

东亚西太平洋岩石圈三维结构及其地幔动力学

蔡学林¹, 朱介寿², 曹家敏², 程先琼²

1. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059

2. 成都理工大学 信息工程学院, 四川 成都 610059

Cai Xuelin¹, Zhu Jieshou², Cao Jiamin², Cheng Xianqiong²

1. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. College of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Three-dimensional tectonics of lithosphere and mantle dynamics of East Asia-West Pacific, *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(3): 021-038

Abstract: A structural analysis of the tomography of natural seismic surface waves in East Asia and West Pacific region, showed that high-speed blocks of varying shape and size, have been discovered in the lower lithosphere. These are termed mantle blocks, based on their geological, geochemical, and geophysical signatures. These show that the tectonic patterns of the East Asia-West Pacific lithosphere and associated surface deformations are controlled by these high-speed blocks or mantle blocks. Systematic 3D studies of the high-speed blocks in the lithosphere, indicate that eight 3D-geometric tectonic styles (craton-root-shaped, plateau-root-shaped, orogen-wedge-shaped, clastic-massive, sausage-shaped, lotus-root-joint-shaped, dumbbell, and slaty) are described for the first time, together with four types of the lithospheres (cratonic, thickening, thinning, and oceanic). It is further suggested that the Qinghai-Tibet Plateau is characterized by a thickening lithosphere, with the continental root or the lithospheric root involved in the thickening process. According to seismic tomography, the largest rift system in the world is present in the region, which had been overprinted and deformed by the West Pacific trench-arc-basin system during the late Cenozoic. From the 3D geometric models, the ocean-continent-ocean evolutionary patterns of the lithosphere can be deduced. It is concluded that the most basic expressions of the mantle dynamics in East Asia since the Mesozoic can be found in large-scale extension (delamination) and thinning of the lithosphere, within the continental margin, in the upwelling and heating of the asthenosphere, and in the large-sized collision and thickening of the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: lithosphere; 3D structure; high-speed block; mantle block; seismic tomography; tectonic analysis; mantle dynamics; East Asian continent; West Pacific

摘要:从地球层块结构的研究思路出发,运用构造解析的理论和方法,对东亚及西太平洋地区人工地震测深和天然地震面波层析成像进行构造解析,发现岩石圈中下部存在形态各异、大小不等的高速块体,结合地质学、地球化学及其他地球物理学标志的综合研究将其称为幔块构造,高速块体或幔块构造是控制东亚西太平

收稿日期: 2007-04-13; 修回日期: 2007-04-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(49734150, 40234047); 国土资源部重点科技专项(200010101)

作者简介: 蔡学林(1935—), 男, 教授, 构造地质学专业, 长期从事构造地质、前寒武纪地质与深部地质教学与研究工作。

洋岩石圈构造格局和岩石圈表层构造变形最基本条件之一。在系统研究该区岩石圈高速块体或慢块构造三维几何结构基础上,建立起东亚西太平洋岩石圈八种三维几何结构型式:克拉通陆根状结构、高原陆根状结构、造山带楔状结构、碎块状结构、香肠状结构、哑铃状结构、藕节状结构和板状结构,以及岩石圈形成与构造演化四种构造类型:克拉通型岩石圈、增厚型岩石圈、减薄型岩石圈和大洋型岩石圈。文章在详细论述岩石圈各结构构造类基本特征的基础上,认为全球最大的青藏高原具有增厚型岩石圈特性,存在大陆根,并且大陆根正在增厚过程中;地震层析成像显示,研究区存在全球最大的东亚大陆巨型裂谷体系,具有减薄型岩石圈特性,新生代晚期东亚大陆巨型裂谷体系被西太平洋沟弧盆体系叠加与改造。根据岩石圈三维结构型式,探讨了岩石圈形成机制与演化模式,东亚大陆边缘岩石圈大规模伸展折沉减薄作用以及软流圈和地幔物质上涌加热作用与青藏高原岩石圈大规模俯冲碰撞楔入增厚作用是东亚大陆及边缘海晚中生代以来地幔动力学最基本的表现型式,从而形成全球最大的青藏高原和全球最大的东亚大陆巨型裂谷体系。

关键词: 岩石圈; 三维结构; 高速块体; 慢块构造; 地震层析成像; 构造解析; 地幔动力学; 东亚大陆; 西太平洋

中图分类号: P315; P541 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2321(2007)03-0021-18

岩石圈探测与岩石圈三维结构研究是当前地球科学研究前沿领域之一,东亚及西太平洋地区岩石圈探测与结构是其研究热点之一。20世纪80年代以来,不少学者^[1-23]从不同角度对中国及邻区岩石圈结构进行探讨。笔者从20世纪80年代起承担地质矿产部主持的东秦岭 QB-1 地学断面^[9,24-25]和阿尔泰—台湾地学断面地震测深与构造解析时,对岩石圈结构进行初步研究^[8,20,26-28]。随后笔者在承担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(200010101)研究时,对东亚西太平洋岩石圈三维结构进行系统研究,通过欧亚及西太平洋地区163条总长95 400 km地震测深剖面构造解析和数据分析,建立起该区不同构造单元岩石圈地壳速度结构模型,编制该区地壳厚度分布图;对欧亚及西太平洋(10°~170°E, 10°S~84°N)天然地震面波层析成像 v_s 速度结构分析与构造解析,建立起东亚西太平洋地区2°×2°岩石圈和软流圈三维结构模型,编制出东亚西太平洋岩石圈和软流圈速度分布与厚度分布图及其岩石圈和软流圈构造解析图。本文是上述一系列研究成果一部分,重点讨论东亚西太平洋岩石圈高速块体和慢块构造特征、岩石圈三维结构型式和构造类型、地幔动力学以及岩石圈形成与演化模式等。

1 岩石圈三维结构模型

1.1 大陆岩石圈地壳三维结构模型

运用地球层块结构、比较构造学与解析构造学的理论和方法^[3,9,29-30],对欧亚及西太平洋地区163条总长95 800 km地震测深剖面^[8,24-28,31-62]进行系统分析、数据采集和地质构造解析图编制(图1),获

得45 200多个数据,编出东亚及西太平洋地区地壳沉积层厚度分布图和地壳厚度分布图(图2)。在建立起大陆地壳三维速度结构模型基础上^①,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,将大陆地壳划分为三种基本构造演化类型:克拉通型地壳、增厚型地壳和减薄型地壳及其相应的岩石圈地壳厚度与速度结构模型(图3)。

1.2 地震岩石圈三维结构模型

从0~420 km深的天然地震面波层析成像 v_s 速度结构剖面上,可划分出岩石圈、软流圈和固结圈^[63]等三层圈结构(图4)。从地震学角度定义的岩石圈称地震岩石圈。在克拉通、高原和大洋地区通常将面波 v_s 速度值从4.70 km/s左右降低到4.45 km/s左右^[19-21,64]作为岩石圈底界面,在裂谷带岩石圈地区,因岩石圈 v_s 速度值整体较低,其岩石圈底界面 v_s 速度值多在4.35 km/s左右^[20,65]。笔者根据2°×2°天然地震面波层析成像 v_s 速度结构系统构造解析,建立起东亚西太平洋地区岩石圈三维结构模型^[10,19,21,65-66],编制出该区岩石圈与软流圈 v_s 速度与厚度分布图(图5),为分析岩石圈三维结构类型提供了重要依据之一。

2 岩石圈高速块体与岩石圈三维结构型式

2.1 岩石圈高速块体或慢块构造含义

天然地震面波层析成像构造解析发现,东亚西

① 蔡学林,朱介寿,曹家敏. 中国及邻区岩石圈地壳细结构与动力学型式. 东亚西太平洋边缘海岩石圈软流圈细结构及其深部过程(40234047),国家自然科学基金重点项目研究报告,2007: 264-353.

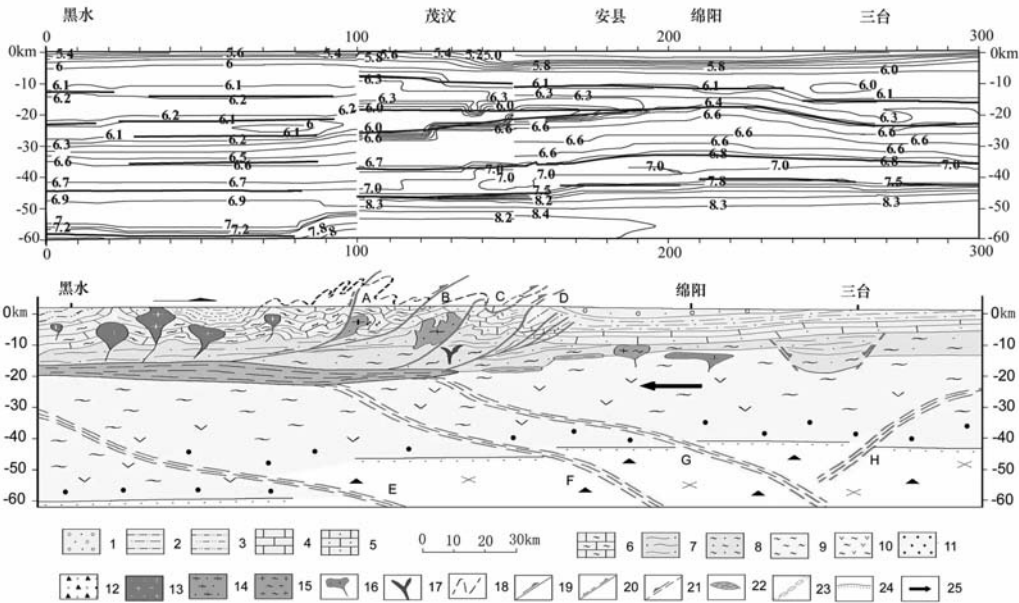


图 1 龙门山造山带北段岩石圈楔状构造剖面图
(蔡学林等,2003)

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

上图为地震测深剖面^[27],下图为构造解析剖面:1. 白垩系—第三系沉积岩系;2. 上三叠统一侏罗系沉积岩系;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. 中下地壳闪长质片麻岩类;11. 下地壳基性麻粒岩类;12. 岩石圈上地幔尖晶石二辉橄榄岩;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. 太古宙基性岩类;17. 中条期超基性岩类;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. 茂汶逆冲断裂带;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

