形可能存在由地壳表层向深处或由深部向上部的双向扩展变形,这些认识为研究岩石圈地壳的构造变形提供了新的研究思路。

### 参考文献(References):

- [1] 袁学诚,左愚,蔡学林,等. 华南板块岩石圈构造与地球物理[C]//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.  
Yuan Xuecheng, Zuo Yu, Cai Xueling, et al. The structure of the lithosphere and the geophysics in the South China Plate [C]//Geophysics in China in the Eighties. Beijing: Learning Publication Press, 1989:243-249(in China with English abstract).
- [2] 袁学诚, Egorov A S, 等. 北冰洋-欧亚大陆-太平洋地学断面[M]. 北京:科学出版社, 2000:1-32.  
Yuan Xuecheng, Egorov A S, et al. The Geoscience Transect in the Arctic Ocean-Eurasia-Pacific Ocean [M]. Beijing: Science Press, 2000:1-32(in English).
- [3] 袁学诚,刘福田,徐佩芬,等. 大别山造山带的深部结构[C]//大别山超高压变质作用与碰撞造山动力学. 北京:科学出版社, 2005:159-185.  
Yuan Xuecheng, Lin Futian, Xu Peifen, et al. Deep structure of the Dabieshan Orogenic Belt [C]//Ultrahigh Pressure Metamorphism and Collisional Orogenic Dynamic of the Dabishan. Beijing: Science Press, 2005:159-185(in Chinese with English abstract).
- [4] 曹家敏,朱介寿,吴德超. 东秦岭地区的地壳速度结构[J]. 成都理工大学学报, 1994, 21(1):11-17.  
Cao Jiamin, Zhu Jieshou, Wu Dechao. Velocity structure of the crust in Eastern Qinling Mountain [J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 1994, 21(1):11-17(in Chinese with English abstract).
- [5] 曹家敏,董颐珍. 爆炸地震研究华南地区邵阳-泉州地壳结构[C]//阿尔泰-台湾地学断面论文集. 武汉:中国地质大学出版社,1997:87-92.  
Cao Jiamin, Dong Yizhen. Study of Shaoyang-Quanzhou crustal structure in South China by means of seismic deep sounding[C]//Collected Papers Geoscience Transect in Altay-Taiwan. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997:87-92 (in Chinese with English abstract).
- [6] 曹家敏,王有学. 阿尔泰-台湾剖面茂汶-邵阳段地壳结构[C]//阿尔泰-台湾地学断面论文集. 武汉:中国地质大学出版社,1997:82-86.  
Cao Jiamin, Wang Youxue. Crustal velocity structure of Maowen-Shaoyang Part of Altay-Taiwan Profile [C]//Collected Papers of Geoscience Transect in Altay-Taiwan. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997:82-86(in Chinese with English abstract).
- [7] 吴功建,肖序常,李廷栋. 青藏高原亚东-格尔木地学断面 [J]. 地质学报, 1989, 63(4):285-296.  
Wu Gongjian, Xiao Xuchang, Li Tingdong. The geoscience transect in Yadong-Golmud of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 1989,63(4):285-296(in Chinese with English abstract).
- [8] 崔作舟,李秋生,吴朝东,等. 格尔木-额济纳旗地学断面的地壳结构与深部构造[J]. 地球物理学报, 1995, 38(增刊 II):15-28.  
Cui Zuozhou, Li Qiusheng, Wu Chaodong, et al. The crustal and deep structures in Golmud-Ejinqi GGT[J]. Acta Geophysica Sinica, 1995, 38(supp. II):15-28(in Chinese with English abstract).
- [9] 陈沪生,周雪清,李道琪,等. 中国东部灵璧-奉贤(HQ-13)地学断面[M]. 北京:地质出版社, 1994:1-59.  
Chen Husheng, Zhou Xueqing, Li Daoqi, et al. The Geoscience Transect in Lingbi-Fengxian (HQ-13) of the China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994:1-59(in Chinese).
- [10] 张贻侠,孙云生,张兴洲,等. 中国满州里-绥芬河地学断面[M]. 北京:地质出版社, 1998:1-35.  
