

# 中国及相邻区域岩石圈结构及动力学意义

朱介寿 蔡学林 曹家敏 严忠琼

(成都理工大学地球物理系, 四川 成都 610059)

**摘要:** 中国大陆及邻近陆域海域是晚古生代以来由多个较小的板块或地块汇聚形成的。中生代亚洲东部岩石圈拉张解体 and 减薄。古新世印度与欧亚大陆碰撞引起地壳缩短隆升, 形成青藏高原和喜马拉雅造山带。根据中国大陆及相邻区域天然地震、人工地震及其他地学资料, 采用多学科多手段进行反演。对沉积层、地壳、岩石圈特性及厚度变化进行研究, 探讨中国大陆及相邻陆域海域岩石圈结构特征及深部动力学问题。

**关键词:** 中国大陆及相邻陆域海域; 岩石圈结构模型; 地球深部动力学

**中图分类号:** P544      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2006)04-0793-11

## 1 引言

20 世纪 60 年代出现的板块构造学说, 提出了全球构造运动理论, 它将地球的外部圈层称为岩石圈, 包括了地壳 (crust) 和上地幔盖层 (lid), 是在软流圈之上的刚性层圈。大陆岩石圈由于其具有高粘滞性以及较低的温度和较小的密度, 很少受周围海洋岩石圈和地幔对流的影响。自太古宙原始陆壳形成以来, 一直漂浮在固体地球的表层不断增生, 其最长的生存期可达 30~40 亿年 (海洋岩石圈生存期仅为 2 亿年左右)。在地球数十亿年的演化中, 大陆岩石圈在地表不断运移, 相互间产生汇聚、碰撞、拼合、叠加、增厚, 或者分裂、错断、拆离、减薄以至消亡。

在不同的历史时期, 大陆岩石圈的位置、形状、内部结构及物质成分会产生很大变化, 甚至完全被其他物质置换。大陆岩石圈地幔不仅起到支撑大陆地壳漂浮的木筏作用, 由于地幔深部的过程作用, 其内部物质成分发生变化, 起到了改造大陆以至重塑大陆的作用。大陆演化的地球动力学过程发生在整个岩石圈/软流圈尺度, 深达数百千米。

亚洲大陆的拼合开始于中生代蒙古—鄂霍次克地块增生到西伯利亚地台, 随之在二叠和三叠纪期间发生了华南和华北的碰撞。晚古生代以来由多个较小的板块或地块 (主

要包括中朝、扬子、印度支那、塔里木、哈萨克斯坦、土耳其、伊朗、伊拉克) 快速汇聚。中生代以来, 亚洲东部岩石圈拉张解体, 上地幔软流圈物质上涌, 火山岩浆活动强烈, 这一大规模热事件引起强烈构造与岩浆活动、岩石圈拉张减薄, 形成东亚大陆裂谷。

古新世 (约 55 Ma) 印度大陆与欧亚大陆的碰撞, 青藏高原缩短 (2 500 km) 及隆升 (5 000 m), 冈瓦纳古陆岩石圈板片的大规模俯冲与拆沉, 青藏高原岩石圈地幔被外来克拉通物质替代, 岩石圈增厚到 140~180 km, 形成了现今地球上最高的青藏及帕米尔高原和喜马拉雅、兴都库什造山带。

在新生代, 亚洲边缘解体并先后形成了一系列小洋盆, 它们在短暂的张裂及扩张后分别闭合, 如西菲律宾海盆 (49~35 Ma), 帕里西维拉海盆 (30~15 Ma), 南海海盆 (32~17 Ma), 日本海 (25~10 Ma), 苏拉威西海 (50~35 Ma), 苏禄海 (17~12 Ma)。由于印度—澳大利亚板块向北北东方向推挤, 太平洋板块向西扩张及俯冲。西太平洋边缘海由扩张转化为挤压, 形成西太平洋的沟弧盆系。

以上事件塑造和形成了现代中国及邻近陆域与海域岩石圈构造格局。这一区域复杂的岩石圈/软流圈结构, 和地球深部 (特别是地幔部分) 的动力过程有密切关系。因此, 采用多学科、多手段研究这一区域岩石圈/软流圈细结构及物质特

收稿日期: 2005-12-27; 改稿日期: 2006-03-15

基金项目: 国土资源部重点科技专项计划项目 (20011101), 国家自然科学基金重点项目 (49734150, 40234047), 油气藏地质及开发工程国家重点实验室及地球探测与信息技术教育部重点实验室资助。

作者简介: 朱介寿, 男, 1936 年, 教授, 从事理论地球物理学及勘探地球物理研究及教学工作, 目前主要进行地球内部结构及地球物理层析成像的研究; E-mail: zhujs@cdu.edu.cn。

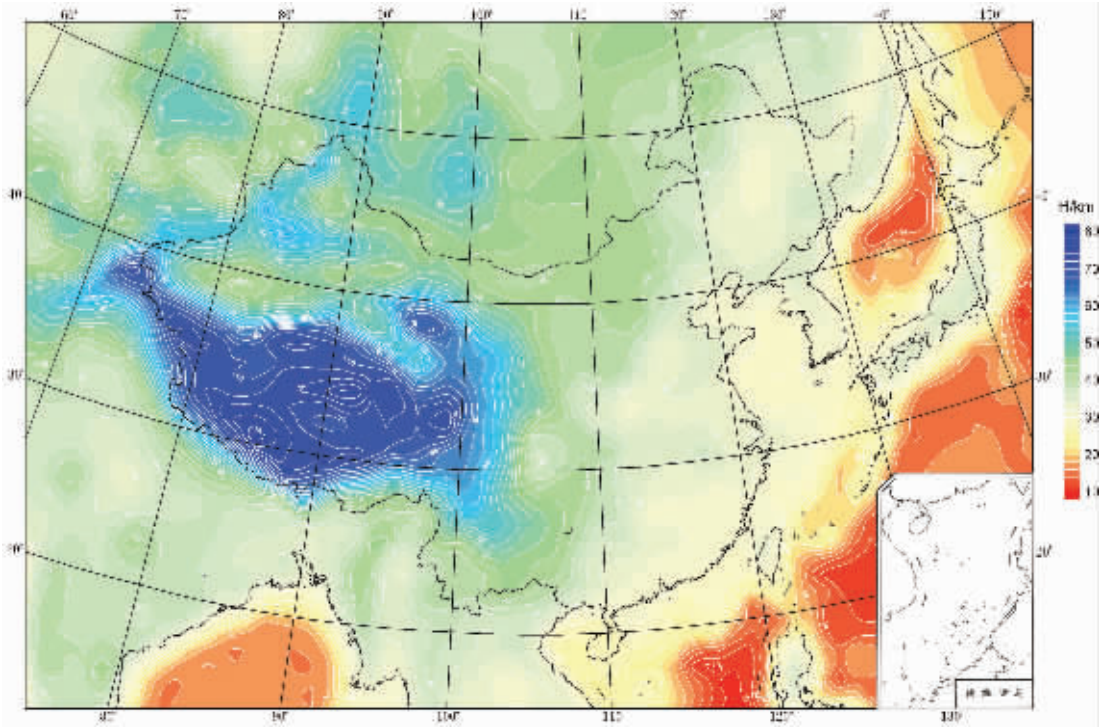


图 1 中国及邻近陆域海域地壳厚度分布图

Fig.1 Thickness distribution of the crust in continental China and its adjacent land and sea areas

