

欧亚大陆及边缘海岩石圈的结构特性

朱介寿

成都理工大学, 四川 成都 610059

Zhu Jieshou

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Zhu Jieshou. The structural characteristics of lithosphere in the continent of Eurasia and its marginal seas, *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(3): 001-020

Abstract: The continent of Eurasia and its surrounding marginal seas are assembled by more than thirty plates and blocks with different scales, characteristics, and different ages. These plates and blocks were formed through drifting, converging, separating, colliding, and accreting throughout much of Earth's history, finally resulting in the present assembled plate of Eurasia. The plates and blocks in Eurasia and its surrounding marginal seas can be divided into six types: (1) large Precambrian cratonic plates or shields; (2) small Precambrian cratonic plates or blocks; (3) Phanerozoic orogens; (4) continent-continent collisional orogens; (5) Neozoic marginal sea basins; (6) continental rift basins. High-resolution surface wave tomographic images indicate that the velocity characteristics of the lithosphere and asthenosphere are quite similar for the same type of plates or blocks. However, the velocity characteristics are different for different types of plates or blocks. The lateral changes in velocity for different plates or blocks decrease to the depth of 400 km and beyond. In general, Precambrian cratonic shields show high velocity, huge thickness and do not have an asthenosphere zone. On the other hand, marginal seas, rift systems and orogens show lower velocity and have thick asthenospheric zones. We collected all three-dimensional images and explosion seismic data of both crust and lithosphere in Eurasia, and constructed a model of the lithosphere in Eurasia and its surrounding marginal seas. We discuss the structure and the characteristics of lithosphere in detail.

Key words: Eurasia; lithosphere plates and blocks; high resolution surface wave tomographic images; velocity distribution in lithosphere; model of lithosphere structure

摘 要: 欧亚大陆及其边缘海地区是由约 30 多块尺度不同、形成时代和性质各异的板块或地块拼合而成。这些岩石圈板块或地块经过长时间的漂移, 多次聚合与分离, 碰撞与增生, 在新生代最后形成现代的拼合欧亚大陆。欧亚大陆及其边缘海的板块或地块可以分为以下六类: (1) 前寒武纪巨型克拉通地块及地盾; (2) 前寒武纪小型克拉通地块及板块; (3) 显生宙造山带及汇聚地块; (4) 陆陆碰撞型地块及造山带; (5) 新生代边缘海海盆; (6) 大陆裂谷盆地及增生地块。高分辨率地震面波层析成像, 显示同一类型的板块或地块的岩石圈和软流圈的速度结构十分相似, 呈现出其独有的速度分布特征。不同类型板块或地块的速度结构有重大差异。直到 400 km 深度, 各个板块和地块的横向差异才逐渐减小。一般而言, 前寒武纪克拉通板块及地块的岩石圈巨厚具有高速性质、软流圈很薄或不存在; 边缘海、造山带等区域岩石圈较薄和速度较低, 软流圈发育。根据欧亚

收稿日期: 2007-04-19; 修回日期: 2007-05-14

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40234047, 49734150, 40474032); 高校博士点学科基金项目(20050616001); 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项目

作者简介: 朱介寿(1936—), 男, 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, 目前主要进行深部地球物理及地球物理层析成像研究。

大陆及边缘海地区天然地震层析成像,人工地震剖面数据及其他有关资料,建立了欧亚大陆及其边缘海岩石圈模型。

关键词:欧亚大陆;拼合的岩石圈板块或地块;高分辨率地震面波层析成像;岩石圈板块速度分布;欧亚大陆及边缘海岩石圈模型

中图分类号:P54;P31 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2007)03-0001-20

0 前言

欧亚大陆及其边缘海,是目前地球上最大的拼合岩石圈块体,它由约三十多块尺度不同,结构特性相异,以及动力学过程不同的岩石圈板块或地块,经历长期演化在新生代拼合形成。这里既有太古宙波罗的地盾和长期稳定的西伯利亚和中欧克拉通地台,以及由冈瓦纳古陆分裂出来的印度板块;有全球规模最大的新生代阿尔卑斯—扎格罗斯—喜马拉雅造山带,以及印度与亚洲陆陆碰撞形成的青藏高原;也有全球最大的西太平洋边缘海沟弧盆系和新生代增生陆块。

大陆岩石圈板块厚度差异极大,在稳定的克拉通地区,有厚达 200~400 km 的地幔根,软流圈不发育或不存在。而在大陆裂谷带,岩石圈减薄到 40~50 km,且有十分发育的软流圈。大陆造山带的流变作用,使陆块的表面及地幔深部都受到很大的改造。

由于大陆岩石圈比海洋岩石圈相对软弱,具有较高的流变性和粘度,较小的密度和较低的温度,因此自形成以来一直浮在地球表面漂移。太古宙原始岩石圈形成及元古宙的增生,经历了数十亿年的汇聚与分裂、碰撞与挤压、叠加与增厚、拆离与减薄,以及岩浆与火山活动,岩石圈板块不断变化与重组,消亡与新生。

大陆岩石圈生存期可达 30~35 亿年,而海洋岩石圈的年龄不超过 2 亿年。大陆地壳记录了地球形成到现今的构造运动和变质作用,刻画了地球三十多亿年的演化史。在漫长的演化过程里,它是由不同构造环境和热演化史形成的块体拼合而成。图 1 为欧亚大陆及边缘海构造分区略图,显示了板块、陆块、海盆、造山带的拼合关系。这些板块及造山带分别为:

(1)前寒武纪巨型地盾及克拉通地块:①东欧地块(俄罗斯地块);②西伯利亚地块(东西伯利亚造山带);③西西伯利亚地块;④哈萨克斯坦地块;⑤波罗

的地盾;⑥印度地盾。

(2)前寒武纪小型克拉通地块或板块:①塔里木地块;②上扬子地块;③华北地块(鄂尔多斯地块);④图兰地块;⑤阿拉伯地块。

(3)显生宙造山带及汇聚地块:①加里东造山带;②华力西造山带;③阿尔卑斯造山带;④扎格罗斯造山带;⑤土耳其地块;⑥松辽—佳木斯构造带;⑦蒙古—贝加尔—大兴安岭构造带。

(4)陆陆碰撞增厚型造山带及地块:①青藏地块(松潘甘孜地块,羌塘地块,拉萨地块);②喜马拉雅造山带;③天山山系,④昆仑山系;⑤伊朗地块。

(5)新生代边缘海海盆:①日本海海盆;②鄂霍次克海海盆;③东海及冲绳海沟;④苏禄海、苏拉威西海。

(6)大陆裂谷盆地及增生地块:①华夏地块;②巽他地块(印支地块,南海海盆,海南岛及北部湾,婆罗洲);③下扬子地块;④华北裂谷盆地;⑤红海亚丁湾。

1 欧亚大陆岩石圈地震面波层析成像

目前有关岩石圈结构的信息主要来源于地震波探测,特别是来自地震层析成像的研究。Ekström 指出^[1],对于上地幔数十以至数百公里横向不均匀性的研究,主要还是来自瑞利面波和勒夫面波的资料。这是因为面波在一定周期的传播速度(相速度或群速度)主要取决于地球上层弹性层的纵向厚度(即岩石圈的厚度)。因此,利用面波研究岩石圈板块的厚度及其横向变化,是目前最常用和最有效的手段^[1-20]。