Zhang Yixie, Sun Yunsheng, Zhang Xingzhou, et al. Manzhouli-Suifenhe Geoscience Transect, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998:1-35(in Chinese).
- [11] 马杏垣,刘昌铨,刘国栋. 江苏响水至内蒙古满都拉地学断面[M]. 北京:地质出版社, 1991:1-62.  
Ma Xingyuan, Liu Changquan, Liu Guodong. The Geoscience Transect in Xiangshui of Jiangsu to Mandoula of Meimengqu [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991:1-62(in Chinese).
- [12] 孙武城,马宝林,宋松岩,等. 湖北随州至内蒙古喀喇沁旗地学断面[M]. 北京:地震出版社, 1992:1-57.  
Sun Wucheng, Ma Baolin, Song Songyan, et al. The Geoscience Transect in Suizhou of Hubei to Kalaqinqi of Neimenggu [M]. Beijing: Seismological Press, 1992:1-57(in Chinese).
- [13] 卢造勋,夏杯宽. 内蒙古东乌珠穆沁旗至辽宁东沟地学断面[M]. 北京:地震出版社, 1992:1-59.  
Lu Zaoxun, Xia Huaikuan. The Geoscience Transect in Dong Wuzhumuqinqi of Neimenggu to Donggou of Liaoning [M]. Beijing: Seismological Press, 1992:1-59(in Chinese).
- [14] 林中洋,蔡文伯,陈学波,等. 青海门源至福建宁德地学断面[M]. 北京:地震出版社, 1993:1-44.  
Lin Zhangyang, Cai Wenbai, Chen Xuebo, et al. The Geoscience Transect in Menyuan of Qinghai to Ningde of Fujian [M]. Beijing: Seismological Press, 1993:1-44(in Chinese).
- [15] 阚荣举,韩源. 云南遮放至马龙地学断面[M]. 北京:地震出版社, 1992:1-63.  
Han Rongju, Han Yan. The Geoscience Transect in Zhefang to Malong of Yunnan [M]. Beijing: Seismological Press, 1992:1-63(in Chinese).
- [16] 孙武城,徐杰,杨主恩,等. 上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗地学断面[M]. 北京:地震出版社, 1992:1-66.  
Sun Wucheng, Xu Jie, Yang Zhuen, et al. The Geoscience Transect in Fengxian of Shanghai to Alashanzaoqi of Neimenggu [M]. Beijing: Seismological Press, 1992:1-66(in Chinese).
- [17] 李秋生,卢德源,高锐,等. 新疆地学断面(泉水沟-独山子)深地震测深成果综合研究[J]. 地球学报, 2001, 22(6):534-540.  
Li Qiusheng, Lu Deyuan, Gao Rui, et al. An integrated study of deep seismic sounding profiling along Xinjiang global geosciences transect(Quanshuigou-Dushanzi) [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001,

- 22(6):534-540(in Chinese with English abstract).
- [18] 卢德源, 李秋生, 高锐. 横跨天山的人工爆炸地震剖面 [J]. 科学通报, 2000, 45(9):982-988.  
Lu Deyuan, Li Qiusheng, Gao Rui. The man-made explosion seismic profile across Tianshan [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(9):982-988(in Chinese).
- [19] 张先康, 赵金仁, 张成科, 等. 帕米尔东北侧地壳结构研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(5):665-671.  
Zhang Xiankang, Zhao Jinren, Zhang Chengke, et al. Crustal structure at the northeast side of the Pamirs [J]. Chinese Journal of Geophysics. 2002, 45(5):665-671(in Chinese with English abstract).
- [20] 李松林, 张先康, 张成科, 等. 玛沁-兰州-靖边地震测深剖面地壳速度结构的初步研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(2):210-217.  
Li Songlin, Zhang Xiankang, Zhang Chengke, et al. A preliminary study on the crustal velocity structure of MaQin-Lanzhou-Jingbian by means of deep seismic profile [J]. Chinese Journal of Geophysics. 2002, 45(2):210-217(in Chinese with English abstract).
- [21] 高锐, 黄东定, 卢德源, 等. 横过西昆仑造山带与塔里木盆地结合带的深地震反射剖面[J]. 科学通报, 2000, 45(17):1874-1879.  