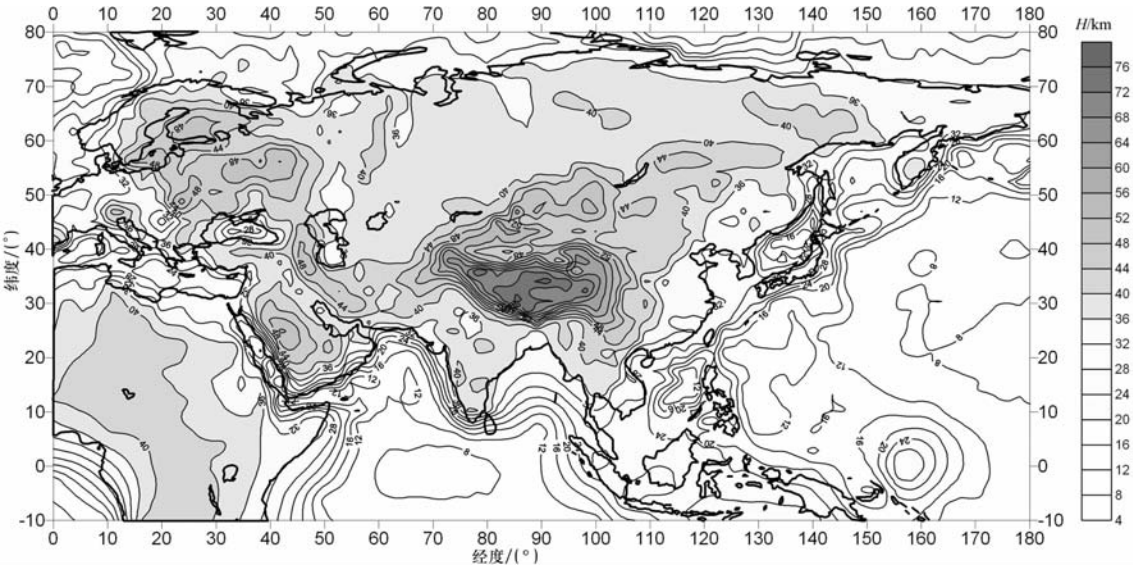


图 2 欧亚及西太平洋地区地壳厚度分布图

Fig. 2 Crust thickness in Eurasia and western Pacific region

图中等值线代表地壳厚度,单位为 km

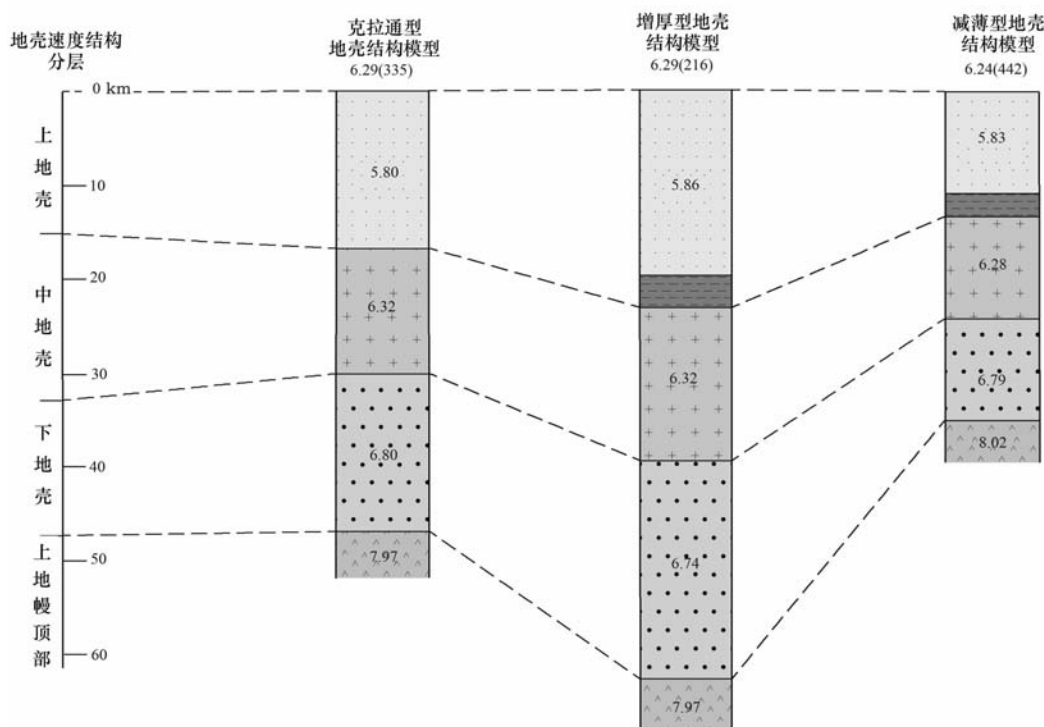


图3 中国大陆岩石圈地壳三类厚度与速度结构模型

Fig.3 The structure model of three types thickness and P-wave of lithosphere crust of the continent in China

图中水平横断线示壳内低速层,图内数字代表 v_p 速度平均值,单位为 km/s,括弧内数据代表参加平均的 v_p 速度数据数

太平洋岩石圈中下部存在 v_s 速度不均、形态各异、大小不等的高速块体,结合构造地质学等的研究,笔者将岩石圈中下部高速块体称为幔块构造^[65](图4)。早在20世纪80年代末,对华南地区进行地学断面研究时,就发现岩石圈中下部存在由高速块体构成的幔块或地幔^[28]。高速块体或幔块构造不仅控制不同大地构造单元岩石圈规模、大小和形态,而且控制岩石圈构造演化和岩石圈表层构造变形以及其他地质作用特征。因此,将高速块体或幔块构造的几何形态特征作为划分岩石圈三维结构型式另一重要依据之一。

2.2 岩石圈三维几何结构型式

从地球层块结构的研究思路出发,根据面波层析成像三维 v_s 速度结构研究与构造解析,以岩石圈中下部高速块体为依据,从三维几何结构方面,将东亚西太平洋岩石圈划分为八种结构型式:克拉通陆根状结构、高原陆根状结构、造山带楔状结构、碎块状结构、香肠状结构、哑铃状结构、藕节状结构和板状结构(图6)。

2.3 岩石圈构造演化型式

岩石圈厚度在构造演化过程中是逐渐变化的,

为此,运用比较构造学方法,根据岩石圈厚度演变规律,岩石圈 v_s 速度结构差异,地质学、岩石圈物质组成及其他地球物理学等标志,从岩石圈构造演化方面,将岩石圈划分为四种构造演化类型:克拉通型岩石圈,增厚型岩石圈,减薄型岩石圈和大洋型岩石圈。综合岩石圈三维几何结构型式与构造演化类型两方面标志,将东亚西太平洋地区岩石圈划分为四型八种结构构造类型:克拉通型陆根状岩石圈、增厚型高原陆根状岩石圈、增厚型造山带楔状岩石圈、减薄型碎块状岩石圈、减薄型香肠状岩石圈、减薄型哑铃状岩石圈、大洋型板状岩石圈和大洋型藕节状岩石圈。

3 岩石圈构造类型及其特征

3.1 克拉通型岩石圈

在岩石圈构造演化过程中,太古宙或元古宙已经形成,显生宙以来相对稳定发展的岩石圈称为克拉通型陆根状岩石圈(图4,图6I),它包括塔里木地块、上扬子地块、西伯利亚地块等。这些地块地壳厚度一般在40~50 km(图2),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

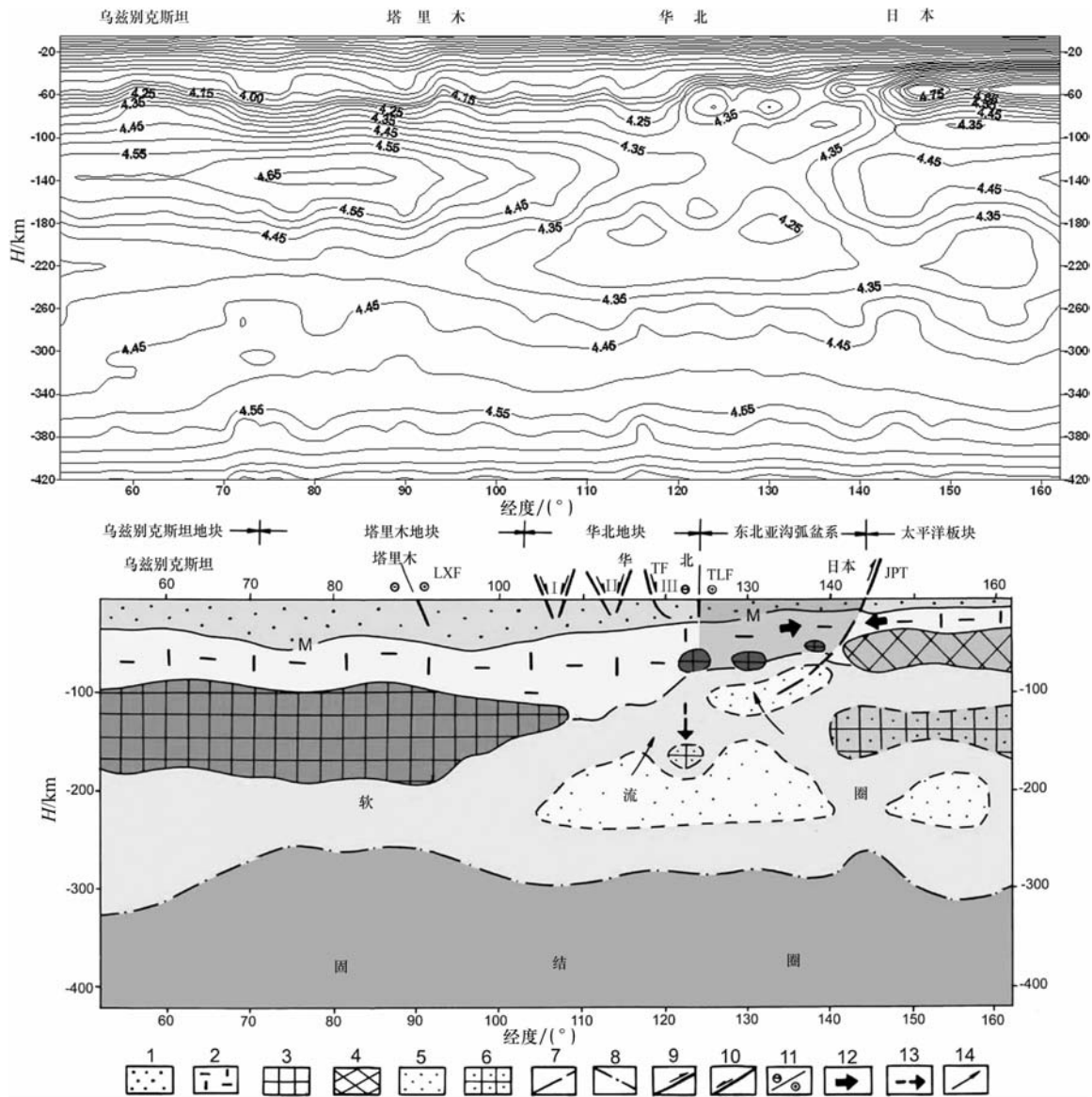


图4 塔里木—日本岩石圈与软流圈结构略图

Fig. 4 Simplified tectonic profile of the lithosphere and asthenosphere in Tarim-Japan

上图系天然地震面波层析成像 v_s 速度剖面(北纬 40 度, 图内数字为 v_s 速度值, 单位为 km/s, 下同); 下图系构造解析剖面: 1. 岩石圈地壳; 2. 岩石圈上地幔; 3. 欧亚板块乌兹别克斯坦地块、塔里木地块、华北地块、东北亚沟弧盆地岩石圈中下部高速块体或慢块构造; 4. 太平洋板块岩石圈中下部高速块体或慢块构造; 5. 软流圈内低速异常体; 6. 软流圈内高速块体; 7. 岩石圈底界面; 8. 软流圈底界面; 9. 现代板块海沟俯冲带; 10. 裂谷边界大型伸展正断裂带; 11. 大型走滑断裂带; 12. 板块及块体运移方向; 13. 高速块体流变方向; 14. 软流圈物质流变方向。I. 银川裂谷; II. 汾渭裂谷; III. 华北裂谷; LXF—罗布庄—星星峡走滑断裂带; TF—太行山东缘伸展正断裂带; TLF—郯庐走滑断裂带; JPT—日本海沟; M—莫霍界面; 示克拉通型陆根状岩石圈和减薄型香肠状岩石圈以及软流圈内低速异常体和高速块体