对欧亚大陆的深部地质研究已具有一定的深度和广度,我国大陆上已经完成了约 50 000 km 的人工地震测深剖面,近年来在南海、东海、冲绳海槽完成了数条高质量反射地震剖面。国外在日本海等地区也完成了一定数量地震观测剖面,这为研究东亚及西太平洋边缘海岩石圈三维结构提供了重要资料。欧洲地学断面 EGT 计划的完成^[21-22],为我们

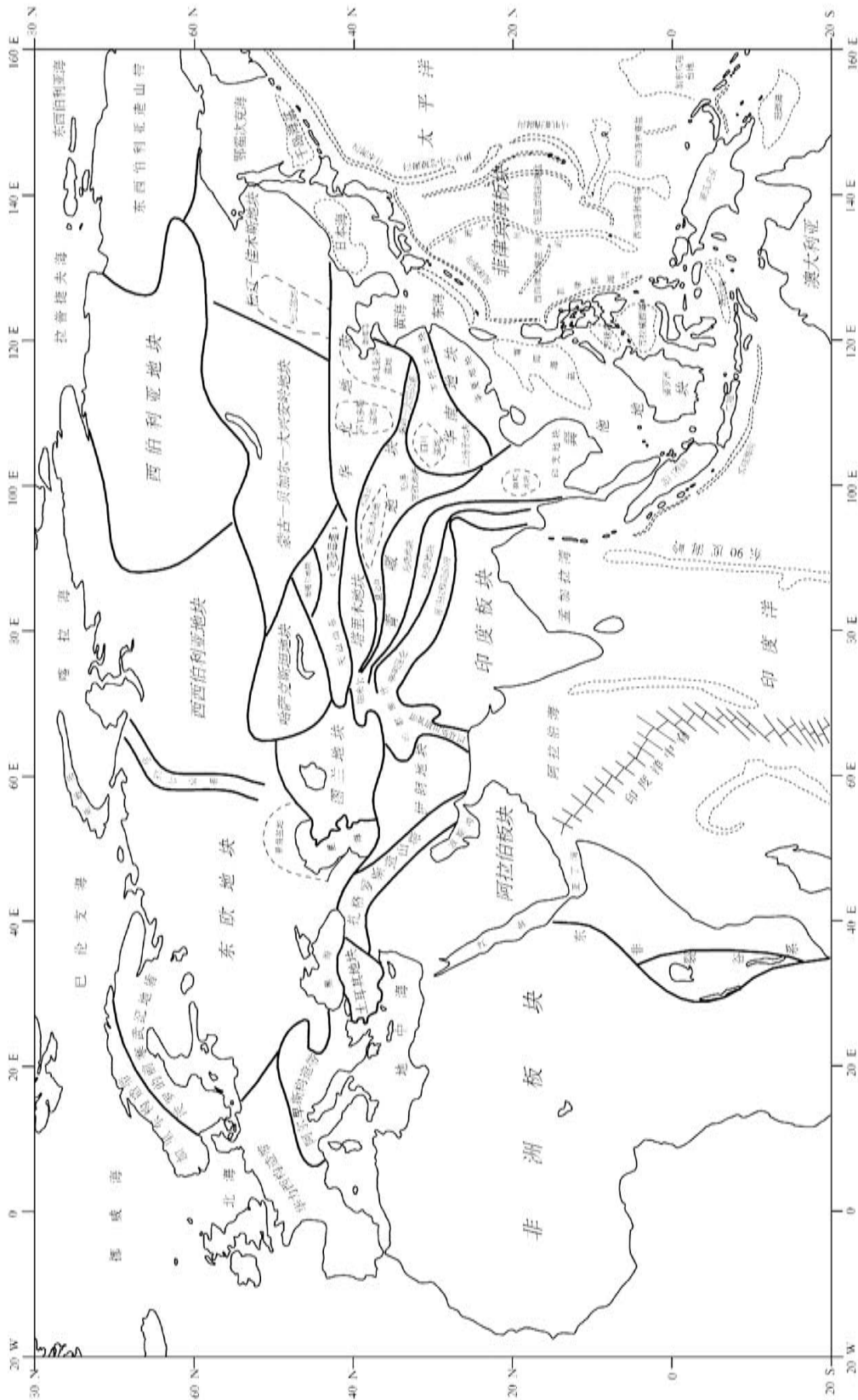


图1 欧亚大陆及边缘海地区构造分区略图
Fig.1 The tectonic sketch map in Eurasia and surrounding marginal seas

提供了一个探测地球岩石圈/软流圈的内部结构范例,它细致地描绘了岩石圈下部结构。实际上,该剖面甚至可以填绘出上地幔至 450 km 深度的地质结构。

近年来开展的欧洲大陆桥计划 EURO-BRIDGE,对于研究北欧地盾和东欧地台岩石圈结构作出了重要贡献^[23-24]。

Panza 等对长周期地震仪上群速度和相速度得到的瑞利波进行了反演分析,欧洲大陆岩石圈厚度可从数十公里变到 200 余 km; Calcagnile 应用相同的方法分析了瑞利波路径的频散^[8],指出下部岩石圈 S 波速度值介于 4.2~4.8 km/s,一般为 4.4~4.5 km/s,而软流圈的 S 波速度大都位于 4.2~4.4 km/s。Du 及 Michelini, Panza 发表欧洲三维地震模型,给出欧洲地区莫霍界面及岩石圈厚度图^[25]。

Yanovskaya 及 Kozhevnikov 用欧亚大陆约 1 200 条瑞利面波获得的群速度资料,对欧亚地区深约 500 km 的 S 波速度进行三维成像。在 50 km 深度,最显著的特点是西藏的低速异常。它与该区巨厚且低速分布的地壳有关。在 250~300 km 深度沿东经 105°有一速度突变的分界线(东部为低速,西部为高速),这种情况表明低速的软流层从海洋扩展到大陆后遇到高速的物质,阻止软流层物质继续向西流动^[19]。

利用面波频散进行欧亚大陆三维结构层析成像研究,早期有 Feng 用 10°×10°网格 S 波速度结构的反演^[9],宋仲和等对中国大陆及邻近海域利用 298 条路径采用 4°×4°网格对中国大陆及邻近海域 S 波速度进行反演^[2],吴大铭等对中国及邻区的 Rayleigh 速度的反演^[18],以及 M. Ritzwoller 和 A. Levshin 对欧亚大陆 Rayleigh 及 Love 波群速度按 1°×1°网格反演^[16-17,26]。

Pasyanos 对欧亚大陆及北非面波频散作了高分辨率成像,发现短周期面波群速度对沉积层有清楚显示,中周期面波群速度对地壳厚度反映清楚,而长周期面波群速度主要反映岩石圈的厚度和年龄^[14]。