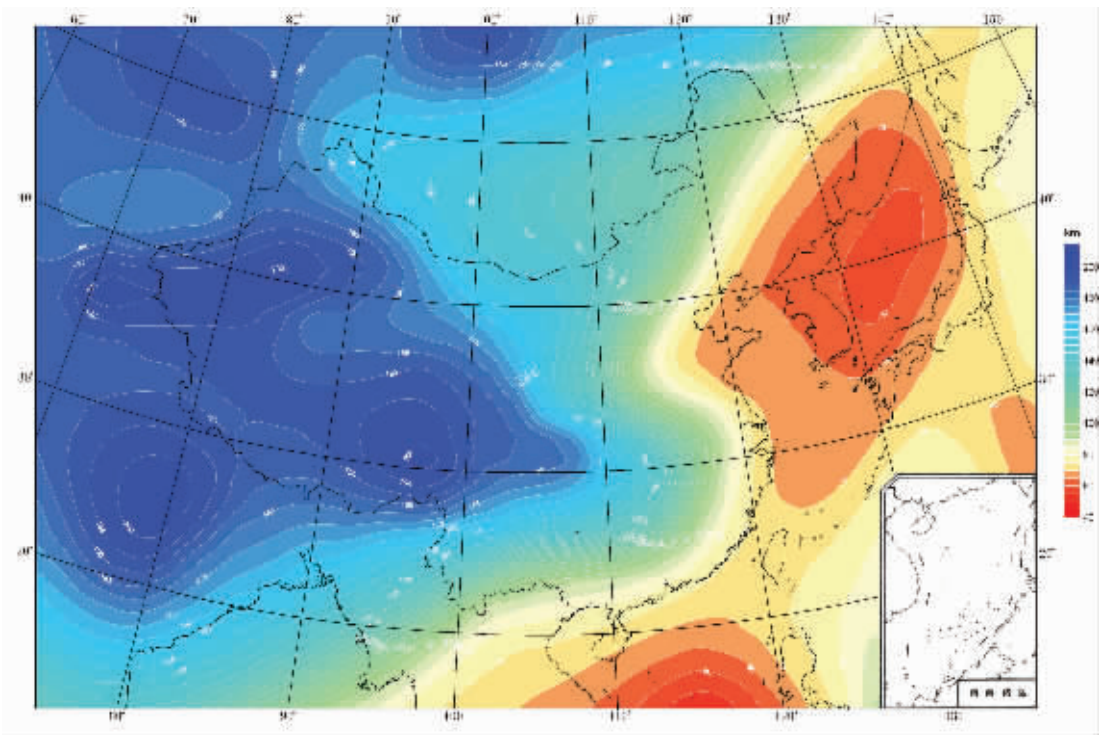


图 2 中国及邻近陆域海域岩石圈厚度分布图

Fig.2 Thickness distribution of the lithosphere in continental China and its adjacent land and sea areas

性、物理状态,建立中国及邻近陆域与海域的岩石圈/软流圈三维结构图像和数据库。对研究地幔深部过程,了解岩石圈形成及演化,地表构造与深部过程的关系有着重大的意义<sup>[1-21]</sup>。

## 2 岩石圈模型的建立

目前有关岩石圈结构的信息主要来源于地震波探测。人工地震反射法或折射法对研究地壳细结构有重要作用,用地震波对地球内部的三维层析成像建立的全球性或区域性的三维速度模型,对了解岩石圈/软流圈的横向变化和地球深部动力过程,建立地幔对流模型均起了很大作用。为了系统地研究中国大陆及相邻陆域海域的岩石圈结构,笔者进行了以下研究工作:

### (1) 人工地震测深剖面研究

利用中国及邻区超过 5 万 km 人工地震测深剖面数据(主要为中国 13 条地质大断面及 80 余条人工地震测深数据),对地壳及上地幔顶部速度结构数据进行了系统采集。结合地震—重力反演等资料和数据,获得中国及邻近地区  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  地壳基本数据,编制出该区地壳厚度(莫霍界面深度图)和各个深度的速度分布,以及地壳平均速度( $V_p$ )分布图等。

### (2) 天然地震面波层析成像研究<sup>[1]</sup>

对研究区域时间段 1982—2004 年 GSN、CDSN、DWWSN、GEOSCOPE 台网数字地震记录进行了建库。选择了研究区域 ( $0^{\circ} \sim 60^{\circ}N, 60^{\circ} \sim 140^{\circ}E$ ) 及周边震级  $7.0 \geq M_s \geq 5.0$  的 1 000 多个强震,使其射线尽可能从各个方向均匀地穿过研究区域。搜集了这些地震区的长周期地震记录约 20 000 张,从中挑选出 10 000 多个波形记录。得到周期在 8~250 s 之间 10 000 余条质量较高的面波频散曲线,这些频散曲线的大圆路径较好地覆盖了中国及邻区大陆及海洋。

通过对中国及邻区天然地震面波层析成像,对  $V_s$  速度结构进行三维反演,建立了该区从 0~400 km 不同深度  $V_s$  速度分布图,这项研究为中国及邻近地区岩石圈、软流圈结构及动力学提供了重要依据。利用上述成果建立了这一地区岩石圈厚度数据库,给出岩石圈厚度图。

## 3 地壳及岩石圈结构特征

由地壳厚度分布图(图 1)及岩石圈厚度分布图(图 2)可以看出,无论地壳及岩石圈在大陆地区均较海洋地区厚。因此可以由岩石圈厚度图大体上勾画出海陆边界。一般说来,大陆地壳厚的地区,岩石圈也较厚,但二者关系复杂,并无明显的相关性。

中国大陆及邻近区域的地壳总体为东部减薄、西部增厚。西部地壳增厚部分与新生代印度和欧亚大陆碰撞变形有密切关系。地壳最厚处以青藏高原为中心,向中亚以及兴蒙地块、贝加尔地区、东北亚延长的三角地带范围内,其最厚处可达 76~80 km,边缘区可达 40~44 km。

地壳减薄区出现于西太平洋边缘海及裂谷区,厚度仅几

到十余千米。中国大陆东部地区即大兴安岭、太行山、武陵山以东,厚度为 28~40 km。

由  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  网格统计的地壳厚度直方分布图(图 3)可见,中国大陆地壳平均深度为 47.6 km,较全球平均值 39.2 km 为高。而且在 32 km、42 km 及 70 km 处有 3 个峰值,分别代表了减薄型地壳(华北裂谷、下扬子及华夏地块等),克拉通型地壳(上扬子、鄂尔多斯、塔里木等)和增厚型地壳(青藏高原)的平均值。

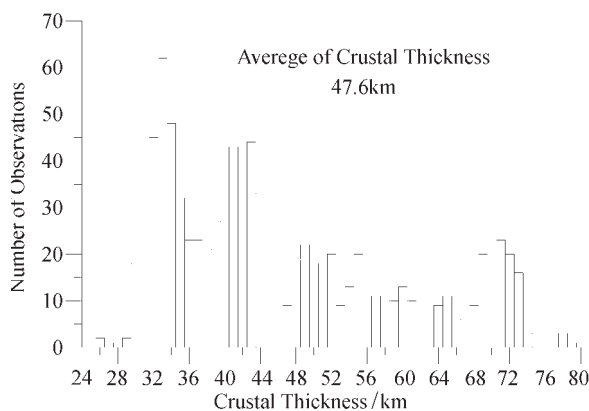


图 3 按  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  网格统计地壳厚度直方分布图

Fig.3 Histogram of the distribution of the crustal thickness on a  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  grid