为 6.29 km/s(图 3), 西伯利亚地块地壳一般在 36~45 km^[59]。地震层析成像显示, 克拉通型岩石圈厚度巨大, 存在大陆根, 平均厚度多在 150 km 以上(图 5), 如上扬子地块最厚可达 185 km, 西伯利亚地块岩石圈厚度 210 km, 东欧地块岩石圈厚度 230 km^[57]。塔里木地块岩石圈厚度 190~200 km, 它是中国境内较典型的克拉通型陆根状岩石圈(图 4, 5)。岩石圈内高速块体或慢块构造规模巨大, 塔里

木地块岩石圈内高速块体厚度 130~160 km, 长可达 1 500 km 以上, 高速块体内部 v_s 速度值大, 多在 4.55~4.65 km/s(图 4)。其下的软流圈厚度较小, 多在 100~130 km, v_s 速度值较大, 一般在 4.33~4.36 km/s^[67], 平均值可达 4.62 km/s。由于岩石圈内高速块体规模巨大, v_s 速度值高, 软流圈厚度小, v_s 速度值高, 表明温度相对较低, 因此, 克拉通型岩石圈地壳浅层构造变形相对较弱。

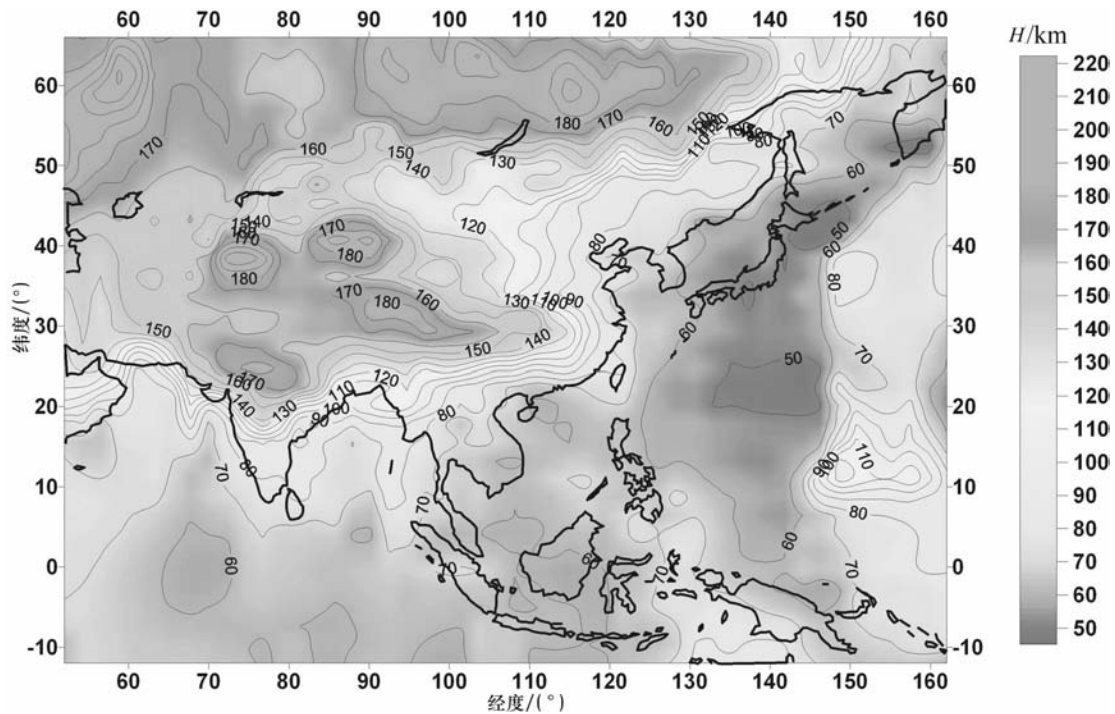


图 5 东亚西太平洋岩石圈厚度分布图
Fig. 5 Lithosphere thickness in East Asia and Western Pacific
图中等值线代表岩石圈厚度,单位为 km

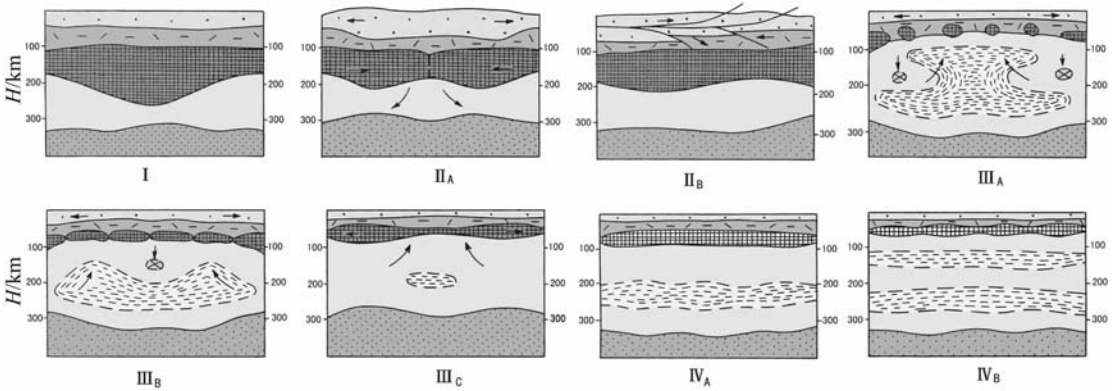


图 6 东亚西太平洋岩石圈三维几何结构型式

Fig. 6 Three-dimensional-geometric tectonic style of the lithosphere in East Asia-West Pacific

I 克拉通陆根状结构; II_A高原陆根状结构; II_B造山带楔状结构; III_A碎块状结构; III_B香肠状结构; III_C哑铃状结构; IV_A板状结构; IV_B藕节状结构。粗点示地壳,粗断线示岩石圈地幔顶部,细方格示岩石圈中下部高速块体或幔块构造;空白示软流圈,其中细断线示软流圈内低速异常体,斜方格示软流圈内高速块体;细点示固结圈

3.2 增厚型岩石圈

在构造演化过程中,岩石圈厚度是逐渐加厚的称增厚型岩石圈,按岩石圈三维结构型式可将它划分为增厚型高原陆根状岩石圈(图 6 II_A)和增厚型造山带楔状岩石圈(图 6 II_B),前者以青藏高原为代表,后者以龙门山造山带、天山造山带和台湾中央造山带为代表。

3.2.1 增厚型高原陆根状岩石圈

青藏高原是全球地壳最厚的地区,地壳厚度平均值为 63.09 km,藏南最厚达 78.5 km(图 2,3),根据深源包体岩石地球化学研究^[68],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、下地壳中(图 3)。青藏高原地壳 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,高原内部普遍发育壳内低速层(图 3)。地震层

析成像 v_s 速度结构显示,青藏高原岩石圈厚度平均值为 164.62 km,其中东西两个构造结附近岩石圈最厚,达 185~210 km(图 5,7),具“壳厚幔厚”结构,存在大陆根^[7](图 6ⅡA)。青藏高原岩石圈中下部高速块体 v_s 速度多在 4.50~4.55 km/s 以上,高于减薄型岩石圈,低于大洋型岩石圈,而与克拉通型

岩石圈相似,因此,青藏高原具有克拉通型岩石圈上地幔特征(图 7)。面波层析成像发现,青藏高原岩石圈中下部高速块体是由印度板块岩石圈和欧亚板块岩石圈中下部两部分高速块体构成,在东经 90°剖面藏北—可可西里地区两高速块体发生碰撞相连^[69],东经 78~84°层析成像剖面藏西北地区上述

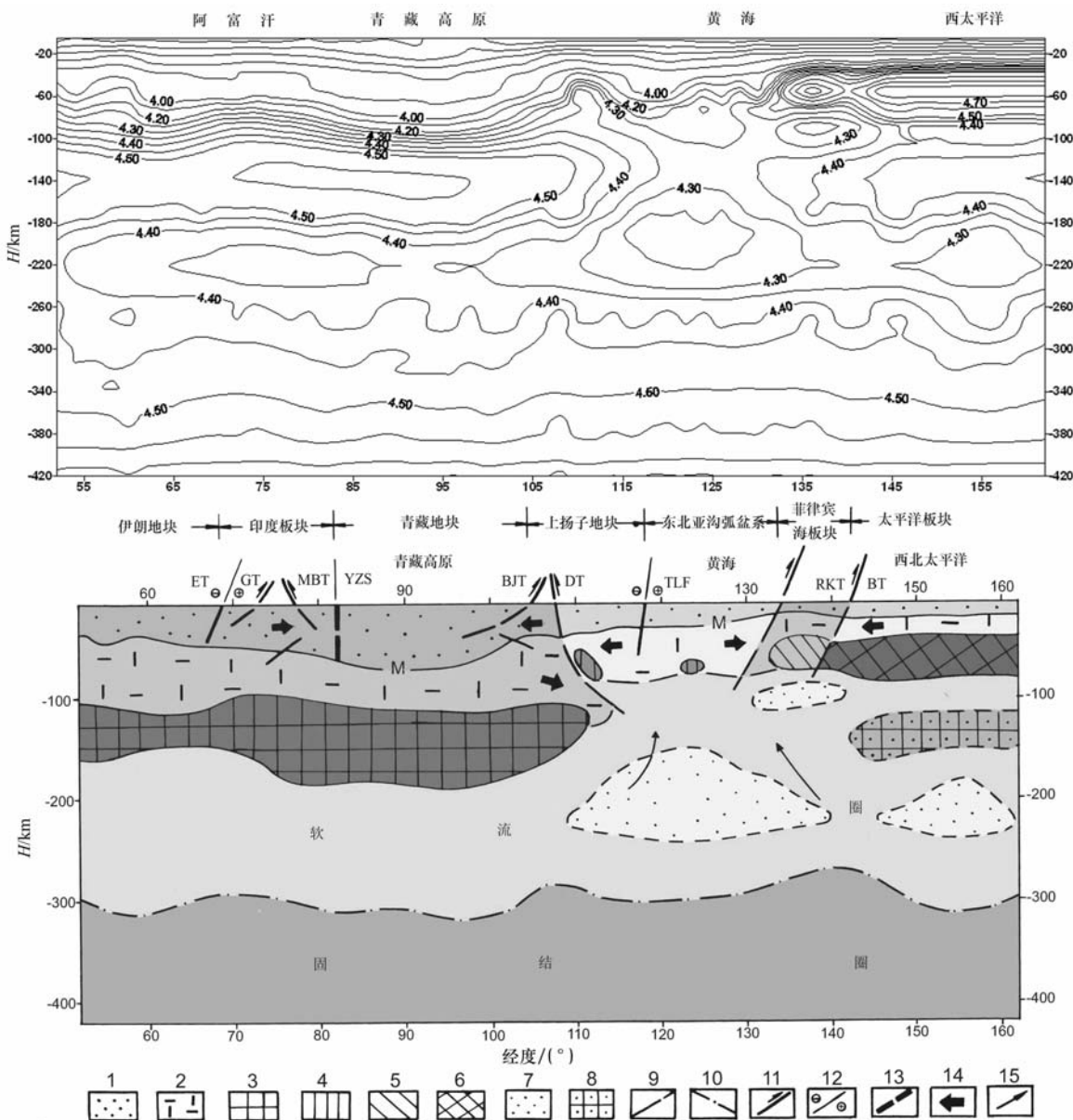


图 7 青藏高原—西太平洋岩石圈与软流圈结构及动力学模式

Fig. 7 Lithosphere and asthenosphere tectonics and dynamics model for the Tibet Plateau-West Pacific