本文利用分布于欧亚大陆及西太平洋区域的宽频带数字地震仪(包括全球数字地震台网 GDSN、DWWSSN 中国数字地震台网 CDSN、地球探测镜 GEOSCOPE)记录,搜集了亚洲、欧洲、部分非洲和澳洲,以及印度洋、西太平洋地区的 114 个数字地震

台,记录的 40°W 至 180°E, 40°S 至 80°N 范围内约一万个地震事件,并从中挑选出 1982—2006 年间的 1 785 个事件的长周期波形记录。这些地震事件震级绝大部分都在 5.0~7.0,震源深度小于 100 km。利用 FTAN(频率-时间分析)方法获得频散曲线。经过筛选,共得到周期在 8~200 s 之间 10 500 余条质量较高的瑞利面波频散曲线,这些面波所通过的大圆路径很好地覆盖了欧亚大陆及其边缘海地区。

瑞利面波频散反演采用两步法来实现,首先作区域化反演得到群速度分布,然后作 S 波速度反演得到速度分布的三维图像。本研究旨在提高测定精度(大范围按 2°×2°网格计算纯频散数据),对该区进行高精度的面波频散反演。

利用朱介寿等采用的方法^[6],进行面波频散及波形拟合反演,得到欧亚大陆及其边缘海高分辨率层析成像,由此得到不同深度的 S 波速度分布如图 2 所示。

在深度 16~55 km 的平面图上,相对海洋而言,欧亚大陆整体上显示为低速,其中尤以欧亚大陆南部地中海、阿尔卑斯、里海、黑海、土耳其、伊朗、帕米尔、青藏高原、缅甸较为突出。以青藏高原为中心的大范围极低速异常已向周围延伸到塔里木、华北、上扬子及蒙古—贝加尔—大兴安岭地块。欧亚大陆的地盾和克拉通区(波罗的地盾、东欧地台、西西伯利亚地块、西伯利亚地块、印度地盾、哈萨克斯坦地块)显示为较高速。在这一深度范围速度差异 dv/v 达 ±16%。

深度 85~135 km 平面图上,欧亚大陆北部及西伯利亚地盾和克拉通区的高速异常十分突出。印度板块、哈萨克斯坦地块,以及青藏、塔里木、上扬子、华北西部、鄂尔多斯地块为高速带。欧洲华力西及阿尔卑斯构造带、阿拉伯板块、红海亚丁湾出现低速异常。东亚地区和其边缘海大范围的低速异常十分显著,其中尤以鄂霍次克海海盆、日本海盆、冲绳海沟、海南岛及南海海盆、苏禄海及苏拉威西海、婆罗洲、菲律宾海,以及华北地区的低速异常表现突出。沿日本伊豆、小笠原群岛至马里亚纳海沟(太平洋板块俯冲带)以及沿日本列岛、菲律宾海沟及印度尼西亚岛弧出现高速异常带(西太平洋、菲律宾海及印度洋板块俯冲带)。在这一深度范围速度差异 dv/v 达 ±5%。

青藏高原在 100 km 以上仍显示为低速异常,100 km 以下急速转为高速异常,表明这一陆陆碰撞

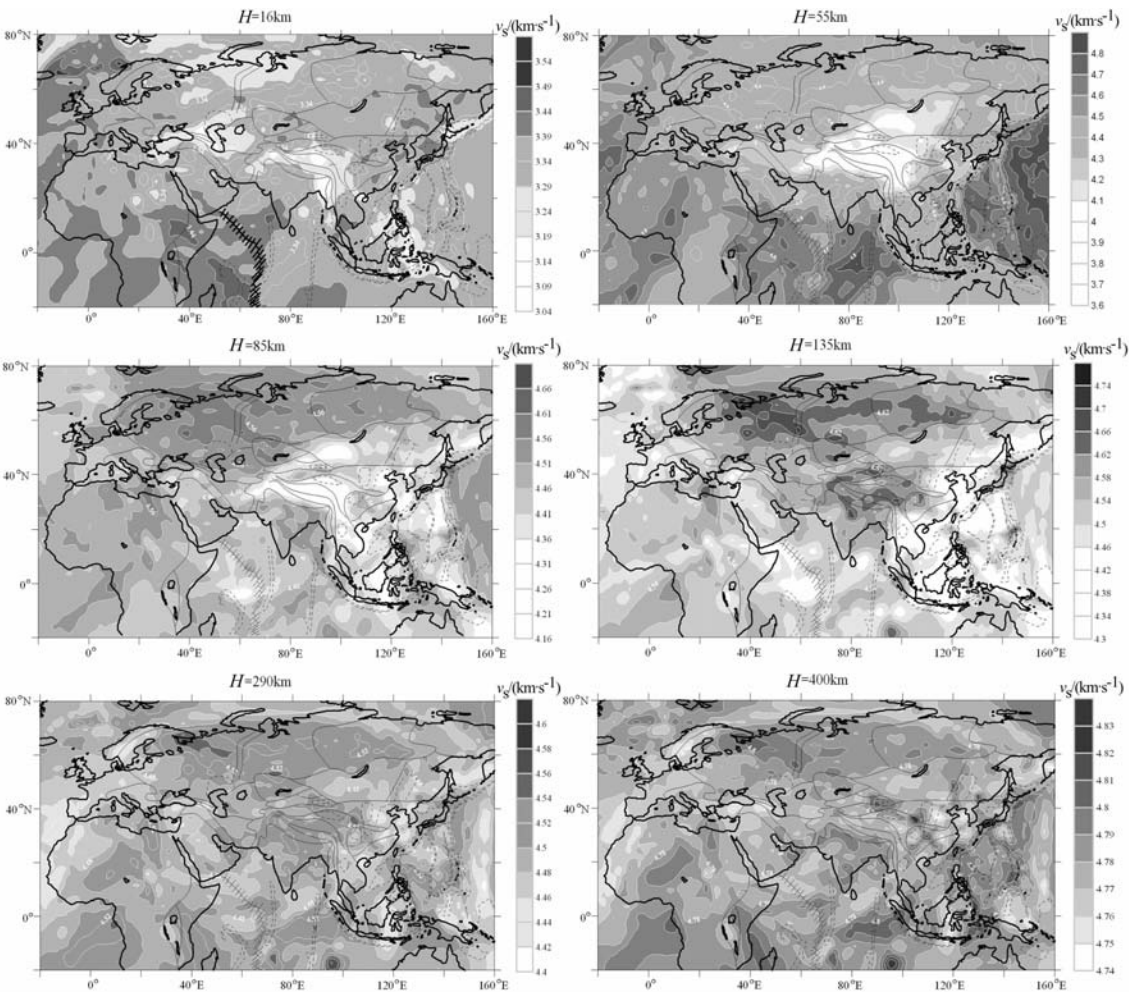


图2 欧亚大陆及边缘海地区不同深度的S波速度分布图
Fig.2 The S-wave velocity to various depth in Eurasia and marginal seas