Gao Rui, Huang Dongding, Lu Deyuan, et al. The deep seismic reflection Profile in the junction belt across west Kunlun orogenic zone and Tarim basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2000,45(17):1874-1879(in Chinese).
- [22] 赵文津, Nelson K D, 车敬凯, 等. 深反射地震揭示喜马拉雅地区地壳上地幔的复杂结构[J]. 地球物理学报, 1996, 39(5):615-628.  
Zhao Wenjin, Nelson K D, Che Jingkai, et al. Deep seismic refecction in Himalaya region reveals the complexity of the crust and upper mantle structure [J]. Acta Geophysica Sinica, 1996, 39 (5):615-628(in Chinese with English abstract).
- [23] 王椿镛, 吴建平, 楼海, 等. 川西藏东地区的地壳 P 波速度结构 [J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(增刊):181-189.  
Wang Chunyong, Wu Jianping, Louhai, et al. The crustal P wave velocity structure of western Sichuan and Eastern Tibet [J]. Science in China(Series D), 2003, 33(supp.):181-189(in Chinese).
- [24] 熊绍柏, 刘宏兵. 青藏高原西部的地壳结构 [J]. 科学通报, 1997, 42(12):1309-1312.  
Xiong Shao, Liu Hongbing. The crustal structure of the weatern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(12):1309-1312(in Chinese).
- [25] 滕吉文, 张中杰, 王光杰, 等. 喜马拉雅碰撞造山带的深层动力过程与陆-陆碰撞新模型[J]. 地球物理学报, 1999, 42(4):481-493.  
Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Wang Guangjie, et al. The deep internal dynamical processes and new model of continental - continental collision in Himalayan collision orogenic zone [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42 (4):481-493 (in Chinese with English abstract).
- [26] 林中洋, 胡鸿翔, 张文彬, 等. 滇西地区地壳上地幔速度结构特征的研究[J]. 地震学报, 1993, 15(4):427-440.  
Lin Zhongyang, Hu Hongxiang, Zhang Wenbin, et al. The preliminary interpretation of deep Seismic sounding in western Yunnan [J]. Acta Seismologica Sinica, 1993, 15 (4):427-440(in Chinese with English abstract).
- [27] 蔡学林, 石绍清, 吴德超, 等. 武当山推覆构造的形成与演化[M]. 成都:成都科技大学出版社, 1995:1-165.  
Cai Xuelin, Shi Shaoqing, Wu Dechao, et al. Formation and Tectonic Evolution of the Wudangshan Nappe Structure [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1995:1-207(in Chinese with English abstract).
- [28] 闵祥仪, 周民都, 郭建康, 等. 灵台-阿木去乎剖面地壳速度结构[J]. 西北地震学报, 1991, 13(增刊):29-36.  
Min Xiangyi, Zhou Mindu, Guo Jiankang, et al. The crustal velocity structure in Lingtai-Amuquhu Profice [J]. North-western Seismological Journal, 1991, 13 (Supp):29-36 (in Chinese with English abstract).
- [29] 邵学钟, 徐树宝, 周东延, 等. 塔里木盆地地壳结构特征[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(2):1-5.  
Shao Xuezhong, Xu Shubao, Zhou Dongyuan, et al. The crustal structure of the Tarim basin [J]. Petroleum Exploration and Development. 1997, 24(2):1-5(in Chinese with English abstract).
- [30] 赵金仁, 张先康, 张成科, 等. 山西五台地区地壳深部结构特征研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1):123-129.  
Zhao Jinren, Zhang Xiankang, Zhang Chengke, et al. Features of deep crustal structure beneath the Wutai Mountain area of Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(1):123-129 (in Chinese with English abstract).
- [31] 嘉世旭, 刘昌铨. 华北裂谷盆地南部菏泽-长治地震测深剖面结果解释[J]. 华北地震科学, 1991, 9(2):11-20.  
Jia Shixu, Liu Changquan. Intepretation of Heze-Changzhi DSS profile in south of the basin in North China [J]. North China Earthquake Sciences, 1991, 9 (2):11-20 (in Chinese with English abstract).
- [32] 陈学波, 等. 长江三峡工程坝区及外围深部构造特征研究[M]. 北京:地震出版社, 1994:1-145.  