上图系面波层析成像 v_s 速度结构剖面(北纬 32°);下图系构造解析剖面:1. 岩石圈地壳;2. 岩石圈上地幔;3. 印度板块、伊朗地块及青藏地块岩石圈中下部高速块体或幔块构造;4. 上扬子地块、东北亚沟弧盆系岩石圈中下部高速块体或幔块构造;5. 菲律宾海板块岩石圈中下部高速块体或幔块构造;6. 太平洋板块岩石圈中下部高速块体或幔块构造;7. 软流圈内低速异常体;8. 软流圈内高速块体;9. 岩石圈底界面;10. 软流圈底界面;11. 俯冲碰撞带及大型逆冲断裂带;12. 大型走滑断裂带;13. 板块碰撞缝合带;14. 板块及块体运移方向;15. 软流圈物质流变方向。EF—欧文走滑断裂带;GT—基尔塔尔逆冲断裂带;MBT—主边界逆冲断裂带;YZS—雅鲁藏布江碰撞缝合带;BJT—北川—九顶山逆冲断裂带;DT—大巴山逆冲断裂带;RKT—琉球海沟;BT—小笠原海沟。示增厚型高原陆根状和造山带楔状岩石圈、减薄型碎块状岩石圈及大洋型板状岩石圈

两高速块体正在发生深部碰撞。在俯冲碰撞过程中部分软流圈物质上涌,与岩石圈物质混合,转变成岩石圈组成部分^[67,70]。反映在地壳表层新生代中晚期超钾质、钾质火山岩系形成时代由东向西逐渐变新,岩浆起源由老到新由深变浅的态势^[71]。此外,高原软流圈厚度较小,仅 130~160 km, v_s 速度值较高,平均值为 4.34 km,这些事实显示,高原大陆根正在形成中。

3.2.2 增厚型造山带楔状岩石圈

楔状构造或鳄鱼构造在国内外碰撞造山带岩石圈中广泛存在^[60,72-78]。青藏高原周边地震测深剖面研究^[8,27,33,45,47,49],高原周缘造山带与前陆沉积盆地结合部岩石圈中上部均存在楔状构造,以龙门山造山带岩石圈楔状构造最典型^[76-78]。龙门山造山带地壳表层向北西倾斜的彭灌逆冲断裂带、映秀逆冲断裂带、北川—九顶山逆冲断裂带和茂汶断裂带向深部延伸消失在壳内低速层中,与向东南倾斜的安县壳幔韧性剪切带和绵阳壳幔韧性剪切带,向北西向上延伸到壳内低速层之间所围限的岩块,构成楔形体,楔形体尖端指向龙门山造山带,在岩石圈断面上,构成较典型的楔状构造(图 1、6 II_B)。天山造山带和台湾中央造山带岩石圈中上部亦存在楔状构造或鳄鱼构造^[20,65-66,79]。地震测深^[42]表明,天山造山带地壳厚度平均值为 51 km,最厚可达 62 km。天山造山带岩石圈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,天山造山带中南段向北倾

斜的逆冲断裂带或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,在天山造山带与准噶尔盆地结合部岩石圈地壳断面上表现为楔状构造^[80],该楔状构造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 8)。

3.3 减薄型岩石圈

东亚大陆边缘带及西太平洋边缘海巨型裂谷体系^[19,21]岩石圈结构多属减薄型岩石圈^[65-66]。减薄型岩石圈在构造演化过程中其厚度是逐渐减薄的,按岩石圈三维结构型式可将它划分为减薄型碎块状岩石圈(图 6 III_A)、减薄型香肠状岩石圈(图 6 III_B)和减薄型哑铃状岩石圈(图 6 III_C)。东亚西太平洋地区发育前两种型式,而减薄型哑铃状岩石圈仅分布在阿拉伯板块与非洲板块间的红海裂谷带。

3.3.1 减薄型碎块状岩石圈

南海及邻区岩石圈是减薄型碎块状岩石圈的典型代表(图 9)。地震测深显示,南海边缘带向海盆中央方向地壳厚度逐渐减薄,从 26 km 减薄到 14 km,南海中央最薄,一般仅有 10~12 km^[79,81]。南海地区岩石圈厚度平均值为 64.36 km,在南海北部、南部和婆罗洲地区最薄,仅 55~60 km,苏门答腊岛中段岩石圈最厚可达 80 km。 $2^\circ \times 2^\circ$ 面波层析成像 v_s 速度结构剖面构造解析表明,南海地区岩石圈中下部存在若干互不相连的规模较小的透镜状高速块体(图 9),岩石圈中下部高速块体内 v_s 速度比前两种类型低, v_s 速度平均值一般在 4.35~4.45 km/s。南沙、中沙和西沙之下均存在小型高速块体,高速块体控制南沙、中沙、西沙岩石圈浅部的构

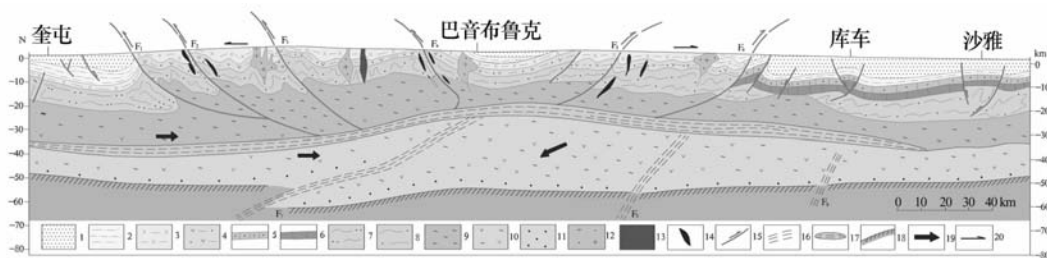


图 8 天山造山带岩石圈地壳结构略图

Fig. 8 The lithosphere crust structure of the Tianshan orogenic zone

地震测深剖面^[42]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—元古宙中浅变质岩系;8. 元古宙中浅变质岩系;9. 太古宙中深变质岩系;10. 中下地壳深变质岩类;11. 下地壳底部基性麻粒岩类;12. 海西期花岗岩类;13. 辉长岩类;14. 蛇绿岩;15. 逆冲断裂带;16. 壳幔韧性剪切带;17. 壳内低速层;18. 莫霍界面及上地幔顶部;19. 块体相对运移方向;20. 地壳表层或推覆体运移方向。F₁—准噶尔南缘断裂带;F₂—博罗科努断裂带;F₃—尼勒克断裂带;F₄—那拉提碰撞缝合带;F₅—哈尔克山碰撞缝合带;F₆—库尔勒断裂带;F₇—北天山壳幔韧性剪切带;F₈—南天山壳幔韧性剪切带;F₉—天山南缘壳幔韧性剪切带

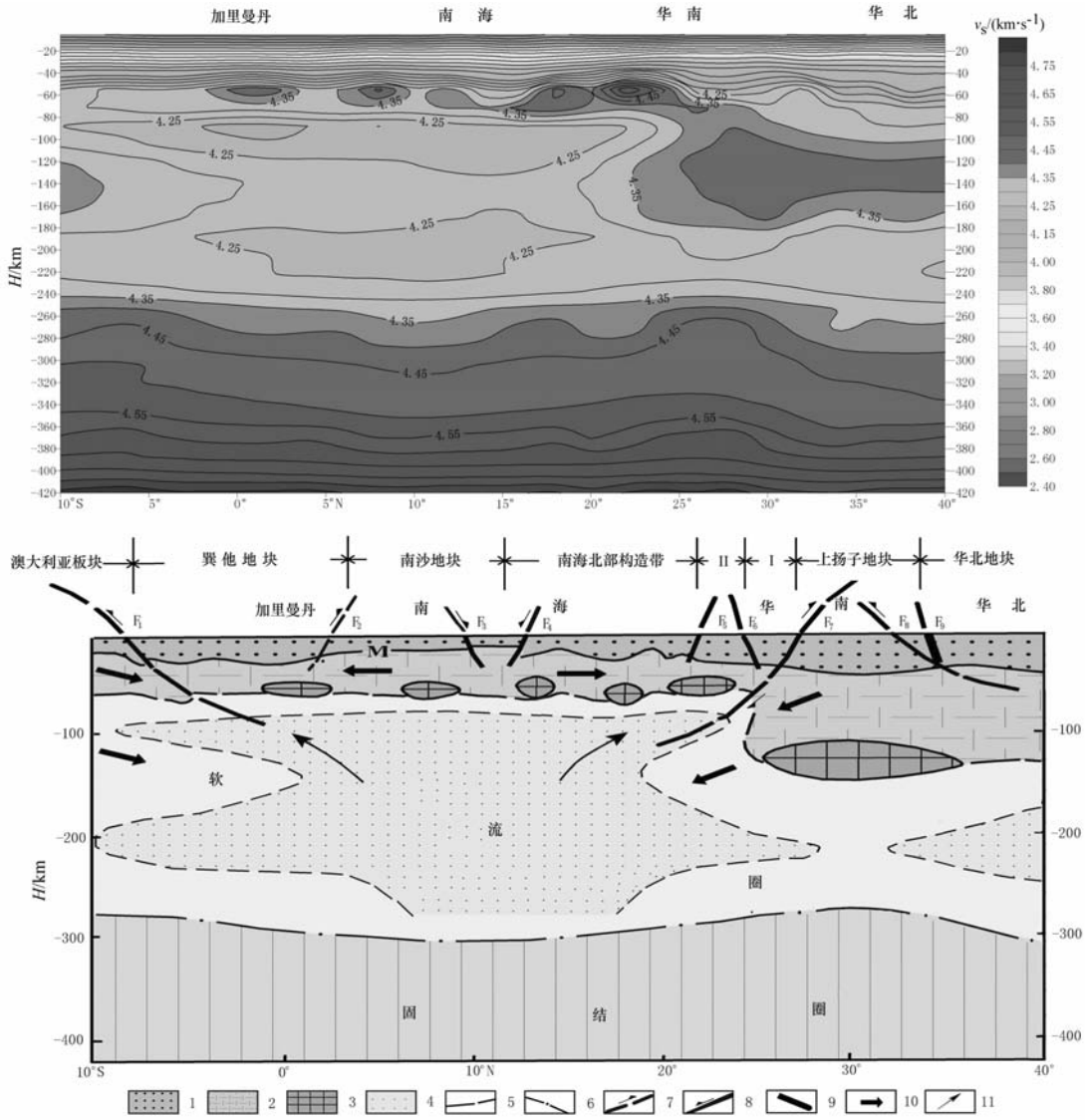


图9 南海—华北地区岩石圈及软流圈结构与动力学模式
(蔡学林等,2006)

Fig. 9 Lithosphere and asthenosphere structures and dynamic model in the South China Sea-North China region
上图为面波层析成像 v_s 速度剖面(112°E),下图为构造解析剖面:1—岩石圈地壳;2—岩石圈上地幔;3—岩石圈中下部高速块体或幔块构造;4—软流圈中低速异常体;5—岩石圈底界面;6—软流圈底界面;7—俯冲碰撞带及大型逆冲断裂带;8—伸展断裂带;9—碰撞缝合带;10—板块及块体运移方向;11—软流圈内物质流动方向。I—赣湘桂构造带;II—云开地块。M—莫霍界面; F_1 —苏门答腊俯冲带; F_2 —武吉米辛俯冲带; F_3 —西南海盆南缘伸展断裂带; F_4 —西南海盆北缘伸展断裂带; F_5 —南海北缘断裂带; F_6 —宁化—大湾断裂带; F_7 —溱浦—黔阳逆冲断裂带; F_8 —青峰逆冲断裂带; F_9 —桐商碰撞缝合带。示岩石圈碎块状结构和软流圈“工”型低速异常体