陆块的地壳与地幔的结构和特性有很大变化,即地幔部分可能为古老的冈瓦纳板块插入置换。

深度290 km的平面图上,波罗的地盾、东欧地台、西伯利亚地台及中亚地区、印度地盾、青藏高原、塔里木、扬子地块仍为高速异常区。欧亚大陆其余区域及西太平洋边缘海为低速异常。伊豆、小笠原群岛至马里亚纳海沟,以及菲律宾海沟都出现显著的高速异常。

深度400 km的平面图上,欧亚大陆及其边缘海各地块速度差异已不明显($dv/v=\pm 2\%$),表明在上地幔410 km过渡带附近横向变化已很小。

图3为沿纬向的 v_s 速度剖面图,由该图可以清楚看到由地震波速度划分的岩石圈及软流圈的空间分布。

在剖面上,以 v_s 为4.45 km(范围4.40~4.50 km)等值线为界,把上地幔顶部的高速体(岩石圈地幔部分)与下伏的低速带(软流圈部分)区分开来。

沿纬度0°剖面通过欧亚大陆南沿及西太平洋边缘,这里大部分是新生代拼贴到欧亚大陆的板块或地块,岩石圈厚度均不超过100 km。

沿北纬10°剖面通过欧亚大陆南沿及西太平洋边缘,这里大部分是新生代拼贴到欧亚大陆的板块或地块,岩石圈厚度小于100 km。

沿北纬30°剖面显示伊朗、阿富汗地块、印度板块、青藏及扬子等地块均是增厚的岩石圈。东海、菲律宾板块明显减薄。

沿北纬50°剖面,东欧地块、哈萨克斯坦地块显示有巨厚的岩石圈,蒙古—贝加尔—大兴安岭到松辽地块岩石圈变薄且速度变低。

沿北纬70°剖面,沿前寒武纪波罗的地盾,东欧及西伯利亚地块均显示巨厚的岩石圈板块。

综上所述,在克拉通地块及岩石圈汇聚区(如波罗的地盾、东欧地台、西伯利亚地台、印度板块、西藏地块、扬子地块、塔里木地块、哈萨克斯坦地块),都

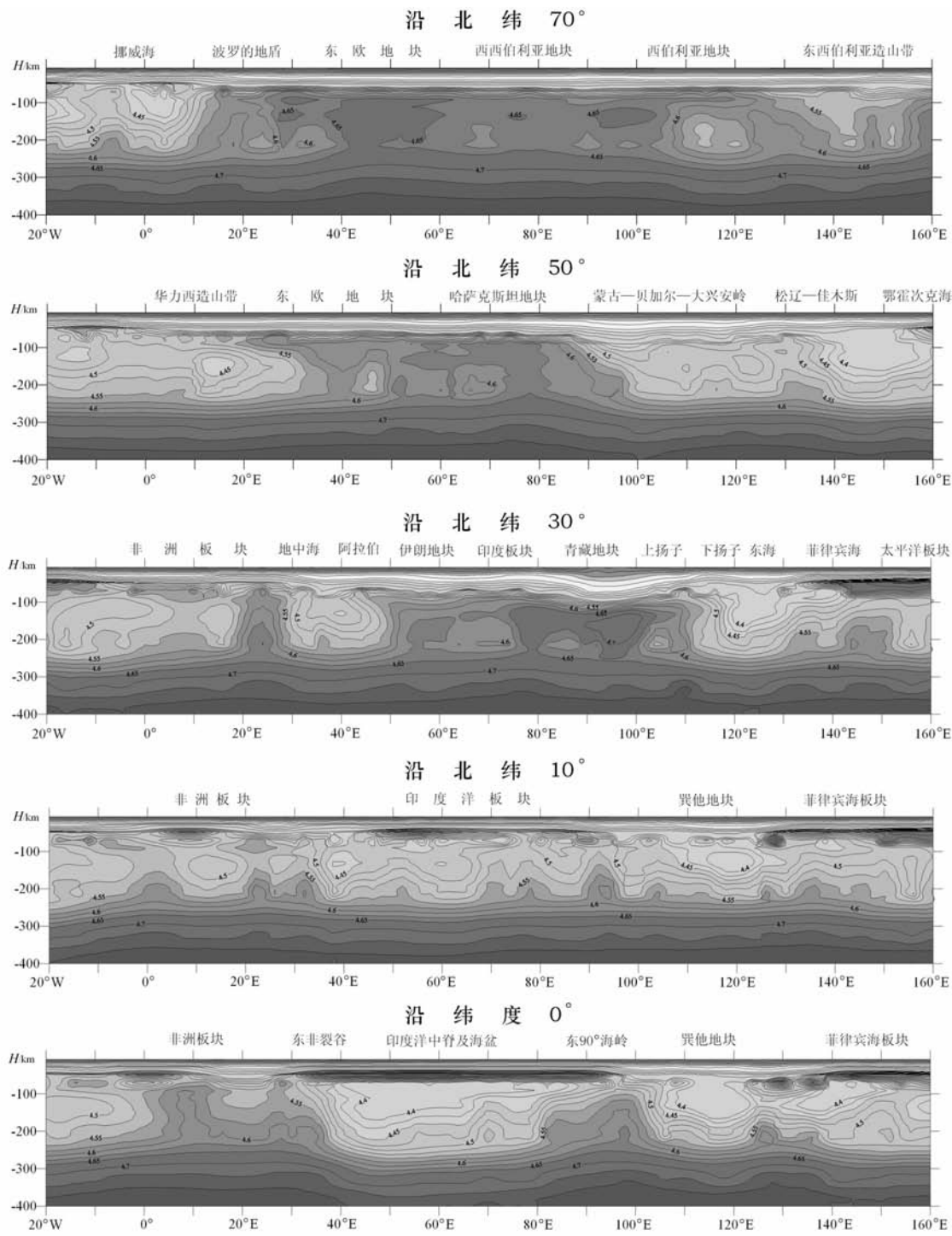


图3 沿纬向的 v_s 速度剖面图
Fig.3 v_s velocity profiles along latitudes

存在很厚的岩石圈,较薄的软流圈。而在东部、南部及边缘海地区(如华北地块、华南地块、日本海、南海、苏拉威西海、苏禄海、菲律宾海板块、阿拉伯板块等),岩石圈拉张减薄并出现巨厚的软流圈。

2 岩石圈分块的速度结构特征及其意义

如前所述,欧亚大陆及其边缘海是由不同尺度,

不同生成环境,不同演化过程形成的数十个地块或板块组成,它们是地球漫长历史的产物。地震面波层析成像提供了各个块体从地壳到上地幔 400 km 深度速度随深度变化特征。

每一个块体的速度变化特征都不相同,可以按其随深度变化形态和数值的相似性进行归类。我们发现,这种相类似的速度特征与它们的空间分布并无关系,相邻的地块速度特征可能完全不同,而相距很远并无关联的地块却可能有相同的速度分布。