Chen Xuebo, et al. The Research on Characteristics of the Deep Tectonics in Three Gorges and Nearby Area [M]. Beijing: Seismological Press, 1994:1-145(in Chinese with English abstract).
- [33] 刘福田, 徐佩芬, 刘劲松, 等. 大陆深俯冲带的地壳速度结构-东大别造山带深地震宽角反射折射研究 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(3):366-372.  
Liu Futian, Xu Peifen, Liu Jinsong, et al. The crustal velocity structure of the continental deep subduction belt :Study on the eastern Dabie orogen by seismic wide-angce reflection/refraction [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46 (3):366-372 (in Chinese with English abstract).
- [34] 王椿镛, 张先康, 陈步云, 等. 大别造山带的地壳结构研究[J]. 中国科学(D 辑), 1997, 27(3):221-226.  
Wang Chunyong, Zhang Xiankang, Chen Buyun, et al. The study of crustal structure of Dabie Orogen[J]. Science in China(Series D), 1997, 27(3):221-226(in Chinese).
- [35] 滕吉文. 康滇构造带岩石圈物理与动力学[M]. 北京:地震出版

- 社,1994:1-193.
- Teng Jiwen. The Physical and dynamic of the Lithospheric of Structure Zone in kang-Yunnan [M]. Beijing:Seismological Press, 1994:1-193(in Chinese).
- [36] 熊绍柏, 赖明惠, 刘宏宾, 等. 屯溪-温州地带的岩石圈结构与速度分布[C]//东南岩石圈结构与地质演化. 北京:冶金工业出版社, 1993:250-256.
- Xiong Shaobai, Lai Minghui, Liu Hongbin, et al. Lithospheric structure and velocity distribution at Tunxi-Wenzhou Zone[C]// Continental Lithospheric Structure and Geological Evolution in South-East China. Beijing:Metallurgy Industry Press, 1993:250-256(in Chinese).
- [37] 张成科, 赵金仁, 任清芳, 等. 豫北及其外围地区地壳上地幔结构研究[J]. 地震地质, 1994, 16(3):243-253.
- Zhang Chengke, Zhao Jinren, Ren Qingfang, et al. Study on crust and upper mantle structure in North Hennan and its surroundings [J]. Seismology and Geology, 1994, 16 (3):243-253 (in Chinese with English abstract).
- [38] 朱介寿. 我国大陆地壳及上地幔分块结构特征[J]. 成都地质学院学报,1986,13(1):75-94.
- Zhu Jieshou. The block structure characteristic of the crust and upper mantle in China's continent [J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1986,13(1):75-94(in Chinese with English abstract).
- [39] Ilchenko T. Dniepr-Donets Rift:deep structure and evolution from DSS profiling[J]. Tectonophysics, 1996, 268:83-98.
- [40] Juhlin C, Knapp J H, Kashubin S, et al. Crustal evolution of the Middle Urals based on seismic reflection and refraction data [J]. Tectonophysics,1996, 264:21-34.
- [41] Kukkonen I T, Joeleht A. Geothermal modeling of the lithosphere in the central Baltic Shield and its southern slope [J]. Tectonophysics, 1996, 255:25-45.
- [42] Morozova E A, Morozov I B, Smithson S B. Heterogeneity of the uppermost mantle beneath Russian Eurasia from the ultra-long-range profile [J]. J. Geophys. Res., 1999, 104(B9):20329-20348.
- [43] Neves F A, Singh S C, Priestley K F. Velocity structure of upper-mantle transition zones beneath central Eurasia from seismic inversion using genetic algorithms [J]. Geophys J. Int, 1996, 125: 869-878.
- [44] Pavlenkova N I, Pavlenkova G A, Solodilov L N. High velocities in the uppermost mantle of the Siberian craton [J]. Tectonophysics, 1996, 262:51-65.
- [45] Poupinet G, Thouvenot F, Zolotov E E, et al. Teleseismic tomography across the middle Urals:lithospheric trace of an ancient continental collision[J]. Tectonophysics, 1997, 276:19-33.
- [46] 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集 [M]. 北京: 地图出版社, 1989:1-68.