造变形。高速块体在空间上,构成互不相连的碎块状结构(图 6Ⅲ_A、9)。碎块状结构可能是伸展变形结果,仅在岛弧带存在挤压变形,形成沿岛弧带的线状挤压构造。

3.3.2 减薄型香肠状岩石圈

以华北地块岩石圈最典型,岩石圈浅部为盆岭相间的盆岭构造带,自西向东有银川裂谷带、鄂尔多斯沉积盆地、吕梁造山带、汾渭裂谷带、太行造山带、华北裂谷带和鲁西构造带等,岩石圈底部隆起处对

应裂谷带,底部坳陷处对应造山带,在岩石圈剖面形似香肠状构造^[11]。地震测深剖面^[36,38,50]构造解析表明,裂谷带内隆起区和坳陷带相向排列,在华北裂谷带岩石圈地壳亦显示香肠状构造(图 6Ⅲ_B、10)。该地块地壳厚度平均值仅为 34.58 km/s,其中黄骅坳陷地壳厚度减薄幅度最大,仅有 29.91 km。统计结果表明,地壳的减薄主要体现在上、下地壳中(图 3)。地震层析成像显示,现今华北地块东段岩石圈厚度较小(图 4),其平均值仅有 77 km。幔源包体

岩石地球化学研究表明,华北前中生代岩石圈厚度在 210~220 km^[83],晚中生代以来岩石圈减薄幅度高达 130~140 km。块体内 v_s 速度平均仅 4.39~4.44 km/s。华北地块地壳及岩石圈厚度由西向东呈香肠状减薄,这些特征显示,地壳及岩石圈的减薄可能是岩石圈呈断块式强烈伸展拆沉与上地幔物质上涌的联合作用引起的。

按岩石圈构造演化,减薄型岩石圈可由克拉通型陆根状岩石圈和增厚型造山带楔状岩石圈演化形成。地幔体波层析成像^[82]和中国东部深源岩石圈研究^[83-86],中生代燕山运动以来东亚大陆边缘岩石圈在伸展变形作用下,大陆岩石圈发生拆沉作用,地幔物质呈上升流状态,软流圈顶界面抬升,使地壳及岩石圈厚度减薄、速度降低、温度升高以及伸展正断裂带、壳幔韧性剪切带^[20]和岩浆活动发育,形成减薄型碎块状岩石圈和香肠状岩石圈,在岩石圈浅部发育东亚大陆巨型裂谷体系,其下存在近南北向延伸的巨型地幔低速异常带^[19,21,67],现今东亚至西太平洋间大陆裂谷、边缘海与沟弧系是新生代晚期以来各板块构造相互作用叠加的结果^[4,19,21,87-89]。

3.4 大洋型岩石圈

面波层析成像显示,大洋型岩石圈可分为大洋型板状岩石圈(图 6Ⅳ_A)和大洋型藕节状岩石圈(图 6Ⅳ_B),前者以太平洋板块为代表,后者以菲律宾板块为代表。

3.4.1 大洋型板状岩石圈

太平洋板块西部大洋地壳较薄(图 2),平均 11.93 km,但翁通爪哇海台地壳厚度大,在 28~33 km^[90]。岩石圈平均厚度为 76.61 km,其中西太平洋南部与北部岩石圈厚度较大,在 80~110 km 变化(图 5)。岩石圈底界面较平整,该岩石圈中下部高速块体呈平板状,厚度较小,延伸很远,构成经典的板块构造(图 11)。高速块体内 v_s 速度极高, v_s 速度平均值为 4.79 km/s。西太平洋板块岩石圈表层洋底亦较平坦,显示大洋岩石圈构造分异不明显。

3.4.2 大洋型藕节状岩石圈

菲律宾海板块地壳平均厚度为 12.08 km/s, v_p 平均速度为 6.06 km/s。岩石圈厚度最小,仅 50~60 km(图 5),其中马里亚纳海槽最薄,仅 48 km。岩石圈底界面多呈波状起伏,岩石圈中下部高速块体厚度小,延伸远,在岩石圈剖面上多呈藕节状结构^[20]。高速块体内 v_s 速度平均值可达 4.74 km/s。该岩石圈表层南北向延伸的海岭与海盆呈相间排列,海岭大体与大洋岩石圈中下部高速块体变薄地段对应,它表明大洋岩石圈发生明显构造分异。

4 东亚西太平洋岩石圈地幔动力学模式

4.1 欧亚西太平洋地区岩石圈陆海动力学态势

从全球陆海动力学分析,中生代以来欧亚大陆或欧亚板块处于太平洋动力体系、北冰洋动力体

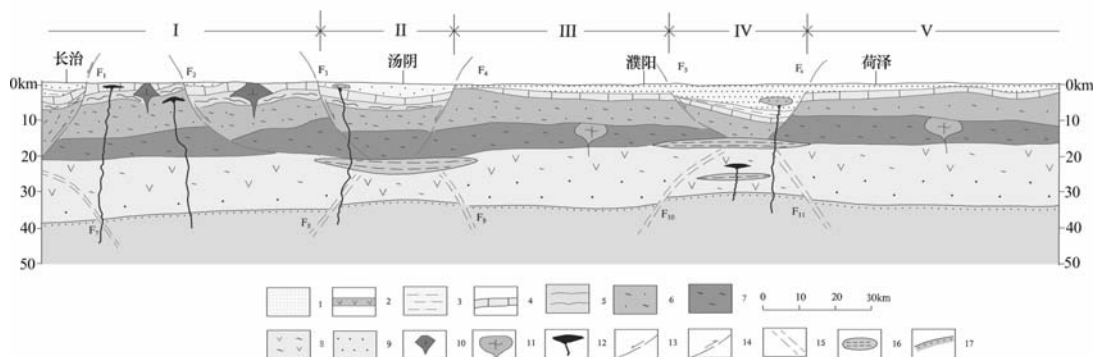


图 10 长治—菏泽断面地壳结构图

Fig. 10 The crust structure of the Changzhi-Heze transect

据地震测深剖面^[50]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. 中新元古界浅变质岩系;6. 中新太古界中深变质岩系;7. 古太古界深变质岩系;8. 中下地壳中基性变质岩类;9. 下地壳基性麻粒岩类;10. 印支—燕山期闪长岩;11. 太古宙 TTG 岩套;12. 基性侵入岩类;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。F₁—太行山西缘断裂带;F₂—任村—西平罗断裂带;F₃—太行山东缘断裂带;F₄—汤阴断裂带;F₅—长垣断裂带;F₆—聊城—兰考断裂带;F₇—长治—易县壳幔韧性剪切带;F₈—汤阴壳幔韧性剪切带;F₉—东江壳幔韧性剪切带;F₁₀—濮阳壳幔韧性剪切带;F₁₁—鲁西壳幔韧性剪切带。I—太行山构造带;II—汤阳拗陷;III—内黄隆起;IV—东明拗陷;V—菏泽隆起

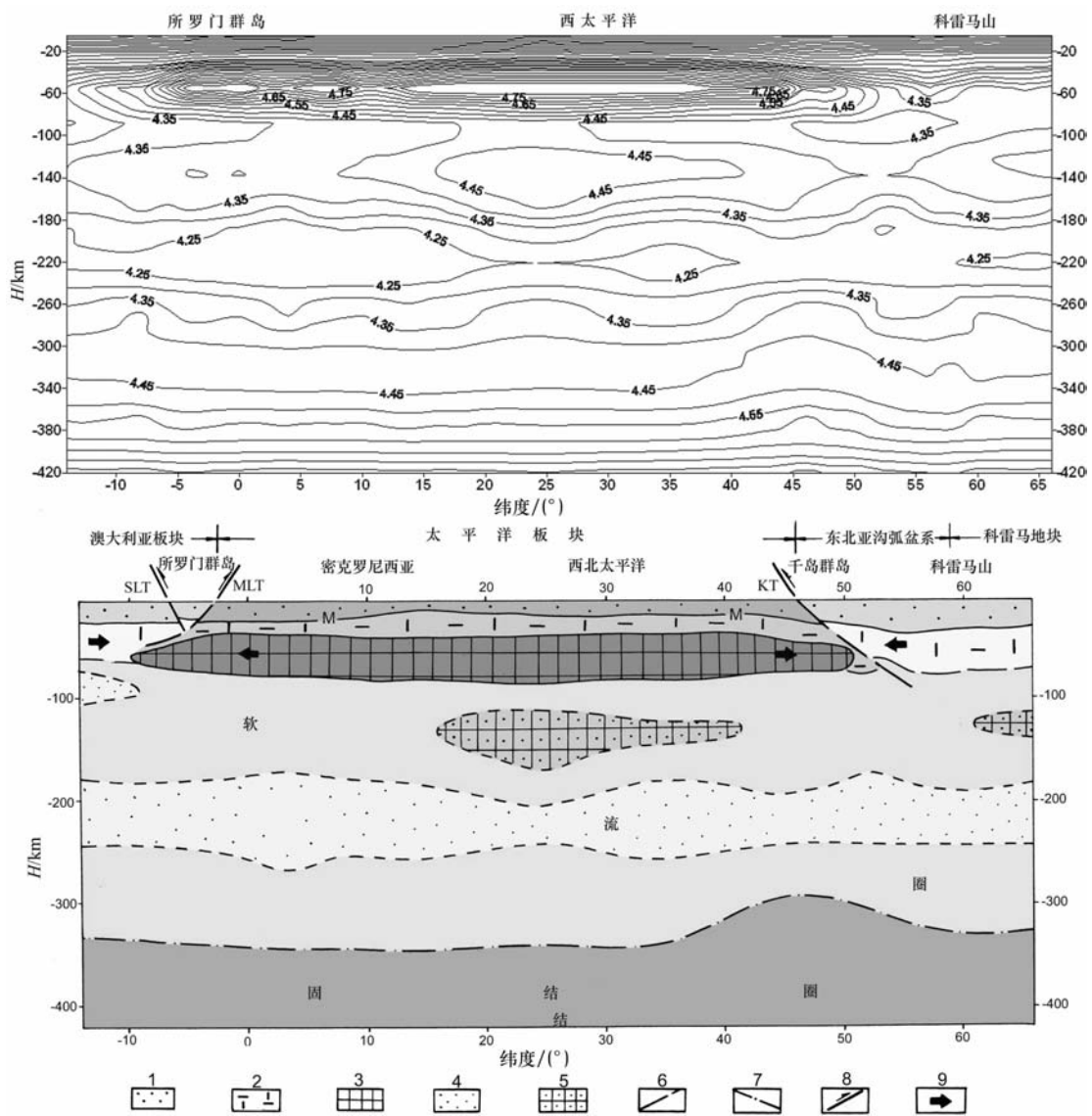


图 11 所罗门群岛—西北太平洋—科雷马山岩石圈与软流圈结构略图
Fig. 11 Simplified tectonic profile of the lithosphere and asthenosphere in Salomon Islands-Northwest Pacific-Kolyma Mountain