从地壳及上地幔不同深度的速度分布(图 4)可见,各个不同深度的速度分布与构造分块和莫霍界面起伏有密切关系。在地壳表层(0~5 km)低速区和盆地分布有密切关系。到上地壳和中地壳(10~20 km),青藏高原及其周边区域为低速分布,华北裂谷带也显示为较低速度,华南呈较高速度。在 30~40 km 深度,东部地区已达下地壳及上地幔,呈高速分布,西部仍处于中下地壳。因此呈现出以大兴安岭、太行山至武陵山北东向的速度变化界线,东部为高速,西部为低速。但中西部克拉通地块(塔里木、上扬子、鄂尔多斯)仍呈较高速分布。到 50~60 km 深度,大陆大部分进入上地幔,而青藏高原等仍处于下地壳。因此低速带仅限于青藏高原及帕米尔、天山等地区,其余均呈高速分布。在边缘海地区,自 10 km 以下,一直为高速分布。

从地壳及上地幔按  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  网格统计的不同深度速度分布直方图(图 5),以及大陆地壳速度按  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  网格统计的直方分布图(图 5)和平均值来看。中国大陆平均速度为 6.28 km/s 比全球地壳平均速度 6.45 km/s<sup>[17]</sup>要低很多。

从地壳厚度与地壳不同深度平均速度值的比较(表 1)来看<sup>[17,18]</sup>,中国大陆地壳厚度平均值总体偏大,速度值总体偏低。这与中国大陆新生代处于剧烈变形及地壳加厚,深部流体物质加入到中下地壳内部,形成地壳内低速层有密切关系。