按照欧亚大陆及其边缘海块体的构造特征及演化过程,以及它们所表现出来的速度特征,可以把它们归纳为以下 6 类。

(1) 巨型克拉通地块及地盾

分布在欧亚大陆北部及南部的克拉通地块及地盾,是太古宙或元古宙形成的陆核或古陆,它们是欧亚大陆最稳定的地块。包括东欧地台、波罗的地盾、西西伯利亚地块、西伯利亚地块、哈萨克斯坦地块,以及从冈瓦纳古陆分裂出来的印度地盾等。这些地块或地盾有的相邻连接,但有的相距很远,构造上毫无关系,但其速度分布特征十分相似。图 4 为巨型克拉通地块或地盾 v_s 分布图。巨型克拉通地块及地盾的 v_s 速度总的较高,从上地幔顶部一直延伸到 200~250 km 都呈增大趋势,上地幔中的低速层不明显或不存在。东欧地台速度总体较高,西伯利亚及印度地盾次之,波罗的地盾速度相对较低。

巨型克拉通地块总体速度特征如下,地壳厚 40~50 km,下地壳 v_s 速度为 4.2~4.3 km/s,岩石圈厚度达 200~300 km,岩石圈盖层(lid)的速度很高, v_s 达到 4.6~4.75 km/s。软流圈很薄(小于 50 km)或不存在,软流圈中 v_s 速度亦高达 4.6 km/s。

(2) 小型克拉通地块或板块

在东亚及中亚地区,有若干较小的克拉通地块,它们的面积仅为巨型克拉通地块的十分之一或二十分之一。这些小型地块自太古宙或元古宙形成后,一直在地球表面漂移,时而孤立 in 海洋中,时而拼贴到另一板块之上。有些小型克拉通地块后期(中生代)还经历了较强烈的火山岩浆活动。

图 5 为小型克拉通地块 v_s 随深度分布图,由图可见它们的速度分布与巨型克拉通地块相似。不同之处是上地幔高速层略低,低速层发育较明显。平均而言,小型克拉通地块的地壳厚度为 35~50 km,地壳下部速度为 4.2~4.3 km/s。岩石圈厚度为 160~220 km,岩石圈盖层(lid) v_s 速度为 4.45~

4.65 km/s。软流层较发育,厚度为 50~100 km, v_s 值为 4.42~4.62 km/s。

(3) 显生宙造山带及汇聚地块

在欧洲的中南部及西部、亚洲的中部,分布着一系列从古生代到中生代形成的造山带或汇聚地块。这些显生宙造山带或汇聚地块是欧亚大陆拼合过程中克拉通地块之间的构造变形造山带,或古海洋消亡闭合过程中微板块和岛弧汇聚拼贴形成的地块或造山带。如欧洲的加里东造山带(晚古生代),华力西造山带(早古生代),阿尔卑斯造山带(新生代),亚洲的扎格罗斯造山带(新生代),土耳其地块(新生代),亚洲的蒙古—贝加尔—大兴安岭地块(古生代)及松辽—佳木斯地块(中生代)。

显生宙的造山带或汇聚地块由于形成时间较晚,有的还出现显著的岩浆及火山活动,因此总体来说岩石圈较薄,速度较低,软流圈较为发育。

图 6 为显生宙造山带的 v_s 速度随深度变化。地壳厚度为 40~60 km,地壳下部 v_s 速度为 4.1~4.3 km/s。岩石圈厚度为 100~140 km,岩石圈盖层 v_s 速度为 4.45~4.55 km/s,软流圈厚度达 120~200 km, v_s 速度为 4.4~4.5 km/s。

(4) 陆陆碰撞型地块及造山带

新生代印度地盾与亚洲大陆的碰撞形成全球独一无二的青藏高原,以及它相邻的造山带(喜马拉雅山、昆仑山、天山)和地块(伊朗)。其影响范围一直到蒙古和贝加尔湖一带。青藏高原的岩石圈结构十分独特,在 100 km 以上的地壳和上地幔顶部 v_s 速度分布是全球最低的。但 100 km 以下的上地幔,或岩石圈盖层(lid)的速度又急剧变高,与巨型克拉通相同深度的 v_s 速度相同。这说明它有巨厚低速、低密度剧烈变形的地壳,又有高速、高密度稳定的克拉通上地幔。这是由于陆陆碰撞及陆内俯冲,形成了上下拆离的活动地壳与稳定的克拉通上地幔的双层岩石圈结构。

新生代以来,印度刚性地块产生的巨大的陆内俯冲,青藏高原地壳的缩短(约 2 500 km)隆升(约 5 000 m)与流变变形,也为其他大量观测资料所证实。

陆陆碰撞引起岩石圈增厚,地壳厚度达 60~80 km,下地壳速度极低,仅 3.6~4.0 km/s,岩石圈厚度达 160~240 km,岩石圈盖层速度高达 4.55~4.75 km/s。软流圈厚度达 100 km,速度为 4.5~4.62 km/s,其 v_s 速度随深度分布曲线如图 7 所示。