上图系面波层析成像 v_s 速度剖面(东经 154°);下图为构造解析剖面:1. 岩石圈地壳;2. 岩石圈上地幔;3. 太平洋板块岩石圈中下部高速块体或慢块构造;4. 软流圈内低速异常体;5. 软流圈内高速块体;6. 岩石圈底界面;7. 软流圈底界面;8. 海沟俯冲带;9. 板块及块体运移方向。SLT—所罗门海沟;MLT—美拉尼西亚俯冲碰撞带;KT—千岛海沟。示太平洋大洋板状岩石圈

系、大西洋动力体系、印度洋动力体系和非洲大陆动力体系、澳洲大陆动力体系及北美大陆动力体系的结合部位,欧亚大陆及欧亚板块形成过程中即受欧亚大陆自身大陆岩石圈动力体系的控制,又受太平洋动力体系、印度洋动力体系、大西洋动力体系、北冰洋动力体系和非洲大陆动力体系、澳洲大陆动力体系的影响。在这一陆海基本动力学条件控制与影响下,亚洲及西太平洋南面的澳大利亚板块、印度板块、阿拉伯板块不均匀的向北运移、俯冲和碰撞,亚洲东面的太平洋板块、菲律宾海板块向西、北西西俯

冲和运移,而亚洲北部的西伯利亚地块相对向南发生陆内运移、俯冲与碰撞,以及东亚大陆边缘带部分地块向东运移和离散,从而形成对东亚大陆及邻区多向俯冲—碰撞—伸展变形的全球最特殊的陆海动力学态势(图 12)。

4.2 东亚西太平洋地区地幔对流动力学型式
地幔的物质流动与化学分异是岩石圈板块运动的基本动力源,地震体波层析成像研究地幔垂流动速度表明^[82,91-92],东亚及西太平洋边缘海地区大体可分为三个地幔物质流动区,并对应三个岩石圈

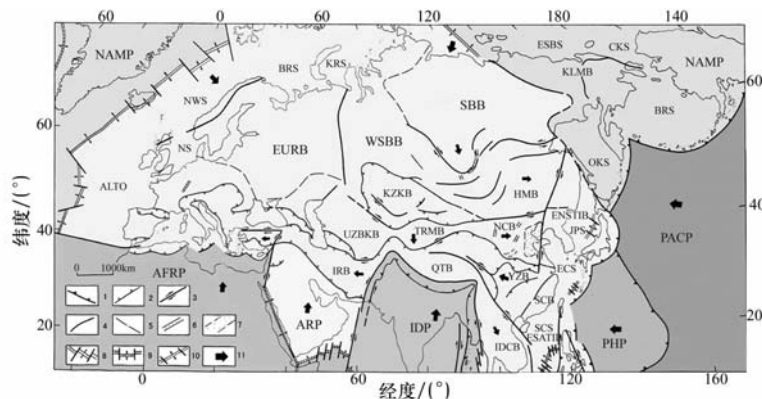


图 12 欧亚大陆及邻近地区构造与动力学略图

Fig. 12 The tectonic and dynamics in Eurasia continent and its adjacent region

1. 现代海沟俯冲带; 2. 大陆碰撞—逆冲断裂带; 3. 大型走滑断裂带; 4. 古俯冲碰撞缝合带及大型断裂带; 5. 推覆及隐伏大型断裂带; 6. 陆内伸展正断裂带及伸展裂谷; 7. 陆内大型伸展正断裂带及其伸展裂谷带; 8. 弧后边缘海伸展盆地; 9. 海洋伸展裂谷带; 10. 大洋洋中脊及转换断层; 11. 板块及地块运动方向。EURB—东欧地块; SBB—西伯利亚地块; WSBB—西西伯利亚地块; KLMP—科雷马地块; HMB—兴蒙地块; KZKB—哈萨克斯坦地块; UZBKB—乌兹别克斯坦地块; TRMB—塔里木板地块; NCB—华北地块; IRB—伊朗地块; QTB—青藏地块; YZB—扬子地块; SCB—华南地块; IDCB—印支地块; ENSTIB—东北亚弧盆地; ESATIB—东南亚弧盆地; NAMP—北美板块; AFRP—非洲板块; ARP—阿拉伯板块; IDP—印度板块; PHP—菲律宾海板块; PACP—太平洋板块; ALTO—大西洋; NS—北海; NWS—挪威海; BRS—巴伦支海; KRS—喀拉海; ESBS—东西伯利亚海; CKS—楚科海; BRS—白令海; OKS—鄂霍茨克海; JPS—日本海; ECS—东海; SCS—南海

构造区: 西伯利亚及周边地幔表现为地幔物质下降流, 从岩石圈下降到下地幔下部, 反映地幔速度高, 温度相对较低, 对应以西伯利亚克拉通型岩石圈为代表的古亚亚构造域; 青藏高原及周边地区俯冲地幔物质下降流, 从上地幔到下地幔下部 2 000 km 都有显示, 反映地幔速度高, 温度相对较低, 对应以青藏增厚型岩石圈、塔里木和上扬子克拉通型岩石圈为代表的特提斯构造域; 东亚大陆边缘带至西太平洋边缘海间地幔物质上升流, 这一地幔物质上升流从下地幔 2 400 km 开始到上地幔 550 km 以上都有显示, 反映地幔速度低, 温度相对较高, 对应以中国东部减薄型岩石圈为代表的东亚西太平洋边缘海巨型裂谷体系^[19,21]。研究表明, 南海的形成可能与该区地幔物质上升流有关^[19,21,91,93], 南海及周边地区地幔物质上升流从上到下几何结构可能是上部呈“工”字型结构^[93](图 9)、中部为圆柱型结构、底部呈盾形, 据此, 笔者将这种结构称为“复蘑菇状地幔低速柱”或“复蘑菇状地幔热柱”^[94]。

4.3 中国及邻区岩石圈形成与演化模式

根据东亚西太平洋岩石圈三维结构构造演化类型及地幔动力学研究, 结合岩石圈物质组成研究, 对中国及邻区岩石圈形成与演化模式作如下探讨。

中国及邻区在太古—元古宙时期, 已经形成原始大陆岩石圈, 华北地块和塔里木地块, 广泛存在古太古代时期地质矿物信息, 根据幔源岩石包体成分

与地球化学研究, 不仅存在元古宙时期的岩石圈, 而且岩石圈厚度达到 200~250 km 以上^[83], 存在岩石圈根或大陆根。从震旦纪到三叠纪印支运动末中国大陆内部克拉通型陆根状岩石圈, 整体挤压平稳发展, 如华北地块岩石圈厚度在 210~220 km^[83], 仅局部伸展减薄, 如上扬子地块岩石圈局部伸展减薄, 引起古生代晚期峨眉山玄武岩浆大量喷出。与此同时, 可能形成以近东西向为主的兴蒙造山带和中央造山带增厚型楔状岩石圈。中生代晚侏罗世燕山运动以来, 在上述陆海动力学和地幔对流动力学的控制和制约下, 从而形成东亚及西太平洋三个巨型变形构造区: 即东部岩石圈强烈伸展减薄变形构造区、中部克拉通岩石圈稳定发展变形构造区和西部岩石圈强烈俯冲碰撞汇聚增厚变形构造区。

东部岩石圈强烈伸展减薄变形构造区, 在中生代燕山运动以来, 地壳及上地幔由相对稳定转向强烈活化^[13], 由于全球动力学体制发生了根本的转变, 以南北向主压应力场为主的挤压变形, 转向以近东西向主张应力场为主的岩石圈强烈伸展变形^[2,95-96], 从而使东亚大陆构造格局发生翻天覆地的变化。在近南北向地幔上升流的影响下, 发生近东西向强烈的伸展变形作用, 引起东亚大陆边缘带岩石圈强烈伸展减薄^[19,67,97-98]与规模巨大的软流圈物质上涌加热, 开始发育东亚大陆巨型裂谷体系以

及新生岩石圈部分的形成。在亚洲东部边缘形成巨量花岗岩浆侵入、大规模中酸性岩浆喷出活动,以及伴随大规模成矿作用。白垩纪末开始,大陆裂谷系开始发育基性岩浆喷出活动和边缘海,边缘海主导扩张时期为中渐新世到中中新世(32~13 Ma),其中南海中央洋壳年龄为 32~17 Ma^[99],海盆扩张时间较短,一般不超过 25 Ma^[100],17~15 Ma 以来,多数边缘海转变为挤压环境^[101],形成南海地区软流圈内“工”字型低速异常带^[93]。新生代中晚期以来,由于受太平洋板块、菲律宾海板块、澳大利亚板块俯冲碰撞,局部发育欧亚板块向菲律宾海板块俯冲^[4,79,102],从而形成现今东亚大陆至西太平洋间大陆裂谷、边缘海和沟弧体系构造格局,并叠加在东亚大陆巨型裂谷体系上^[19,21]。

中部克拉通型岩石圈稳定发展变形构造区,以上扬子地块为代表,该区中生代燕山运动以来转变为陆内沉积,叠加了四川盆地及周边造山带巨型逆冲推覆构造,岩浆活动微弱,喜马拉雅运动以来继续保持克拉通型陆根状岩石圈特性。西部岩石圈强烈俯冲碰撞汇聚增厚变形构造区是围绕青藏高原俯冲—碰撞—楔入—隆升过程而进行的,青藏高原是侏罗纪以来新特提斯洋盆扩张、消亡基础上形成的^[103]。在该区岩石圈俯冲及地幔下降流的影响与制约下,在古新世至中始新世时期,青藏高原南面的印度板块和阿拉伯板块不均匀的向北运移、俯冲和碰撞,而青藏高原北面的塔里木地块向南发生陆内俯冲、运移和碰撞,而青藏高原东缘的上扬子地块向西发生陆内运移、俯冲和碰撞^[2,77-78,104]。在渐新世(32~24 Ma)以来,高原周边的克拉通地块或板块向青藏高原发生多向俯冲—碰撞—楔入—伸展隆升的动力学态势^[77],以及青藏高原西部的伊朗地块向西或西南运移,相应,引起青藏高原东部的印支地块向东南离散与运移^[105],中新世以来,在青藏高原岩石圈及软流圈的动力学状态是:岩石圈浅部和软流圈处于伸展变形状态,而岩石圈中、下部处于挤压变形状态,从而形成以挤压变形为主的高原、造山带与沉积盆地相间的全球最大的高原陆根状岩石圈。

5 结论与认识

(1)根据人工地震测深和地震层析成像等多学科的综合研究,在编制岩石圈多种构造解析图和动

力学模式图的基础上,建立起东亚西太平洋岩石圈四种构造演化类型和八种三维几何结构型式,东亚西太平洋岩石圈三维结构的多样性可能是中国及邻区大地构造复杂性的基本原因之一。

(2)地震层析成像显示,青藏高原陆根状岩石圈正在增厚过程中,多向俯冲—碰撞—楔入—伸展隆升是青藏高原形成最基本的变形动力学型式。地震层析成像发现,东亚西太平洋存在近南北向巨型地幔低速异常带,中生代燕山运动以来,东亚大陆边缘带系减薄型岩石圈,岩石圈浅部存在东亚大陆巨型裂谷体系,新生代晚期以来东亚大陆巨型裂谷体系又被西太平洋边缘沟弧盆体系叠加。

(3)东亚大陆边缘带岩石圈大规模伸展减薄作用以及软流圈和地幔物质上涌加热作用与青藏高原岩石圈大规模俯冲碰撞楔入增厚作用以及地幔物质下降流作用是东亚大陆及边缘海晚中生代以来地幔动力学最基本的表现型式,从而形成全球最大的青藏高原和全球最大的东亚大陆巨型裂谷体系。

References:

- [1] Zhang W Y. Marine and continental geotectonics of China and its environs[M]. Beijing: Science Press, 1986:8-575(in Chinese).
- [2] Ma X Y. Outline of lithospheric dynamics of China—the explanation of lithospheric dynamics map in China and offshore areas(1:4 000 000)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987:1-45(in Chinese).
- [3] Ma X Y. Atlas of the lithosphere dynamics of China[M]. Beijing: Cartographic Publishing House, 1989:1-68(in Chinese).
- [4] Liu G D. Geological-geophysical atlas of China seas and its adjacent regions[M]. Beijing: Science Press, 1993:56-91(in Chinese).
- [5] Fukao Y, Maruyama S, Oobayashi, et al. Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography [J]. Jour Geol Soc Japan, 1994, 100(1):4-23.
- [6] Maruyama S. Plume tectonics [J]. Jour Geol Soc Japan, 1994, 100(1):24-49.
- [7] Yuan X C. Atlas of geophysics in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:1-200.
- [8] Yuan X C, Egorov A S, et al. The geoscience transect in the Arctic ocean—Eurasia—Pacific ocean [M]. Beijing: Science Press, 2000:1-32.
- [9] Zhu J S. 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).