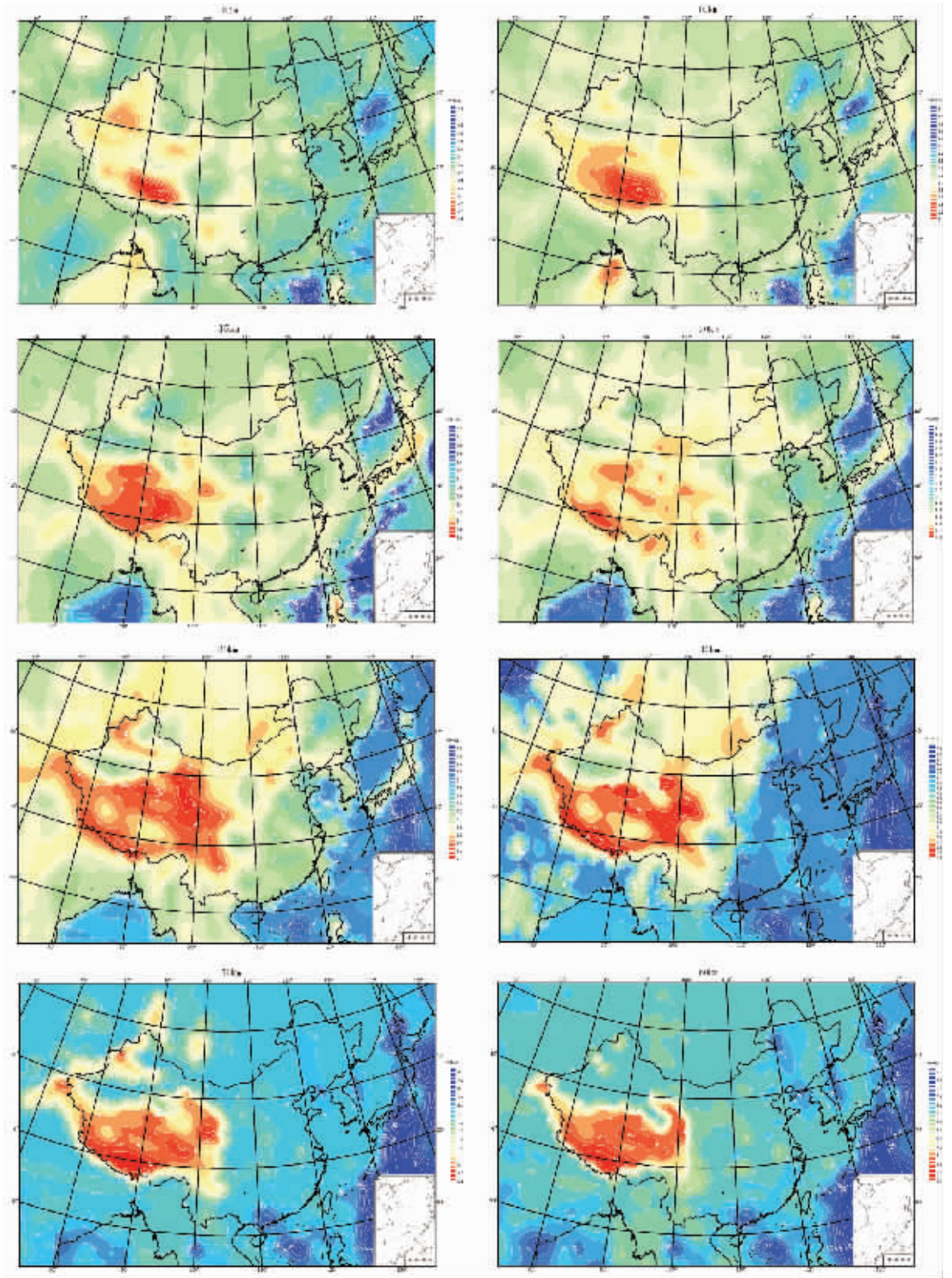


图 4 地壳上地幔不同深度速度分布图

Fig.4 Velocity distribution at various depths of the crust and upper mantle

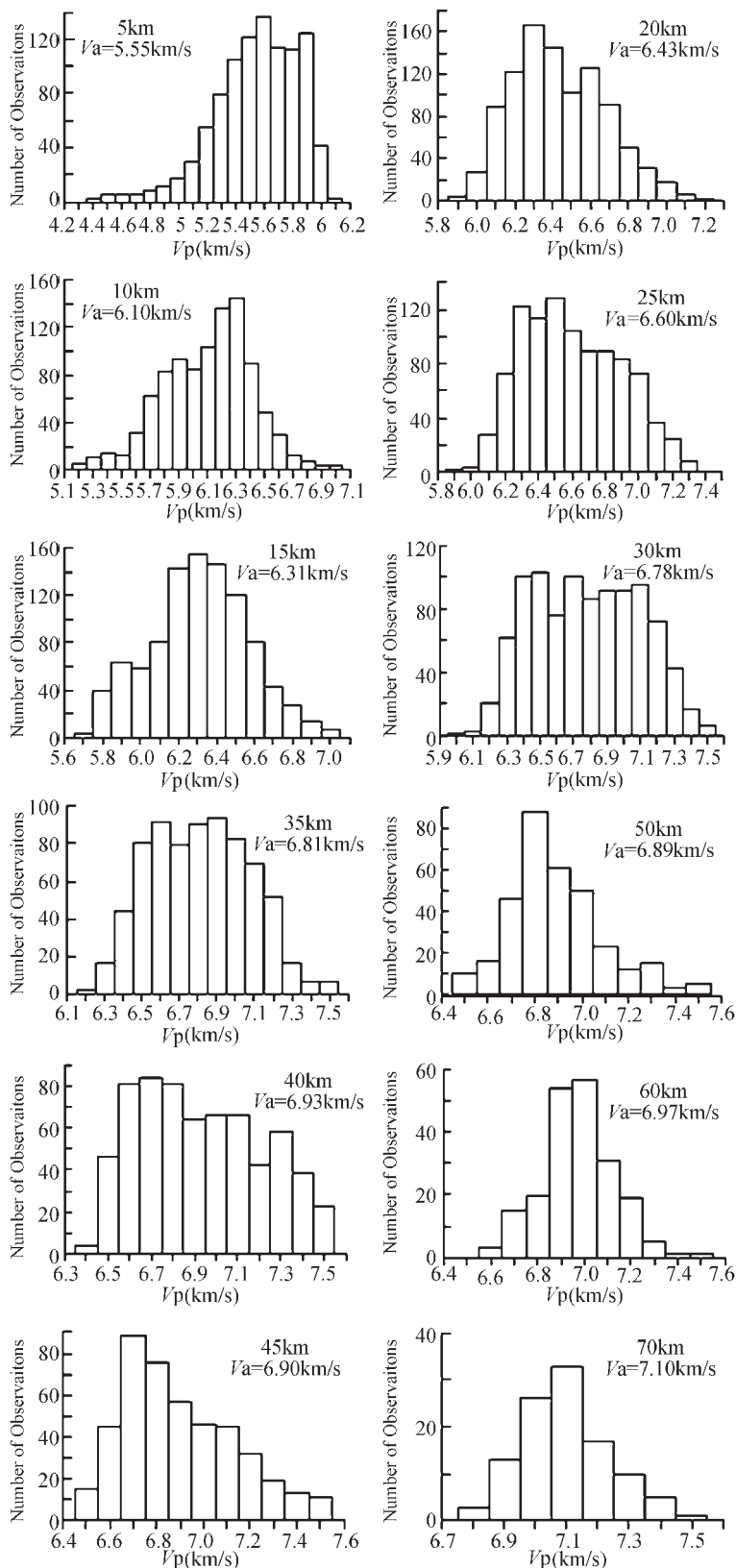


图 5 按  $1^\circ \times 1^\circ$  网格统计地壳及上地幔不同深度速度分布直方图及平均值

Fig.5 Histograms of the distribution and average values of velocities at various depths of the crust and upper mantle on a  $1^\circ \times 1^\circ$  grid

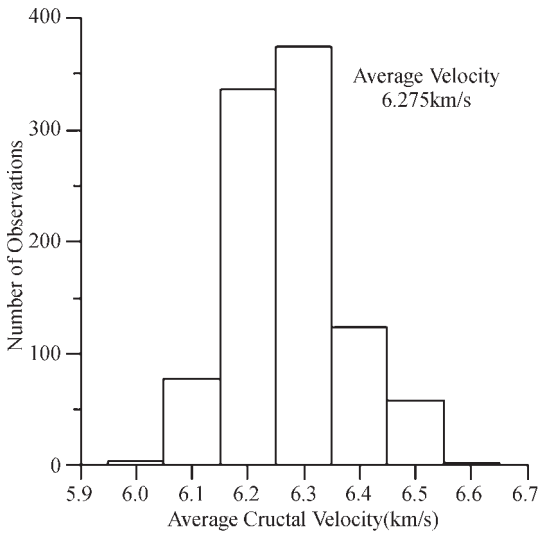


图 6 中国大陆地壳速度按  $1^\circ \times 1^\circ$  网格统计直方图及平均值

Fig.6 Histogram and average value of crustal velocity according to grid  $1^\circ \times 1^\circ$  in the crust and upper mantle in the continent of China

表 1 中国与全球大陆地壳厚度与速度平均值的对比

Table 1 Comparison of the thickness and average velocity value of the continental crust of China with those of the global continental crust

	中国平均	全球平均
地壳厚度 (km)	47.6	39.17
地壳平均速度 (km/s)	6.28	6.45
5 km 深地壳平均速度	5.55	6.05
10 km 深地壳平均速度	6.10	6.15
15 km 深地壳平均速度	6.31	6.42
20 km 深地壳平均速度	6.43	6.60
25 km 深地壳平均速度	6.60	6.71
30 km 深地壳平均速度	6.78	6.82
35 km 深地壳平均速度	6.81	6.95
40 km 深地壳平均速度	6.93	7.11
45 km 深地壳平均速度	6.90	7.24
50 km 深地壳平均速度	6.89	7.34

中国及邻近陆域海域岩石圈厚度(图 2)变化范围为 50~200 km。西太平洋边缘海及华北、华南、东海陆架地区,其厚度为 50~80 km; 中国大陆中部过渡带厚度为 80~100 km; 中西部地区厚度一般为 100~130 km; 而在大陆克拉通及岩石圈汇聚增厚区(印度、塔里木、扬子、西藏、西伯利亚、哈萨克斯坦)厚度可达 140~200 km, 岩石圈最厚地区主要分布在青藏高原东部(与扬子地块碰撞部位)、塔里木、帕米尔及印度北部,厚度达到 180~200 km。

软流圈厚度分布与岩石圈正相反。在西太平洋边缘海

及华北、华南、印度支那地区软流圈厚达 200~300 km, 在西部克拉通及岩石圈汇聚增厚区, 软流圈仅厚 40~100 km。

中国及邻近陆域海域岩石圈速度变化范围为 4.3~4.85 km/s, 相对变化值可达 12%。高值出现在太平洋板块及菲律宾滨海板块, 表明这两个海洋板块的岩石圈组成及性质与大陆及其边缘海(日本海、南海等)有显著差异。西部克拉通地区(包括印度板块、青藏地块、塔里木地块、扬子地块、哈萨克斯坦地块)及西伯利亚板块, 速度在 4.50~4.60 km/s 以上。华北、华南、东海陆架、印度支那及日本海、南海等边缘海地区, 岩石圈速度变化范围为 4.25~4.40 km/s, 具有最低值。

中国岩石圈与软流圈的结构在东西两部分有着巨大的差异。大体上以  $110^\circ\text{E}$  为界, 其以西区域主要是由印度板块与欧亚板块碰撞引起的岩石圈的汇聚与增厚区, 东部则主要是由于软流圈上涌(地幔热物质上升)引起岩石圈的拉张与减薄区。西部岩石圈比东部平均约厚 100 km。软流圈的分布正好相反, 西部地区软流圈一般不发育, 东部地区软流圈厚度平均比西部厚 100~120 km。按岩石圈及软流圈结构特征可分为 3 个不同区域:

(1) 东部岩石圈拉张减薄区: 位于大兴安岭、太行山、雪峰山以东区域, 包括西太平洋边缘海及大陆东部华北、华南、黄海、东海大陆架地区, 南海地区, 以及东北松辽盆地, 吉黑地块等。边缘海及大陆边缘为岩石圈强减薄区(60~80 km), 其余为弱减薄区(80~100 km), 又可称为东亚裂谷带。