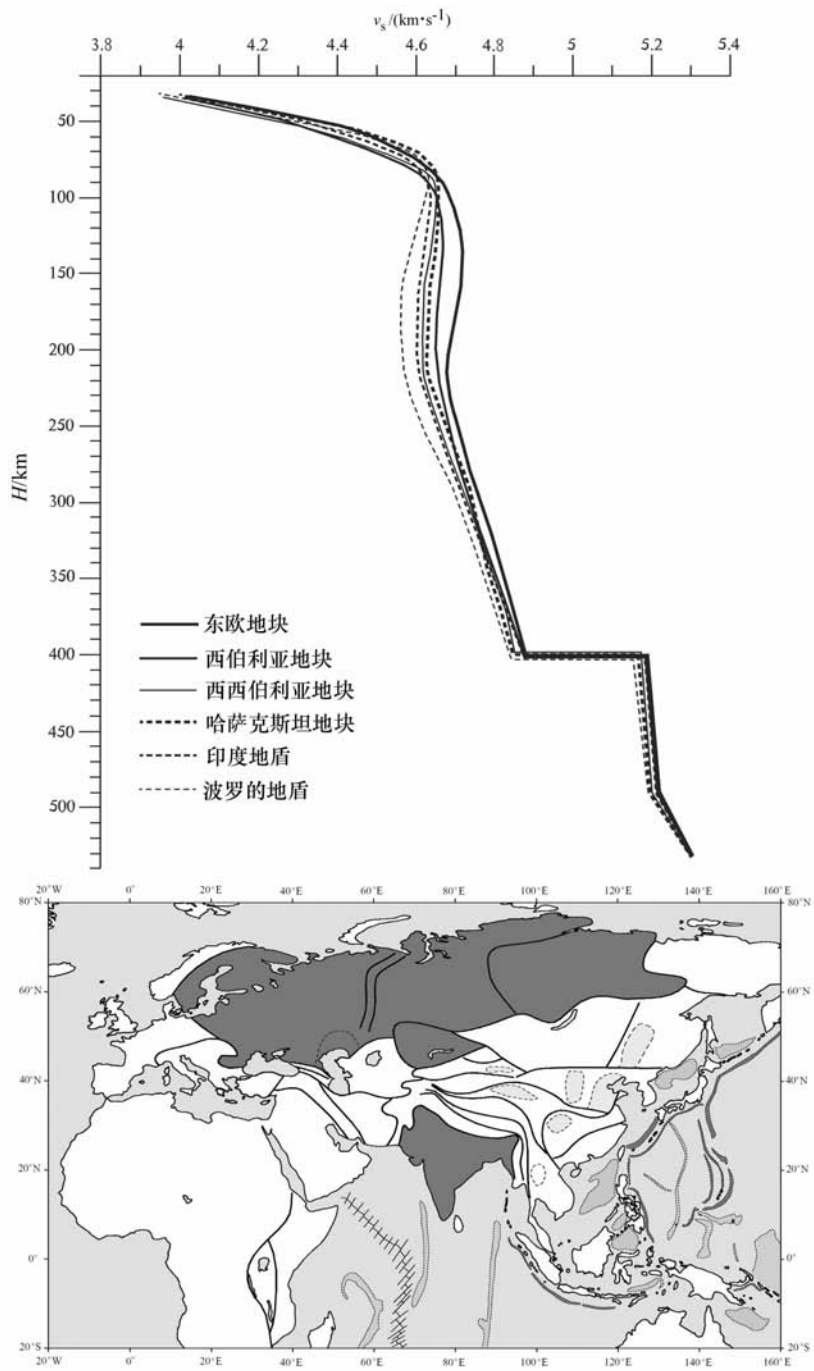


图 4 巨型克拉通地块及地盾 v_s 随深度分布图

Fig. 4 v_s velocity distribution with depth in large scale cratonic plates and shields

(5)新生代边缘海海盆

沿西太平洋边缘海发育了一系列新生代的海盆,这些海盆是新生代中期或后期经短暂张裂后又闭合形成的,一般有配套的沟弧盆体系。如鄂霍次克海海盆、千岛海盆、日本海海盆、东海及冲绳海沟、南海海盆、苏禄海、苏拉威西海及班达海等。边缘海海盆的特征是岩石圈张裂减薄,软流圈发育, v_s 速

度降低。这些边缘海海盆的形成与新生代地幔深部热事件及上地幔物质发生交替置换有关。

图 8 为边缘海海盆的 v_s 速度分布图像,由图可见,地壳厚度为 5~15 km,地壳下部速度为 3.6~4.1 km/s,岩石圈厚度为 50~80 km,岩石圈盖层的速度为 4.25~4.48 km/s,软流圈厚度达 160~200 km,速度为 4.2~4.4 km/s。

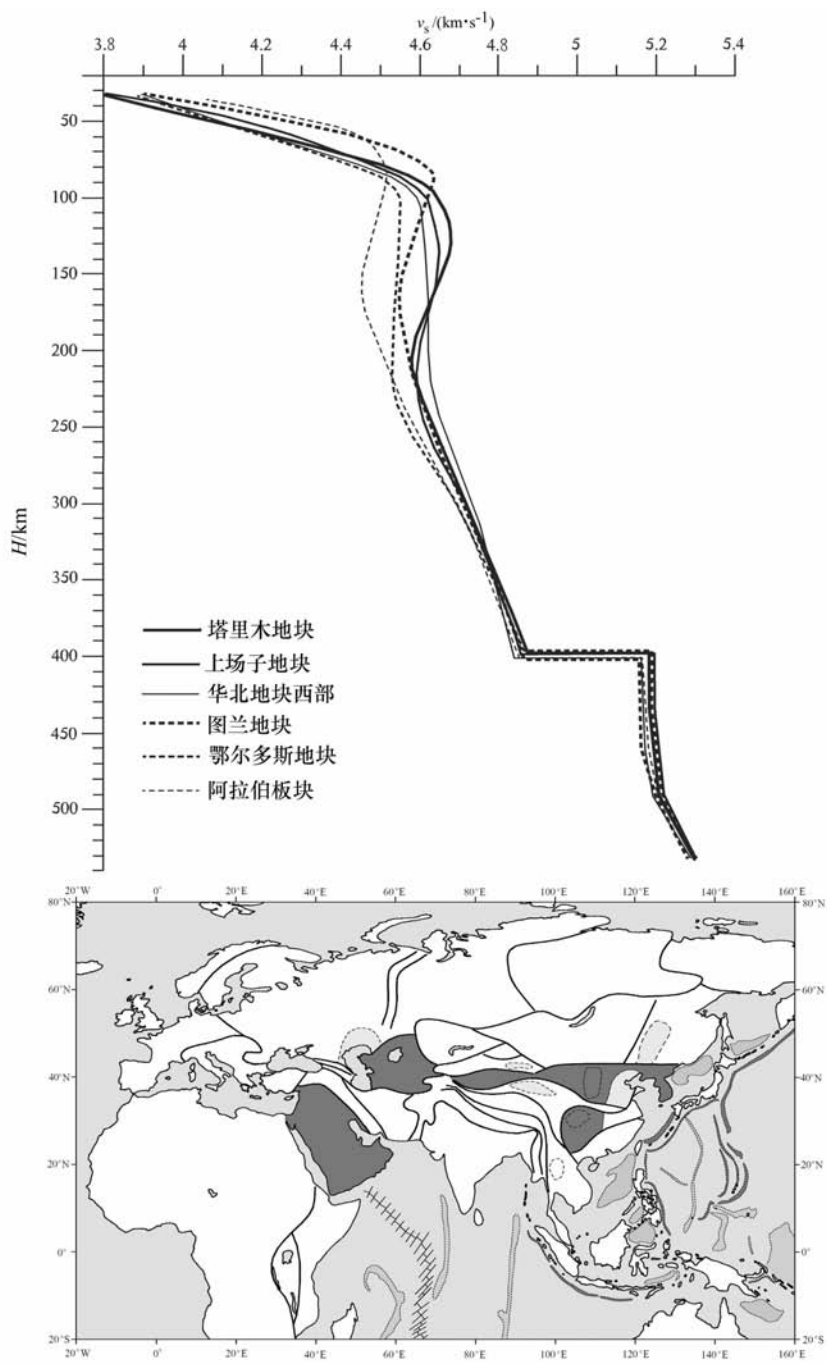


图 5 小型克拉通地块及板块 v_s 速度分布图

Fig. 5 v_s velocity distribution with depth in small scale cratonic plates and blocks

(6)大陆裂谷盆地及增生地块

分布在亚洲大陆边缘的一些地块,由于中新生的岩浆、火山活动等深部热事件,引起软流圈物质上涌,岩石圈减薄,形成裂谷盆地,其中典型的如华北裂谷盆地,下场子华夏地块等张裂区,以及阿拉伯与非洲之间的红海亚丁湾等。其中 v_s 速度最低,持续深度最大的是南海及北部湾(或有人称为海南岛