- [10] Zhu J S, Cao J M, Li X G, et al. A preliminary three-dimensional Earth's model of China and adjacent regions and its implications[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(4): 499-518.
- [11] Deng J F, Zhao H L, Mo X X, et al. Continental roots-plume tectonics of China—key to the continental dynamics[J]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1-83(in Chinese).
- [12] Zhang Y S, Ma S Z. Global surface wave phase velocity variations and their tectonic implications[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(2):181-192.
- [13] Chen G D. Crustobody geotectonics of Asian continent and adjacent seas[M]. Changsha: Education of Hunan Press, 1998:62-215(in Chinese).
- [14] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions model and animations[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, 20: 353-431.
- [15] Christensen N L, 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.
- [16] Mooney W D, Laske G, Masters T G. Crust 5. 1—a global crustal model at $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B1):727-747.
- [17] Ren J S, Wang Z X, Chen B W, et al. The tectonics of China from a global view—a guide to the tectonic map of China and adjacent regions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999:1-38.
- [18] Teng J W, Zhang Z J, Bai W M, et al. Geophysics of lithosphere[M]. Beijing: Science Press, 2004: 76-170 (in Chinese).
- [19] Cai X L, Zhu J S, Cao J M, 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).
- [20] Cai X L, Zhu J S, Cao J M, 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).
- [21] Zhu J S, Cao J M, Cai X L, 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).
- [22] Li T D. Main advances and achievements in the special-subject study of the 3D lithospheric structure of China[J]. Geology in China, 2006, 34(4):689-699(in Chinese).
- [23] Smith A D. The geodynamic significance of the DUPAL anomaly in Asia[M]// Flower M F J. Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. Geophys Geodynamics Ser. 27, Washington D C: AGU, 1998: 89-105.
- [24] Cao J M, Zhu J S, Wu D C. Velocity structure of the crust in Eastern Qinling Mountain[J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 1994, 21(1):11-17(in Chinese).
- [25] Cai X L, Shi S Q, Wu D C, et al. Formation and tectonic evolution of the Wudangshan nappe structure [M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1995:1-207(in Chinese).
- [26] Cao J M, Dong Y Z. Study of Shaoyang-Quanzhou crustal structure in South China by means of seismic deep sounding [G]//Collected papers geoscience transect in Altay-Taiwan. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997: 87-92 (in Chinese).
- [27] Cao J M, Wang Y X. Crustal velocity structure of Maowen-Shaoyang part of Altay-Taiwan profile[G]//Collected papers of geoscience transect in Altay-Taiwan. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997:82-86(in Chinese).
- [28] Yuan X C, Zuo Y, Cai X L, et al. The structure of the lithosphere and the geophysics in the South China Plate[M]//Geophysics in China in the Eighties. Beijing: Learning Publication Press, 1989:243-249(in Chinese).
- [29] Ma X Y. Analytical tectonics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 10-421(in Chinese).
- [30] Fu Z R, Cai X L. Structural geology of metamorphic terrain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1-239 (in Chinese).
- [31] Yuan X C, Lin F T, Xu P F, et al. Deep structure of the Dabieshan orogenic belt [M] // Ultrahigh pressure metamorphism and collisional orogenic dynamics of the Dabieshan. Beijing: Science Press, 2005:159-185(in Chinese).
- [32] Wu G J, Xiao X C, Li T D. The geoscience transect in Yandong-Golmud of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 1989,63(4):285-296(in Chinese).
- [33] Cui Z Z, Li Q S, Wu C D, et al. The crustal and deep structures in Golmud-Ejinqi GGT [J]. Acta Geophysica Sinica, 1995,38(Suppl II):15-28(in Chinese).
- [34] Chen H S, Zhou X Q, Li D Q, et al. The geoscience transect in Lingbi-Fengxian(HQ-13) of the China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994:1-59(in Chinese).
- [35] Zhang Y X, Sun Y S, Zhang X Z, et al. Manzhouli-Suifenghe geoscience transect, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998:1-35(in Chinese).
- [36] Ma X Y, Liu C Q, Liu G D. The geoscience transect in Xiangshui of Jiangsu to Mandouca of Neimenggu[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991:1-62(in Chinese).
- [37] Sun W C, Ma B L, Song S Y, et al. The geoscience transect in Suizhou of Hubei to Kaloqinqi of Neimenggu[M]. Beijing: Seismological Press, 1992:1-57(in Chinese).
- [38] Lu Z X, Xia H K. The geoscience transect in Dongwuzhumuqinqi of Neimenggu to Donggou of Liaoning[M]. Beijing: Seismological Press, 1992:1-59(in Chinese).
- [39] Lin Z Y, Cai W B, Chen X B, et al. The geoscience transect in Menyan of Qinghai to Ningde of Fujian[M]. Beijing: Seismological Press, 1993:1-44(in Chinese).

- [40] Han R J, Han Y. The geoscience transect in Zhefang to Malong of Yunnan[M]. Beijing: Seismological Press, 1992: 1-63 (in Chinese).
- [41] Sun W C, Xu J, Yang Z, et al. The geoscience transect in Fengxian of Shanghai to Alashanzaqi of Neimenggu[M]. Beijing: Seismological Press, 1992: 1-66(in Chinese).
- [42] Lu D Y, Li Q S, Gao R. The man-made explosion seismic profiler of the across Tianshan[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(9): 982-988(in Chinese).
- [43] Zhang X K, Zhao J R, Zhang C K, et al. Crustal structure at the Northeast side of the Pamirs[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(5): 665-671(in Chinese).
- [44] Li S L, Zhang X K, Zhang C K, 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).
- [45] Gao R, Huang D D, Lu D Y, et al. The deep seismic reflection profiler in the junction belt of the across west Kunlun orogenic zone and Tarim basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(17): 1874-1879(in Chinese).
- [46] Zhao W J, Nelson K D, Che J K, et al. Deep seismic reflection in Himalaya region reveals the complexity of the crust and upper mantle structure [J]. Acta Geophysica Sinica, 1996, 39(5): 615-628(in Chinese).
- [47] Wang C Y, Wu J P, Lou H, et al. The crustal P-wave velocity structure of the western Sichuan and Eastern Tibet[J]. Science in China: Series D, 2003, 33(Suppl): 181-189 (in Chinese).
- [48] Xiong S, Liu H B. The crustal structure of the western Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(12): 1309-1314(in Chinese).
- [49] Teng J W, Zhang Z J, Wang G J, 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).
- [50] Jia S X, Liu C Q. Interpretation 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).
- [51] Chen X B. The research on characteristics of the deep tectonics in Three Gorges and nearby area[M]. Beijing: Seismological Press, 1994: 1-145(in Chinese).
- [52] Teng J W. The physical and dynamics of the lithospheric of structure zone in Kang, Yunnan [M]. Beijing: Seismological Press, 1994: 1-193(in Chinese).
- [53] Zhang C K, Zhao J R, Ren Q F, et al. Study on crust and upper mantle structure in North Henan and its surroundings [J]. Seismology and Geology, 1994, 16(3): 243-253(in Chinese).
- [54] Ilchenko T. Dniepr-Donets Rift: deep structure and evolution from DSS profiling[J]. Tectonophysics, 1996, 268: 83-98.
- [55] Juhlin C, Knapp J, Kashubin S, et al. Crustal evolution of the Middle Urals based on seismic reflection and refraction data[J]. Tectonophysics, 1996, 264: 21-34.
- [56] 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.
- [57] Morozova E A, Morozov I B, Smithson S B. Heterogeneity of the uppermost mantle beneath Russian Eurasia from the ultra-long-range profile QUARTZ[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(B9): 20329-20348.
- [58] Kodaira S, Iwasaki T, Urabe T, et al. Crustal structure across the middle Ryukyn trench obtained from ocean bottom seismographic data[J]. Tectonophysics, 1996, 263: 39-60.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] Yao B C, Hayes D E, Zeng W J, et al. The geological memoir of South China Sea surveyed jointly by China and USA[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994: 34-140(in Chinese).
- [62] Gao D Z, Zhao J H, Bo Y L, et al. A profile study of gravitational-magnetic and seismic comprehensive survey in the East China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(5): 853-861(in Chinese).
- [63] Mao T, Liu X M, Zhao Ming. Progress in the research of coupling action between the layer and sphere in the Earth interior[J]. Science and Technology Review, 1999, 6: 28-30(in Chinese).
- [64] Yang W C. Introduction to earth interior physics of post-plate tectonics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 26-104(in Chinese).
- [65] Cai X L, Zhu J S, Cao J M, et al. Three-dimensional tectonic types and evolutionary dynamic of lithosphere of South China region[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27(4): 299-310(in Chinese).
- [66] Zhu J S, Cai X L, Cao J M, 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).
- [67] Cai X L, Zhu J S, Cao J M, 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).
- [68] Luo Z H, Zhang W H, Deng J F, 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).
- [69] Zhu J S, Cai X L, Cao J M, et al. The high resolution seismic