(2) 中西部岩石圈稳定区: 上述界线以西区域, 其西界及北界为青藏高原以北的昆仑山, 阿尔金至祁连山、西秦岭、龙门山、攀西至滇中一线。主要包括上扬子地块、塔里木地块、准噶尔地块、吐哈地块、阿拉善地块、鄂尔多斯地块。为一系列克拉通地块, 元古宙以来很少变形, 岩石圈厚度为 120~180 km。

(3) 青藏高原岩石圈汇聚增厚区: 以青藏高原为主体的独立地块, 内部主要有以下若干独立地体: 喜马拉雅地块、拉萨地块、羌塘地块、巴颜喀拉地块、柴达木地块等。新生代以来岩石圈剧烈变形增厚, 厚度达 140~200 km。

东西两部分岩石圈的速度结构亦有明显差异。西部地区岩石圈的剪切波速度  $V_s$  比东部要高 0.2~0.25 km/s, 而西部软流圈速度  $V_s$  比东部要高 0.15 km/s 左右。影响地幔深部地震波速度变化的主要因素是温压状态的不同, 其次为化学成分的差异。若以东西两部分岩石圈剪切波速度  $V_s$  值差异 0.2 km/s 计, 则其压缩波速度  $V_p$  值相差约 0.36 km/s(地幔部分取  $V_p/V_s \approx 1.83$ )。据岩石高温高压实验得知, 在地幔压力条件下, 当岩石温度增加  $100^\circ\text{C}$  时, 其地震波  $V_p$  值约减小 0.1 km/s。这意味着东亚西太平洋边缘海的东西两部分岩石圈温度相差可达到  $360^\circ\text{C}$  左右。即东部岩石圈下部的温度比西部要高出  $360^\circ\text{C}$ <sup>[9-10]</sup>。

#### 4 东亚巨型裂谷及青藏高原的形成及演化

从鄂霍次克海、千岛海盆, 经日本海及中国东北、华北

(及东海陆架)、华南地区、冲绳海沟,到南海、菲律宾海,在此 85~250 km 深度出现巨型上地幔低速异常带(长约 8 000 km,宽 2 500~4 000 km),一般称为东亚西太平洋边缘海巨型低速带。这一低速带与东太平洋边缘板块俯冲带的上地幔速度结构特征不同,却与太平洋中隆、大西洋中脊和印度洋中脊的岩石圈速度结构特征十分相似。全球 S 波速度成像显示,东亚西太平洋边缘海巨型低速带比大西洋中脊低速带规模大得多,而且速度更低,称为东亚巨型裂谷系。幔源岩石包体成分与地球化学研究显示,亚洲东部存在的华北太古宙岩石圈地幔和华南元古宙岩石圈地幔,已被年青的、富集地幔 EM1、EM2 所代替。根据古地理及古地磁资料研究,东亚大陆巨型裂谷体系动力学演化大致可划分为以下几个演化阶段:

(1)古东亚大陆及陆内造山带形成阶段(250~150 Ma)。古生代末至中生代早期印支运动在南北向挤压动力作用下,最终完成华北地块与西伯利亚地块,扬子地块与华北地块,华南地块与扬子地块,印支地块与扬子地块等的碰撞,拼合为一个整体,构成欧亚板块构造的一部分,形成了以近东西向构造线为主导的陆内造山带及古东亚大陆,因此,印支运动是亚洲乃至全球一次极重要的构造运动。

(2)东亚大陆边缘裂谷系形成阶段(150~55 Ma)。经过一段时间相对稳定的构造演化之后,到中生代中期晚侏罗世开始的燕山运动,岩石圈由相对稳定转向强烈活化,地球动力学体制发生了根本的转变,由以南北向主压应力场为主的挤压变形,转向以近东西向为主的岩石圈伸展变形,引起东亚在陆边缘岩石圈强烈拆沉减薄,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,在亚洲东部形成巨量花岗岩浆侵入和巨大的岩浆喷发活动,并伴随大规模的成矿作用。形成一系列北北东向大陆伸展裂陷盆地和陆缘裂谷系,以及西太平洋古陆的裂解和沉陷。

(3)东亚大陆边缘伸展海盆形成阶段(55~15 Ma)。从始新世开始,在近东西向大规模伸展裂陷作用下,东亚大陆继续发育北北东向陆内裂谷系外,东亚大陆边缘开始发育伸展裂陷海盆地,到渐新世(32~30 Ma)海底扩张达到高潮,估算其伸展距离达 800~1 300 km。边缘海部分陆壳转变为洋壳,同时发育洋中脊,如南海中央海盆在渐新世—早中新世末(32~17 Ma)发生海底扩张。千岛海盆扩张期为 30~15 Ma,日本海盆扩张期为 28~15 Ma。随后,由于周边动力学从伸展转向挤压动力学环境,这些海盆在 17~15 Ma 以来停止扩张,因而未能将所有海盆和洋中脊联通,这是与现今型的大洋洋中脊最大的差异所在。

(4)东亚西太平洋大陆裂谷、边缘海与沟弧体系叠加形成阶段(15 Ma 至今)。新生代中晚期以来,除整体近东西向伸展变形外,还受太平洋板块、菲律宾海板块向欧亚板块挤压俯冲碰撞和澳大利亚板块向欧亚板块俯冲碰撞,最终形成和发育了现今的大陆裂谷、边缘海及其沟弧体系。经过上述构造演化形成现今东亚大陆至西太平洋间大陆裂谷、边缘海与沟弧体系构造格局,并叠加在东亚大陆裂谷体系上。

青藏高原是古生代以来多个地体拼合形成的复杂造山带。新生代由于印度板块的碰撞挤压,青藏高原岩石圈经受了巨大的变化改造,虽已拼合为一个整体,但其地表及地壳、上地幔深部形态和物质特性仍然是十分不均匀的。

新生代印度与欧亚大陆的碰撞,增厚的岩石圈(达 140~180 km)大陆根在青藏高原及中亚地区形成。印度次大陆岩石圈板片以低角度下插到青藏高原之下,岩石圈缩短了约 2 500 km,岩石圈缩短增厚的主要方式为分层楔入及叠加。青藏高原岩石圈地幔具有刚性的克拉通性质(温度较低、变形较小),在面波层析图上呈高速分布。相反,高原隆升使地壳内部物质发生剧烈形变,并伴有部分熔融及流动现象,在面波层析图上呈极低速分布。

由地震面波层析成像给出了印度板块岩石圈地幔俯冲至青藏高原深部的位置,东经 76°一线在北纬 41°与亚洲板块岩石圈地幔碰撞,东经 86°一线在北纬 36°碰撞,东经 90°一线在北纬 34°碰撞,这表明印度大陆岩石圈地幔已俯冲到青藏高原内部金沙江缝合线一带。

羌塘高原具有厚地壳(达 80 km),地壳内地育低速层,薄的岩石圈地幔(厚 30~40 km)和厚的软流圈。羌塘高原地壳下部呈现高温和局部熔融(推测可达 1 340 °C)。根据人工地震测得资料,发现班公湖—怒江以北的羌塘地块下地壳(深度为 60~80 km)有速度达 7.4 km/s 的壳幔物质混合带,而雅江以南等地区未发现这一混合层。大地电磁测深发现羌塘地壳至上地幔一直呈低阻,推测是温度升高引起的壳幔物质局部熔融所致。