热点区)。

减薄的岩石圈还出现在新生代增生的巽他地块,这是一个岩石圈较薄块内无明显变形的刚性地块,其周边(缅甸、安达曼、印度尼西亚岛弧)及菲律宾岛弧都有着剧烈形变。

图 9 为裂谷盆地及增生地块的 v_s 速度随深度分布图,它们的平均地壳厚度为 10~30 km,地壳下

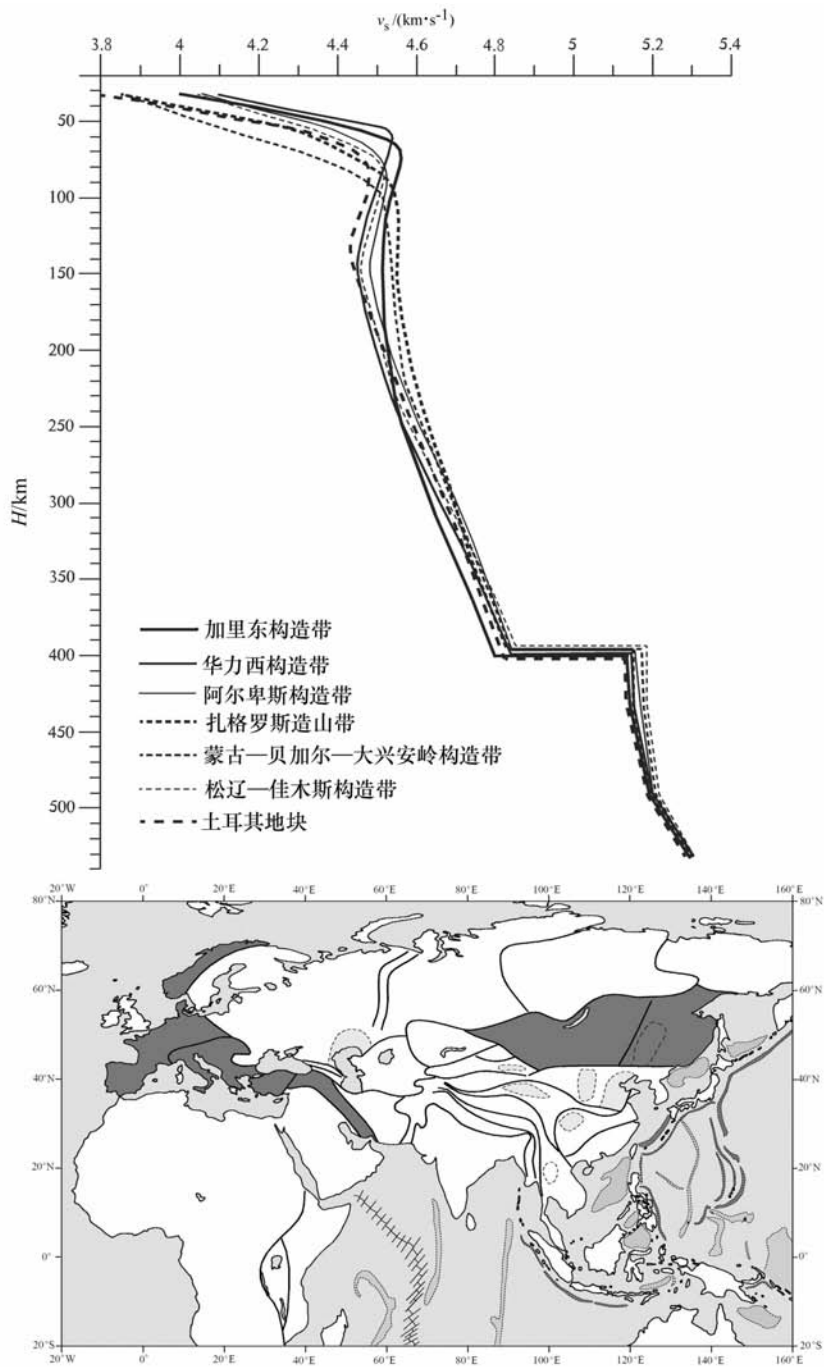


图 6 显生宙造山带及汇聚地块 v_s 速度分布图
Fig. 6 v_s velocity distribution with depth in phanerozoic orogens

部速度为 3.6~4.1 km/s。岩石圈厚度为 50~80 km,岩石圈盖层速度为 4.3~4.5 km/s。软流圈厚度为 160~200 km,速度为 4.2~4.45 km/s。

另外,海洋板块也非常重要。

为了与大陆及边缘海各地块岩石圈构造进行对比,分别给出了西太平洋板块、菲律宾海板块、印度洋板块、大西洋的挪威海海盆的 v_s 随深度分布曲线

图。由图 10 可见,海洋板块的显著特点是 v_s 在岩石圈内异常高,而软流圈速度又异常低,有十分尖锐的速度突变点。这也为海洋板块划分岩石圈和软流圈的分界提供了十分清晰的标志。

海洋板块平均地壳厚度为 5~8 km,地壳底部 v_s 速度为 4.3~4.5 km/s,岩石圈平均厚度为 40~70 km,岩石圈盖层速度高达 4.6~4.8 km/s。软流