- Ma Xingyuan. Atlas of the Lithosphere Dynamics of China [M]. Beijing: Cartographic Press, 1989:1-68 (in Chinese with English abstract).
- [47] 马杏垣. 解析构造学[M]. 北京:地质出版社, 2004:10-421.
- Ma Xingyuan. Analytical Tectonics [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2004:10-421(in Chinese).
- [48] 付昭仁, 蔡学林. 变质岩区构造地质学 [M]. 北京: 地质出版社, 1996:1-239.
- Fu Zhaoren, Cai Xuelin. Structural Geology of Metamorphic Terrain [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1996:1-239(in Chinese).
- [49] 刘国栋. 大陆地壳及动力学[C]//现今地球动力学问题讨论会文集. 北京:地震出版社, 1994:131-153.
- Liu Gaodong. Continental crust and geodynamic [C]//Symposium on Modern Geodynamic. Beijing:Seismological Press, 1994:137-142(in Chinese).
- [50] 滕吉文, 张中杰, 白武明, 等. 岩石圈物理学[M]. 北京:科学出版社, 2004:76-170.
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Bai Wuming, et al. Geophysics of Lithosphere[M]. Beijing: Science Press, 2004:76-170(in Chinese).
- [51] Holbrook W S, Mooney W D, Christensen N I. The seismic velocity structure of the deep crust, in Continental lower crust[J]. Developments in Geotectonics, 1992, 23:1-14.
- [52] Christensen N1, Mooney W D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust:A global view [J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(BT):9761-9788.
- [53] Mooney W D, Laske G, Masters T G. Crust 5.1 -A global crustal model at 5°×5°[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B1):727-747.
- [54] 朱介寿, 严忠琼, 姚宇峰. 莫霍界面深度图 [C]//袁学成主编. 中国地球物理图集. 北京:地质出版社, 1996:81-84, 176-177.
- Zhu Jieshou, Yan Zhongqiong, Xu Sicong. Moho depth (1:12000000) [C]//Yuan Xuecheng (ed). Atlas of Geophysics in China. Beijing: Geological Publishing House, 1996:81-84, 183-185(in English).
- [55] 陈学波, 张景发, 唐荣余, 等. 中国及外围地区莫霍面深度分布图(1:15000000)[M]. 北京:地震出版社, 2001:1-19.
- Chen Xuebo, Zhang Jingfa, Tang Rongyu, et al. The Moho Depth Isogram Map of China and Outlying Zone(1:15000000)[M]. Beijing: Seismological Prees, 2001:1-19(in Chinese).
- [56] 曾融生, 孙为国, 毛桐恩, 等. 中国大陆莫霍界面深度图[J]. 地震学报, 1995, 17(3):322-327.
- Zeng Rongsheng, Sun weigao, Mao Tongen, et al. The depth of Moho in the mainland of China[J]. Acta Seismologica Sinica, 1995, 17(3):322-327(in Chinese).
- [57] 滕吉文. 地球深部壳-幔边界的层束精细结构与物理属性研究 [J]. 吉林大学(地球科学版), 2006, 36(1):1-23.
- Ten Gjinen. Research on Layer-bundle fine structure and physical attributes of crust-mantle boundary in deep earth[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(1):1-23(in Chinese with English abstract).
- [58] 杨宝俊, 刘财, 杨平华, 等. 用近垂直地震反射方法研究莫霍面的特征与成因[J]. 地球物理学报, 1999, 42(5):617-628.
- Yang Baojin, Liu Cai, Yangpinghua, et al. The study of Moho

- Characteristics and formation by nearly vertical seismic reflection method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 45(5):617-628(in Chinese with English abstract).
- [59] 赵俊猛, 张先康, 赵国泽, 等. 不同构造环境下的壳-幔过渡带[J]. 地学前缘, 1999, 6(3):165-172.  
Zhao Junmeng, Zhang Xiankang, Zhao Guoze, et al. Structure of crust-mantle transitional zone in different tectonic environments[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6 (3):165-172 (in Chinese with English abstract).
- [60] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 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):234-235.  
Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Structure and dynamics of lithosphere and asthenosphere in the gigantic East Asian-West Pacific rift system [J]. Geology in China, 2002, 29(3):234-245(in Chinese with English abstract).
- [61] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 四川黑水-台湾花莲断面岩石圈与软流圈结构[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(5):441-451.  
Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Structures of lithosphere and asthenosphere in Heishi of Sichuan-Hualian of Taiwan profile [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31(5):441-451(in Chinese with English abstract).
- [62] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 东亚西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):646-664.  
Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Cai Xuelin, et al. High resolution surface wave tomography in East Asia and west Pacific marginal seas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45 (5):646-664 (in Chinese with English abstract).
- [63] Downes H. Shear zone in the upper mantle-relation between geochemical enrichment and deformation in mantle peridotites [J]. Geology, 1990, 18:374-377.
- [64] 王小凤, 李中坚, 陈柏林, 等. 郯庐断裂带 [M]. 北京:地质出版社, 2000:254-268.  
Wang Xiaofeng, Li Zhongjian, Chen Bailin, et al. On Tan-Lu Fault Zone [M]. Beijing :Geological Publishing House, 2000:254-268(in Chinese with English abstract).
- [65] 张小鸥. 伊通地堑上地幔剪切带[J]. 地震地质, 1995, 17(2):167-176.  
Zhang Xiaou. The upper mantle shear zone of Yitong graben[J]. Seismology and Geology, 1995, 17 (2):167-176 (in Chinese with English abstract).
- [66] 程裕淇. 中国区地质概论[M]. 北京:地质出版社, 1994:28-473.  
Cheng Yuqi. Au Introduction to the Regional Geology of China [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1994:28 -473 (in Chinese).
- [67] 蔡学林, 刘援朝, 魏显贵, 等. 中国西部中生代沉积盆地变形构造形成与演化模式[J]. 成都理工学院学报, 1998, 25(3):355-363.  
Cai Xuelin, Liu Yuanchao, Wei Xiangui, et al. The formation and evolution model of deformed structures in Meso-Cenozoic sedimentary basins of the west of China [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1998, 25(3):355-363(in Chinese with English abstract).
- [68] 蔡学林, 彭大钧, 刘援朝, 等. 塔里木盆地变形构造格局及其动力学模式-兼论楔入造山推覆成盆作用 [J]. 成都理工学院学报, 1997, 24(2):29-39.  
Cai Xuelin, Peng Dajun, Liu Yuanchao, et al. Tectonic framework and dynamic model of Tarim basin:Implication for wedging orogenesis[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1997, 24(2):29-39(in Chinese with English abstract).
- [69] 王成善, 伊海生, 李勇, 等. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M]. 北京:地质出版社, 2001:1-17.  
Wang Chenshan, Yi Haisheng, Li Yong, et al. The Geological Evolution and Prospective Oil and Gas Assessment of the Qiang Basin in Northern Tibet Plateau[M]. Beijing:Geological Publishing House, 2001:1-17(in Chinese).
- [70] 罗照华, 张文会, 邓晋福, 等. 西昆仑地区新生代火山岩中的深源包体[J]. 地学前缘, 2000, 7(1):295-298.  
Luo Zhaohua, Zhang Wenhui, Deng Jinfu, et al. Characteristic and geological significance of the deep-seated xenoliths in Cenozoic basalt in Kangxiwa, western Kunlun Mountains China [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(1):295-298(in Chinese with English abstract).
- [71] 蔡学林, 曹家敏, 刘援朝, 等. 青藏高原多向碰撞-楔入隆升地球动力学模式[J]. 地学前缘, 1999, 6(3):181-189.  
Cai Xuelin, Cao Jiamin, Liu Yuanchao, et al. Geodynamic models of multidirectional collision-wedging uplift of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(3):181-189(in Chinese with English abstract).
- [72] 刘训. 从新疆地学断面的成果讨论西北盆山区的地壳构造演化[J]. 地球学报, 2005, 26(2):103-112.  
Liu Xun. A study of the crustal tectonic evolution in basin-range-geotranssect [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2005, 26 (2):105-112(in Chinese with English abstract).
- [73] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 中国东南大陆边缘带岩石圈三维结构-动力学型式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(3):25-34.  
Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Three-dimensional structural and dynamic types of the continental margin lithosphere in Southeast China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005, 25(3):25-34(in Chinese with English abstract).
- [74] Teixell A. Crustal structure and orogenic material budget in the west central Pyrenees[J]. Tectonics, 1998, 17(3):395-406.
- [75] Schmid S M, Pfiffner OA, Froitzheim, et al. Geophysical-geological transect and tectonic evolution of the Swiss-Italian Alps [J]. Tectonics, 1996, 15(5):1036-1064.
- [76] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 中国及邻近陆海地区软流圈三维结构及其与岩石圈的相互作用[J]. 中国地质, 2006, 33(4):804-815.  
Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. 3D structure of the asthenosphere beneath China and adjacent land and sea areas and its interaction with the lithosphere[J]. Geology in China, 2006, 33(4):804-815(in Chinese with English abstract).
- [77] 王椿镛, 王贵美, 林中洋, 等. 用深地震反射方法研究邢台地震

- 区地壳细结构[J]. 地球物理学报, 1993, 36(4):445-452.
- Wang Chunyong, Wang Guimei, Lin Zhongyang, et al. A study on fine crustal structure in Xingtai earthquake area based on deep seismic reflection Profiling [J]. Acta Geophysica Sinica, 1993, 36(4):445-452(in Chinese with English abstract).
- [78] 张先康, 赵金仁, 刘国华, 等. 三河-平谷 8.0 级大震区震源细结构的深地震反射探测研究[J]. 中国地震, 2002, 18(2):326-336.
- Zhang Xiankang, Zhao Jinren, Liu Guohua, et al. Study on fine crustal structure of the Sanhe-Pinggu earthquake (M8.0) region by deep seismic reflection profiling [J]. Earthquake Research in China, 2002, 18(2):326-336(in Chinese with English abstract).
- [79] 陈沪生, 张家鸿, 等. 下扬子及邻区岩石圈结构构造特征与油气资源评价. 北京:地质出版社, 1999:108-142.
- Chen Husheng, Zhang Jiahong, et al. The Lithospheric Textural and Structural Features as well as Oil and Gas Evaluation in the Lower Yangtze Area and Its Adjacent Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999:108-142(in Chinese with English abstract).
- [80] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 华南地区岩石圈三维结构类型与演化动力学. 大地构造与成矿学, 2003, 27(4):299-310.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Three-dimensional tectonic types and evolutionary dynamis of lithosphere of South China Region[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27(4):299-310(in Chinese with English abstract).
- [81] 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, 2005:30-296.
- Zhu Jieshou, Cai Xuelin, Cao Jiamin, et al. The Three-Dimensional Structure of Lithosphere and Its Evolution in South China and East China Sea [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2005:30-296(in Chinese.with English abstract).

### 3D structure and dynamic types of the lithospheric crust in continental China and its adjacent regions

CAI Xue-lin, ZHU Jie-shou, CAO Jia-min, CHENG Xian-qiong

(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

**Abstract:** A crustal thickness and velocity structure model of continental China has been constructed based on a systematic structural analysis of the seismic sounding profile in continental China and its adjacent regions. According to this model, structural styles of crustal deformation, crustal geological structure and tectonic evolution and crustal kinematics and dynamics, the lithospheric crust beneath continental China is divided into six crust structure-dynamic types: (1) cratonic folded-thrust style structure-compressional dynamic type (Tarim type); (2) cratonic horst structure-extensional dynamic type (Ordos type); (3) thickened plateau fan structure-collisional wedging dynamic type (Tibetan Plateau type); (4) thickened orogenic wedge structure-subductional wedging dynamic type (Tianshan type); (5) thinned basin-range structure-block extensional dynamic type (North China type); and (6) thinned listric structure-wholesalely extensional dynamic type (South China type). This paper discusses the basic characteristics of cratonic crustal, thickened crust and thinned crust and their relations and geological significance.

**Key words:** crust; lithosphere; seismic sounding; tectonic analysis; 3D structure; dynamic type; continental China

**About the first author:** Cai Xue-lin, male, born in 1935, professor, mainly engages in the study of structural geology and deep geology; E-mail: caixuelin1935@sohu.com.