## 5 地壳中沉积层厚度及沉积盆地

20 世纪 50 年代以来,中国广泛开展了区域地质调查和沉积盆地的油气勘探,获得了十分丰富的沉积岩层厚度与沉积基底埋深数据。为编制中国及邻近陆海地区沉积层底面埋深等厚度图提供了依据。

沉积层厚度主体包括沉积岩、火山—沉积岩系、部分浅变质—沉积岩系和第四系松散沉积物厚度的总和。按不同构造单元(沉积盆地、造山带、海洋沉积)采集沉积层厚度数据,其次,按 1°×1°结点读出其沉积厚度数据。对变质岩或岩浆岩区,则沉积岩层厚度为 0。本次研究工作按 1°×1°采集的数据共计 4 536 组数据,从而完成沉积层厚度图的编制(图 7)。

中国大陆及邻区范围内沉积岩层,主要分布在大陆克拉通盆地及其叠复的前陆沉积盆地、大陆裂谷沉积盆地、碰撞造山带后期的沉积盆地以及大陆与大洋过渡带的边缘海或海底扇中。

上扬子和塔里木克拉通沉积盆地内,沉积层厚度通常在 2.5~5.0 km。叠加其上的前陆沉积盆地,沉积层厚度巨大,例如塔西南前陆沉积盆地沉积层最厚可达 16.4 km,准噶尔南部前陆沉积盆地沉积层最厚达 14 km。在伸展陆内裂谷沉积盆地中,沉积层厚度一般比前陆沉积盆地小,松辽沉积盆地

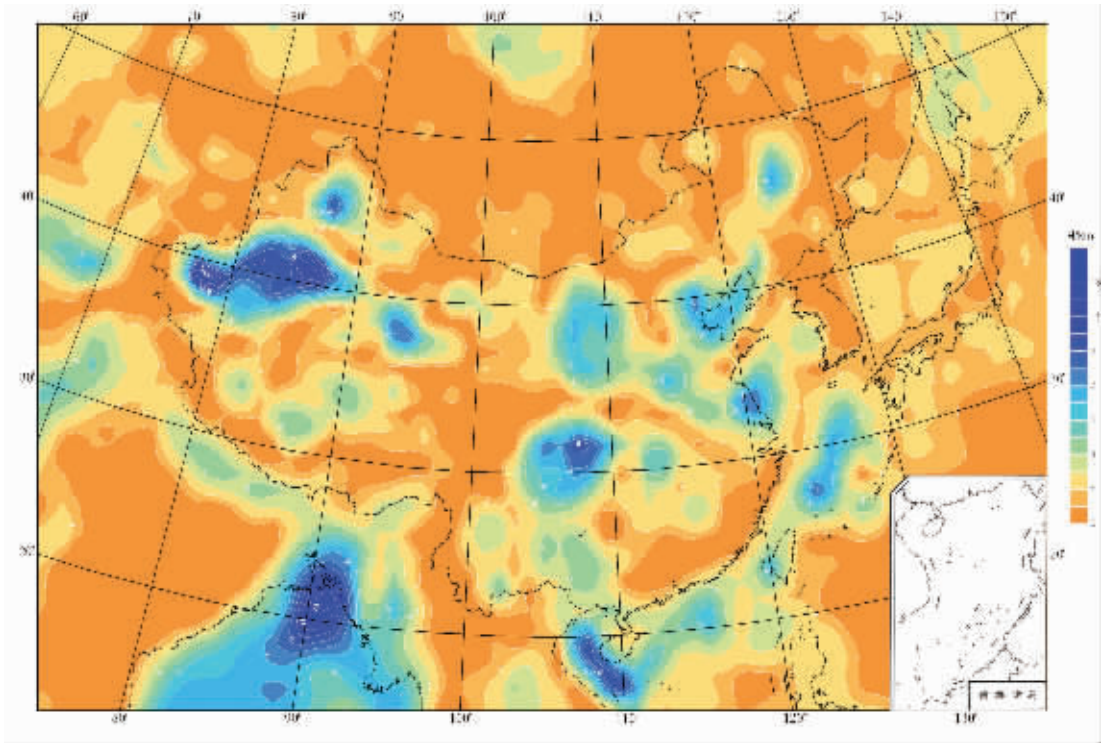


图7 中国及邻近陆域海域沉积层厚度图

Fig.7 Thickness of sediment layers in continental China and its adjacent land and sea areas

沉积层最厚仅有 9.5 km, 华北沉积盆地沉积层最厚达 11.2 km, 苏北沉积盆地沉积层最厚达 11.1 km。在高原内部, 由于强烈差异隆升, 形成巨厚的沉积层, 例如, 柴达木沉积盆地沉积层厚达 17 km, 是中国大陆内部沉积层最厚的地区之一, 羌塘盆地沉积层厚达 9.5 km。

在大陆边缘海中发育众多中生代裂陷沉积盆地, 中生代沉积层厚度多在 8~10 km, 其中东海陆架沉积盆地面积最大, 分布面积 25 万 km<sup>2</sup>, 沉积层厚度达 13 km, 莺歌海沉积盆地分布面积仅有 58.5 万 km<sup>2</sup>, 但沉积层厚度最大, 高达 14.5 km 以上, 它是世界上典型的快速沉降, 快速沉积, 高地温梯度和高压梯度热能型沉积盆地。渤海湾沉积盆地沉积层厚达 10.5 km。总之, 大陆边缘海中的裂陷盆地沉积盆地沉积层巨大厚度为油气形成提供了必要条件。

印度次大陆边缘发育两大深海沉积扇: 孟加拉扇和印度河扇, 它们是古近纪晚期以来喜马拉雅山脉上升剥蚀的产物, 对研究青藏高原隆升和气候变化有重要意义。孟加拉扇是世界上最大的长形深海扇, 沉积层最厚达 15 km。印度河扇较孟加拉扇小, 沉积层厚度在 5.5 km 以上。

在南海西南海盆内。沉积厚度变化较大, 局部凹陷和凸起多呈东北—西南向, 与海盆总体方向一致, 局部凹陷的沉积厚度较小, 一般在 1.0~1.5 km, 个别厚达 3 km 左右, 局部凸起的沉积厚度一般在 0.5 km 左右, 有的裸露海底构成海丘

及海山延伸。在南海中央海盆内, 基底由南、北两侧向中部逐渐抬升, 沉积层厚度逐渐减薄, 一般由 2 km 减小到 0.5 km, 中部海山沉积层厚度几乎为零。

通过沉积盆地、沉积层厚度、沉积体系、岩石圈结构与油气资源关系研究, 发现油气田多分布在强减薄型岩石圈伸展裂陷盆地和碰撞造山带边缘前陆沉积盆地中, 这一认识对油气寻找有一定指导意义。

## 6 岩石圈分区的地球动力学意义

东亚及西太平洋边缘海岩石圈是由多个微板块或块体拼合而成, 在中新生代又经过巨大的演变, 因此呈现出多种结构型式。就岩石圈厚度而言, 可分为以下几个特征区:

(1) 南亚厚岩石圈区: 包括印度次大陆及部分东印度洋的岩石圈, 这是冈瓦纳古陆向北漂移的克拉通地块, 岩石圈厚且速度高, 软流圈不明显。

印度岩石圈板块的陆内俯冲; 地震面波层析成像显示, 青藏高原的岩石圈厚度为 140~180 km。印度陆块的岩石圈板片向青藏高原下部拆沉俯冲, 板片的前缘已达班公湖—怒江缝合带。

(2) 青藏高原岩石圈汇聚增厚区: 这是印度板块与欧亚板块碰撞汇聚的增厚区。青藏高原为主体的独立地块, 内部有若干较小地块: 喜马拉雅地块、拉萨地块、羌塘地块、巴颜



喀拉地块、柴达木地块等。新生代以来岩石圈剧烈变形增厚。

(3) 中亚、中国西北和华南岩石圈稳定区: 位于帕米尔、昆仑山、阿尔金山、祁连山、西秦岭、龙门山、攀西至滇中以北及以东地区, 为一系列较稳定的克拉通地块, 主要包括哈萨克斯坦板块、塔里木地块、准噶尔地块、吐哈地块、阿拉善地块、上扬子地块、鄂尔多斯地块等。

(4) 东亚大陆边缘岩石圈拉张减薄区: 位于大兴安岭、太行山、三峡、雪峰山以东区域, 包括东北、华北、华南东南缘的大陆裂谷带及黄海、东海大陆架地区, 又称为东亚裂谷带。

(5) 西太平洋边缘海薄岩石圈区: 从鄂霍次克海, 经日本海、冲绳海槽、南海、菲律宾海, 存在一条长约 8 000 km, 宽 2 500~4 000 km 的巨型上地幔低速带, 其速度特征与大西洋中脊、印度洋中脊和东太平洋中隆的上地幔低速带相同, 东亚西太平洋边缘海低速带是新生代欧亚大陆东缘岩石圈张裂减薄, 陆块分离软流层上涌形成的。

根据以上特点可将中国岩石圈的动力学过程及演化特征讨论如下:

(1) 稳定的克拉通型岩石圈, 太古—元古宙已形成大陆, 显生宙稳定发展的岩石圈称为克拉通型结构型式。以塔里木地块和上扬子地块为代表, 克拉通型地壳及岩石圈均较厚, 地壳内低速层不发育, 叠置其上的克拉通沉积盆地属中生代挤压型沉积盆地。一般岩石圈具有 140~200 km 的厚度。其主要特征是岩石圈物质基本保持原状, 未发生物质置换和强烈变形。

(2) 陆陆碰撞强烈变形、岩石圈地幔被置换的增厚型岩石圈结构: 增厚型岩石圈结构是在构造演化过程中逐渐增厚的, 青藏高原是增厚型岩石圈结构的典型地区。青藏高原地壳厚度巨大, 地壳平均厚度在 60~75 km, 在藏南最大达 80 km。高原地壳物质为沉积浅变质褶皱——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。

青藏高原是新生代印度板块与欧亚板块陆陆碰撞的结果, 已得到地质学界公认, 但对其机制却有两种不同的见解。以 Tapponnier 为首提出了“挤出说”或“逃逸说”的运动学模式, 与此相反, England 及 Molnar 等提出了另一种动力学模式, 认为欧亚大陆岩石圈作为连续粘滞性介质, 受到印度陆块挤压, 不会发生大规模块体滑移, 而是缩短与增厚。后一模式最近得到了新的验证。

(3) 地幔物质上涌、岩石圈地幔物质被取代的减薄型岩石圈结构: 大兴安岭—太行山—武陵山以东地区属减薄型结构型式。在大兴安岭—太行山—武陵山以东地区, 由于地幔热物质在中生代以来上涌, 引起岩石圈地幔物质完全被新的物质取代, 原有的克拉通型地幔物质部分完全消失, 岩石圈变薄(仅 70~100 km), 软流圈增厚(达 150~200 km)。热物质上涌引起普遍分散的火山活动及岩浆活动, 原有地壳部分也有新物质加入并发生强烈变形和变质作用, 整个岩石圈得到改造重建。地壳也相应减薄, 如松辽裂谷带地壳厚度为 32 km, 赣湘桂构造带 32 km, 华夏地块 30 km, 华北裂谷

带地壳厚度为 31 km。

## 7 结 论

(1) 利用中国大陆人工地震剖面数据, 可以得到地壳速度特别是莫霍界面深度资料, 编制了地壳厚度图。对中国大陆及邻近陆域海域地震波高分辨率层析成像, 根据  $V_s$  波速度分布划分出岩石圈地幔及软流圈的空间分布, 编绘了岩石圈厚度图。广泛收集有关地质及地球物理资料, 编出地壳内沉积层厚度图。这 3 种不同深度层次的图像, 为研究岩石圈的结构和地球动力过程提供了有力的依据。

(2) 一般而言, 大陆地壳和岩石圈厚度都较周边海洋及边缘海地区要厚, 显示大陆岩石圈与海洋岩石圈性质不同。大陆地区地壳厚度与岩石圈厚度关系较为复杂, 二者并无明显的相关性, 这主要与岩石圈的历史演化特别是中生代以来深部动力过程有关。其中典型的是东亚地区的地幔物质上涌引起岩石圈急剧减薄, 但地壳厚度变化较小。印度岩石圈板片向青藏高原折沉俯冲, 引起的地壳和岩石圈同时增厚。在西西伯利亚及西伯利亚地区, 由于在地质历史中很少变形, 地壳达到均衡补偿, 地壳较薄(34~40 km), 莫霍界面平坦但岩石圈十分巨厚(达 180 km)。

(3) 中国大陆及相邻陆域海域岩石圈是由多个微板块或块体拼合而成, 因此呈现出多种结构型式。就岩石圈和地壳厚度而言, 可分为以下几个特征区:

① 东部岩石圈拉张减薄区。位于大兴安岭、太行山、三峡、雪峰山以东区域, 包括西太平洋边缘海及大陆东部边缘、黄海、东海大陆架地区, 南海地区, 以及东北松辽盆地、吉黑地块等, 又可称为东亚裂谷带。

② 中西部岩石圈稳定区。上述界线以西区域, 其西界及北界为青藏高原以北的昆仑山, 阿尔金至祁连山、西秦岭、龙门山、攀西至滇中一线。主要包括上扬子地块、塔里木地块、准噶尔地块、吐哈地块、阿拉善地块、鄂尔多斯地块, 为一系列较稳定的克拉通地块。

③ 青藏高原岩石圈汇聚增厚区。以青藏高原为主体的独立地块, 内部有若干较小地块: 喜马拉雅地块、拉萨地块、羌塘地块、巴颜喀拉地块、柴达木地块等。新生代以来岩石圈剧烈变形增厚。

(4) 中国大陆东缘及边缘海称为东亚巨型裂谷系, 是中生代以来大陆岩石圈张裂演化形成的。而青藏高原是新生代由于印度与欧亚大陆的碰撞挤压的产物。中国及相邻区域现今的岩石圈结构, 都是中生代以来地球深部动力作用的结果。事实表明, 地壳和岩石圈的减薄和增厚, 可以在较短的地质历史时期完成。现今世界上独一无二的青藏高原的高原地貌、巨厚的地壳、增厚的岩石圈, 大约是在几百万到一千万年形成的。