- tomographic image in Qinghai-Tibet Plateau and its dynamic implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7 (Suppl): 354-356.
- [70] Zhong D L, Ding L, Ji J Q, et al. Coupling of the lithospheric convergence of West China and dispersion of East China in Cenozoic; link with paleoenvironmental changes[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(4):303-312(in Chinese).
- [71] Deng W M. Cenozoic volcanic activity and its geotectonic background in West China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(2):471-478(in Chinese).
- [72] Bousquet R, Goff B, Henry P, et al. Kinematic, thermal and petrological model of the Central Alps; Lepontine metamorphism in the upper crust and eclogitization of the lower crust [J]. *Tectonophysics*, 1997, 273: 105-127.
- [73] Schmid S M, Pfiffner O A, Froitzheim, et al. Geophysical-geological transect and tectonic evolution of the Swiss-Italian Alps[J]. *Tectonics*, 1996, 15(5):1036-1064.
- [74] Teixell A. Crustal structure and orogenic material budget in the west central Pyrenees[J]. *Tectonics*, 1998, 17(3):395-406.
- [75] Yuan X C. The crustal structure of the Qinling orogen and wedging mountain building[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1997, 71(3):227-235(in Chinese).
- [76] Cai X L, Wei X G, Liu Y C, et al. On the wedging-in orogenesis[C]//*Progress in geology of China (1993-1996)—Papers to 30th IGC*. Beijing: China Ocean Press, 1996: 315-320.
- [77] Cai X L, Cao J M, Liu Y C, 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).
- [78] Xu Z Q, Yang J S, Jiang M, et al. Continental subduction and uplifting of the orogenic belts at the margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(3): 139-151(in Chinese).
- [79] Cai X L, Zhu J S, Cao J M, 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).
- [80] Liu X. A study of the crustal tectonic evolution in basin-mountain areas of Northwest China in the Xinjiang geotranssect [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2005, 26(2):105-112(in Chinese).
- [81] Wan L, Yao B C, Zeng W J, et al. Lithospheric structure and petroleum distribution in the South China Sea[J]. *Geology in China*, 2006, 33(4):874-884(in Chinese).
- [82] Cheng X Q, Zhu J S, Cai X L. A study of global vertical velocity of mantle flow [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4):1022-1028(in Chinese).
- [83] Menzies A M, Xu Y G. Geodynamics of the North China Craton[M]//Flower M F J. Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. *Geophys Geodynamics Ser.* 27, Washington D C: AGU, 1998: 155-165.
- [84] Zhong Y X, Liu Y C, Cai X L. Study of the granulite xenoliths from the lower crust in basalt, Daoxian, Hunan[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1993, 20(1):56-61 (in Chinese).
- [85] Xu X S, Cai Y F, Zhou X M. Studies of the Cenozoic lithospheric mantle beneath Southeast China[J]. *Journal of Nanjing University :Natural Sciences*, 2000, 36(6):773-779(in Chinese).
- [86] Zheng J P. Mesozoic-Cenozoic mantle replacement and lithospheric thinning beneath the Eastern China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999: 1-124 (in Chinese).
- [87] Lu C Y, Yu Shuibei, Chu Haotsu. Neotectonics of the Taiwan Mountain belt[M]//Flower M F J. Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. *Geophys Geodynamics Ser.* 27, Washington D C: AGU, 1998:301-315.
- [88] Zhou Z Y, Liao Z T, Jin X C, et al. Okinawa trough: the highest stage of continental tension rifting in back-arc setting [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2001, 21(1): 51-55(in Chinese).
- [89] Gao Y J, Mo Z Q, Wu S Y. Studies on K-Ar geochronology and geochemistry of Mariana trough basalts[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, 20(3): 53-59 (in Chinese).
- [90] Gladchenko T P, Coffin M F, Eldholm O. Crustal structure of the Ontong Java Plateau; modeling of new gravity and existing seismic data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B10):22711-22729.
- [91] Cheng X Q, Zhu J S, Cai X L. Mantle flow velocity of East Asia[J]. *Geology in China*, 2006, 33(4): 896-905 (in Chinese).
- [92] Zhu J S. Structure of lower mantle and core-mantle boundary region and its geodynamics[J]. *Advances in Earth Science*, 2000, 15(2):139-142(in Chinese).
- [93] Cai X L, Zhu J S, Cao J M, et al. The characteristics and implications of “工” type low velocity zone in asthenosphere of South China Sea[C]//*Annual of the Chinese Geophysical Society (2002)*. Beijing: Seismological Press, 2002: 247(in Chinese).
- [94] Cai X L, Zhu J S, Cheng X Q. et al. Discovery and geodynamics significance of the compound mushroom mantle plumes of South China Sea [C]//*Annual of the Chinese Geophysical Society (2005)*. Changchun: Jilin of University Press, 2005:396 (in Chinese).
- [95] Ma X Y, Liu H F, Wang W X, et al. Rifting and extension structure of Meso-Cenozoic in East China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1983, 51(1):22-32(in Chinese).
- [96] Wan T F. Stress field of deformation structure in intraplate of Meso-Cenozoic in east China and its application[M]. Beijing:

- Geological Publishing House, 1993:12-37(in Chinese).
- [97] Xu Y G. Basaltic magmatism in the continent of stretching setting; quality and dynamics processes[M]//Geodynamics of chemistry. Beijing: Science Press, 1999: 110-167(in Chinese).
- [98] Wu F Y, Sun D Y, Zhang G L, et al. Deep geodynamics of Yanshan movement[J]. Geological Journal of China Universities, 2000,6(3):379-388(in Chinese).
- [99] Taylor B, Hoyes D E. The tectonic evolution of the south China sea[J]. Geophysical Monograph, 1980, 23: 89-104.
- [100] Tamaki K, Honza E. Global tectonics and formation of marginal basins: role of the western Pacific[J]. Episodes, 1991, 14(3):224-229.
- [101] Flower M F J, Tamaki K, Hoang M. Mantle extrusion: a model for dispersed volcanism and DUPAL-like asthenosphere in east Asia and the western Pacific[M]//Flower M F J. Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. Geophys Geodynamics Ser. 27, Washington D C: AGU, 1998:67-87.
- [102] Huang C Y, Kanyuan X, Peter B, et al. Structural evolution from paleogene extension to latest Miocene-recent arc-continent collision offshore Taiwan: comparison with on land geology[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2001, 19: 619-639.
- [103] Pan Y S. Formation and uplifting of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(3): 153-163(in Chinese).
- [104] Zhang L S, Zhong D L. The Red River strike-slip shear zone and Cenozoic tectonics of East Asia continent[J]. Scientia Geologica Sinica, 1996, 31(4):326-342(in Chinese).
- [105] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticene[J]. Geology, 1982, 7:611-616.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 李廷栋. 中国岩石圈三维结构专项研究主要进展和成果[J]. 中国地质,2006,34(4):689-699.
- [24] 曹家敏,朱介寿,吴德超. 东秦岭地区的地壳速度结构[J]. 成都理工学院学报,1994,21(1):11-17.
- [25] 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: 1-207.
- [26] 曹家敏,董颐珍. 爆炸地震研究华南地区邵阳—泉州地壳结构[G]//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.
- [27] 曹家敏,王有学. 阿尔泰—台湾剖面茂汶—邵阳段地壳结构[G]//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.
- [28] 袁学诚,左愚,蔡学林,等. 华南板块岩石圈构造与地球物理[M]//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.
- [29] 马杏垣. 解析构造学[M]. 北京:地质出版社,2004: 10-421.
- [30] 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.
- [31] 袁学诚,刘福田,徐佩芬,等. 大别山造山带的深部结构[M]//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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 张贻侠,孙云生,张兴州,等. 中国满洲里—绥芬河地学断面[M]. 北京:地质出版社,1998: 1-35.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 卢造勋,夏怀宽. 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.
- [39] 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.
- [40] 阙荣举,韩源. 云南遮放至马龙地学断面[M]. 北京:地震出版社,1992: 1-63.
- [41] 孙武城,徐杰,杨主恩,等. 上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗地

参考文献:

- [1] 张文佑. 中国及邻区海陆大地构造[M]. 北京:科学出版社, 1986: 8-575.
- [2] 马杏垣. 中国岩石圈动力学纲要——1:400万中国及邻近海域岩石圈动力学图说明书[M]. 北京:地质出版社,1987: 1-45.
- [3] 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.
- [4] 刘光鼎. 中国海域及邻域地质地球物理图集[M]. 北京:科学出版社,1993: 56-91.
- [9] 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.
- [11] 邓晋福,赵海玲,莫宣学,等. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙[M]. 北京:地质出版社,1996: 1-83.
- [13] 陈国达. 亚洲陆海壳体大地构造[M]. 长沙:湖南教育出版社,1998: 62-215.

- 学断面[M]. 北京:地震出版社,1992: 1-66.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 陈学波. 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [61] 姚伯初,Hayes D E,曾维军,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,1994:34-140.
- [62] 高德章,赵金海,薄玉玲,等. 东海重磁地震综合剖面研究[J]. 地球物理学报,2004,47(5):853-861.
- [63] 毛桐恩,刘新美,赵明,等. 地球内部层圈耦合作用研究进展[J]. 科学导报,1999,6:28-30.
- [64] 杨文采. 后板块地球内部物理学导论[M]. 北京:地质出版社,1999: 26-104.
- [65] 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[J]. 大地构造与成矿学,2003,27(4):299-310.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [70] 钟大赉,丁林,季建清,等. 中国西部新生代岩石圈汇聚和东部岩石圈离散的耦合关系与古环境格局演变的探讨[J]. 第四纪研究,2001,21(4):303-312.
- [71] 邓万明. 中国西部新生代火山活动及其大地构造背景[J]. 地学前缘,2003,10(2):471-478.
- [75] 袁学诚. 秦岭造山带地壳结构与楔入成山[J]. 地质学报,1997,71(3):227-235.
- [77] 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.
- [78] 许志琴,杨经绥,姜枚,等. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起[J]. 地学前缘,1999,6(3):139-151.
- [79] 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.
- [80] 刘训. 从新疆地质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):105-112.
- [81] 万玲,姚伯初,曾维军,等. 南海岩石圈结构与油气资源分布[J]. 中国地质,2006,33(4):874-884.
- [82] 程先琼,朱介寿,蔡学林. 全球地幔垂直流动速度研究[J]. 地球物理学报,2006,49(4):1022-1028.
- [84] 钟应先,刘援朝,蔡学林. 湖南道县玄武岩中麻粒岩包体的初步研究[J]. 成都地质学院学报,1993,20(1):56-61.
- [85] 徐夕生,蔡元峰,周新民. 中国东南部新生代岩石圈地幔研究[J]. 南京大学学报:自然科学版,2000,36(6):773-779.
- [86] 郑建平. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1999:1-124.
- [88] 周祖翼,廖宗廷,金性春,等. 冲绳海槽-弧后背景下大陆张裂的最高阶段[J]. 海洋地质与第四纪地质,2001,21(1):51-55.
- [89] 高永军,穆治国,吴世迎. 马里亚纳海槽玄武岩 K-Ar 地质年代学和地球化学研究[J]. 海洋地质与第四纪地质,2000,20(3):53-59.
- [91] 程先琼,朱介寿,蔡学林. 东亚地幔流动速度研究[J]. 中国地质,2006,33(4):896-905.
- [92] 朱介寿. 下地幔及核幔边界结构及地球动力学[J]. 地球科学进展,2000,15(2):139-142.
- [93] 蔡学林,朱介寿,曹家敏,等. 南海地区软流圈“工”字型低速异常带特征及构造意义[C]//中国地球物理学会年刊(2002). 北京:地震出版社,2002:247.
- [94] 蔡学林,朱介寿,程先琼. 南海复辟岩状地幔柱的发现及其动力学意义[C]//中国地球物理学会年刊(2005). 长春:吉林大学出版社,2005:396.
- [95] 马杏垣,刘和甫,王维襄,等. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造[J]. 地质学报,1983,57(1):22-32.
- [96] 万天丰. 中国东部中、新生代板内变形构造应力场及其应用[M]. 北京:地质出版社,1993:12-37.
- [97] 徐义刚. 拉张环境中的大陆玄武岩浆作用:性质及动力学过程[M]//化学地球动力学. 北京:科学出版社,1999:119-167.
- [98] 吴福元,孙德有,张广良,等. 论燕山运动的深部地球动力学本质[J]. 高校地质学报,2000,6(3):379-388.
- [103] 潘裕生. 青藏高原的形成与隆升[J]. 地学前缘,1999,6(3):153-163.
- [104] 张连生,钟大赉. 从红河剪切带走滑运动看东亚大陆新生代构造[J]. 地质科学,1996,31(4):326-341.