(5) 中国大陆及邻区范围内沉积岩层, 主要分布在大陆克拉通盆地及其叠复的前陆沉积盆地、大陆裂谷沉积盆地、

碰撞造山带后期的沉积盆地,以及大陆与大洋过渡带的边缘海或海底沉积扇中。其厚度分布与新生代以来地壳、岩石圈的动力过程有密切关系。

### 参考文献(References):

- [1] 洪学海,朱介寿,曹家敏,等. 中国大陆地壳上地幔 S 波品质因子三维层析成像[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5):642~651.  
Hong Xuehai, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Tomography of the 3-D S-wave quality factor of the crust and upper mantle in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(5):642~651 (in Chinese with English abstract).
- [2] 刘光鼎主编. 中国海区及邻域地质地球物理特征[M]. 北京:科学出版社, 1992.  
Liu Guangding (ed.). The Geological and Geophysical Characteristics in Seas of China and Adjacent Areas [M]. Beijing: Sciences Press, 1992 (in Chinese).
- [3] 宋仲和, 陈国英, 安昌强, 等. 中国大陆及其海域地壳-上地幔三维速度结构[J]. 中国科学(B), 1993, 23(2):180~188.  
Song Zhonghe, Chen Guoyin, An Changqiang, et al. The 3-D structure of crust and mantle in Continental China and adjacent seas [J]. Science in China (B), 1993, 23(2):180~188 (in Chinese).
- [4] 袁学诚主编. 中国地球物理图集[M]. 北京:地质出版社, 1996.  
Yuan Xuecheng (ed.). Atlas of Geophysical Maps of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996 (in Chinese).
- [5] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 从全球看中国大地构造[A]. 中国及邻区大地构造图简要说明[C]. 北京:地质出版社, 1999.  
Ren Jishun, Wang Zuoxun, Chen Bingwei, et al. The tectonics of China from a global view [A]. A Guide to the Tectonic Map of China and Adjacent Regions [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1999 (in Chinese).
- [6] 滕吉文, 胡家富, 张中杰. 中国西北地区岩石层瑞利波三维速度结构与沉积盆地 [J]. 地球物理学报, 1995, 38 (6):737~749 (in Chinese).  
Teng Jiwen, Hu Jiafu, Zhang Zhongjie. The 3-D structure of Rayleigh wave and sedimentary basins in the northwest China [J]. Chinese J. Geophys. 1995, 38 (6):737~749 (in Chinese with English abstract).
- [7] 徐果明, 李光品, 王善恩, 等. 用瑞利面波资料反演中国大陆东部地壳上地幔横波速度的三维构造 [J]. 地球物理学报, 2000, 43(3): 366~375.  
Xu Guoming, Li Guangpin, Wang Shanen, et al. The 3-D structure of shear waves in the crust and mantle of east continental China inverted by Rayleigh wave data [J]. Chinese J. Geophys. 2000, 43(3):366~375 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张禹慎, 马石庄. 全球地震面波相速度变化及其大地构造学意义 [J]. 地球物理学报, 1997, 40(2): 181~192.  
Zhang Yushen, Ma Shizhuang. Global surface wave phase velocity variations and their tectonic implications [J]. Chinese J. Geophys. 1997, 40(2):181~192 (in Chinese with English abstract).
- [9] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 曹小林. 东亚及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 sea [J]. Chinese J. Geophys., 2002, 45(5):679~698 (in Chinese with English abstract).
- [10] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 中国及邻近陆域海域地球内部三维结构及动力学研究 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(4):497~503.  
Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Cai Xuelin, et al. Study for three-dimensional structure of earth interior and geodynamics in China and adjacent land and sea regions [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4):497~503 (in Chinese with English abstract).
- [11] Ekstrom G. Mapping the lithosphere and asthenosphere with surface waves: Lateral structure and anisotropy[A]. In: The History and Dynamics of Global Plate Motions [C]. Geophys. Monogr, Ser vol. 121, edited by M. A. Richards, R. G. Gordon, and R. D. van der Hilst, pp. 277~288, AGU, Washington, D. C., 2000.
- [12] Feng C C, Teng T L. Three-dimensional crust and upper mantle structure of the Eurasian Continent [J]. J. Geophys. Res., 1983, 88: 2261~2273.
- [13] Friederich W. The S-velocity structure of the East Asian mantle from inversion of shear and surface waveforms [J]. Geophys. J. Int., 2003, 153, 88~102.
- [14] Huang Z, Su W, Peng Y, et al. Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions [J]. J. Geophys. Res., 2003, 108(B2): 2073.
- [15] Laske G, Masters G, Reif C. CRUST 2.0: A new global crustal model at 2x2 degrees, <http://mah. Ucsd. Edu/Gabi/rem.html>, 2001.
- [16] Lebedev S, Nolet G. Upper mantle beneath Southeast Asia from S velocity tomography [J]. J. Geophys. Res., 2003, 108, (B1): 2048~2073.
- [17] Mooney W D, Laske G, Masters T G. Crust 5.1: A global crustal model at 5°x5° [J]. J. Geophys. Res., 1998. 103(B1), 727~747.
- [18] Nicolas I C, Mooney W D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view [J]. JGR. 1995, 100(B7): 9761~9788.
- [19] Rangin C, Silver E A, Tamaki K. Rupture of the Oceanic crust and the emplacement of ophiolites [A]. In: Active Margins and Marginal Basins of the Western Pacific [C]. Geophysical Monograph 1995, 88: 405~417.
- [20] Richard W C, Pearson D G, James D E. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle [J]. Reviews of Geophysics, 2005, 43: 1~24, RG1001.
- [21] Ritzwoller M H, Levshin A L. Eurasian surface wave tomography: group velocities [J]. JGR. 103 (B3), 1998. 4839~4878.

## Lithospheric structure and geodynamics in China and its adjacent areas

ZHU Jie-shou, CAI Xue-lin, CAO Jia-min, YAN Zhong-qiong

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

**Abstract:** The continent of China and its adjacent land and sea areas were formed by convergence of a number of small plates and blocks since the Late Paleozoic. In the Mesozoic, in eastern Asia the lithosphere underwent extension, breakup and thinning and the asthenosphere upwelled, forming a giant rift system; whereas in western Asia India-Eurasia collision in the Paleocene resulted in crustal shortening and uplift, forming the Qinghai-Tibet Plateau and Himalaya orogenic belt. Data of seismic and explosion seismic surveys and other geoscience data obtained from continental China and its adjacent areas have been inverted by multidisciplinary means. The changes in characteristics and thickness of the lithosphere, crust and sediment layers have been studied and a series of maps compiled to discuss the characteristics and geodynamics of the lithosphere beneath continental China and its land and sea areas.

**Key words:** continental China and its adjacent land and sea areas; lithospheric structure model; geodynamics of the Earth's deep interior

---

**About the first author:** ZHU Jie-shou, born in 1936, professor of geophysics, mainly engages in the study and teaching of theoretical and explorational geophysics; his present research interests are the structure of the Earth's interior and geophysical tomography; E-mail: zhujs@cdut.edu.cn.