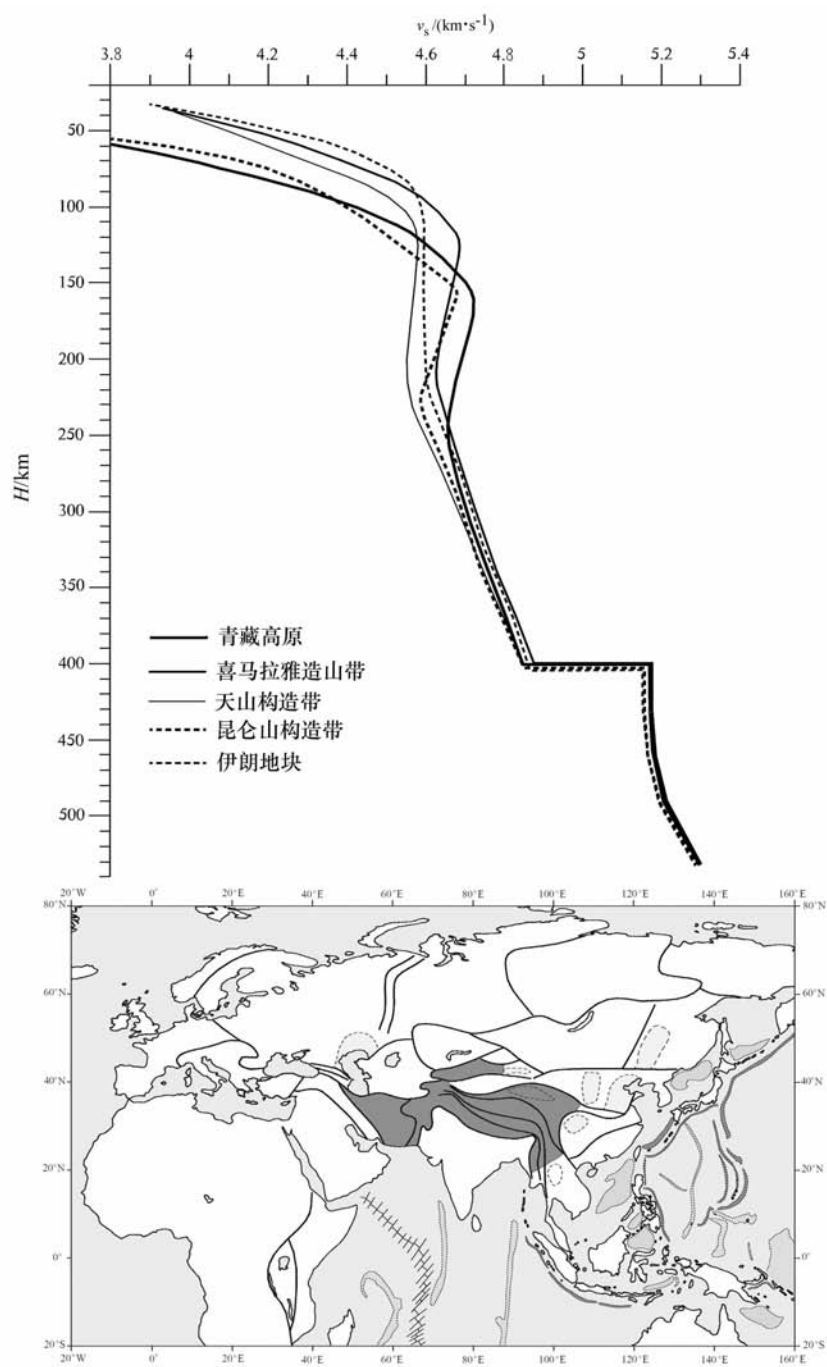


图 7 陆陆碰撞造山带或地块 v_s 速度分布图
Fig. 7 v_s velocity distribution with depth in continent-continent collision orogens

圈厚度为 240~280 km,速度为 4.3~4.5 km/s。
在研究过程中,参考了已有的地球模型,以其中
间值作为初始模型,图 11 为本文所采用的三个地球
模型 (IASP91、AK135、PREM) 及反演初始模型的
 v_s 分布图。
图 12 为欧亚大陆及边缘海各地块、板块、造山
带和边缘海海盆、大陆裂谷盆地等岩石圈单元 v_s 速

度随深度变化的综合图。每一类型的岩石圈分块单
元分别由不同颜色表示。
由图可见,不同类型的岩石圈 v_s 速度随深度呈
有规律变化。其中变化最大的为 50~60 km 以上
的地壳及上地幔顶部,变化范围为 2.8~4.8 km/s。
60 km 以下到 200 km 深度, v_s 速度差异仍然较大,
变化范围为 4.2~4.75 km/s,200~300 km 变化范

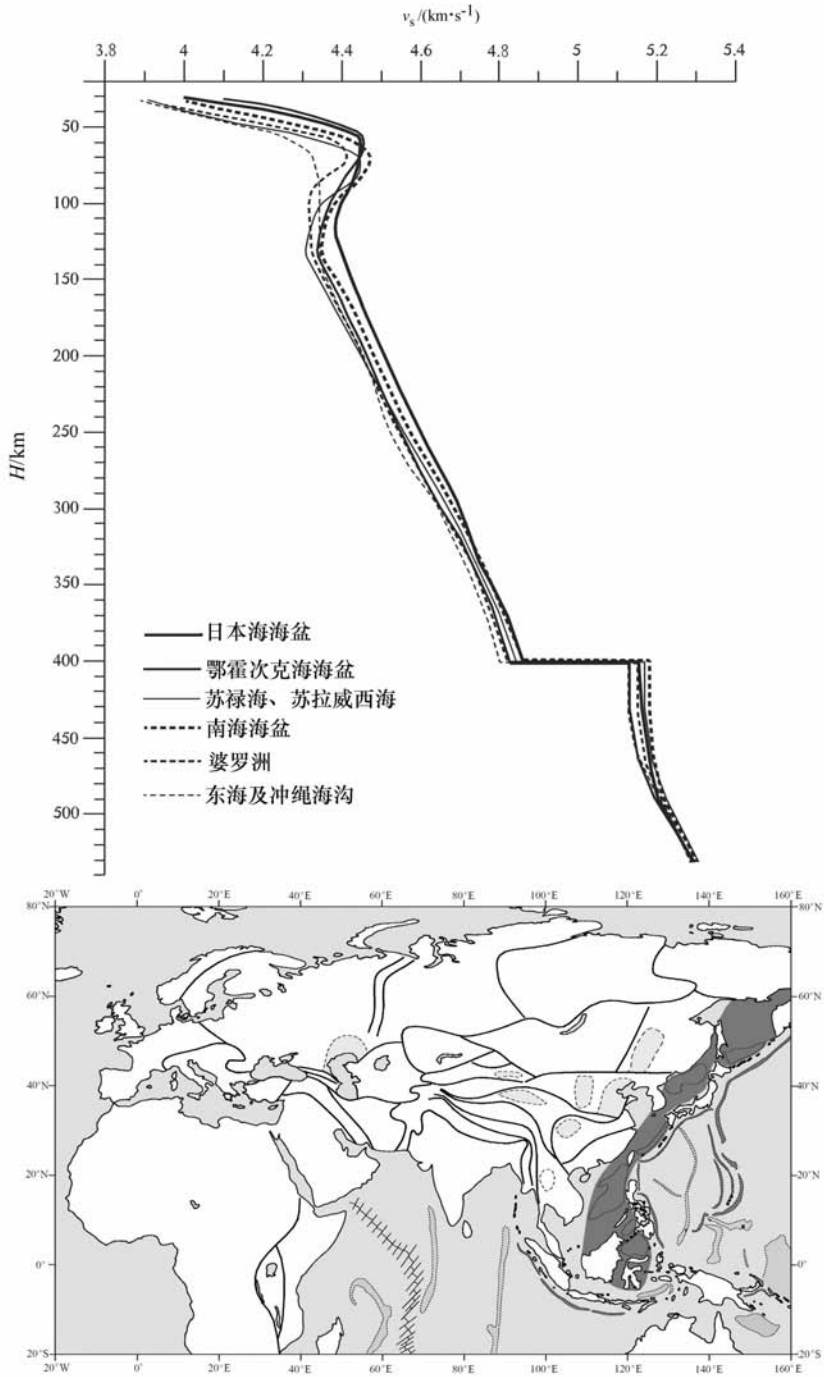


图 8 边缘海海盆 v_s 速度分布图

Fig. 8 v_s velocity distribution with depth in marginal basin

围为 4.4~4.75 km/s, 300~400 km, 速度变化减小, 其范围为 4.55~4.8 km/s。

其次, 与克拉通有关的岩石圈块体, 如巨型克拉通块体(蓝色), 小型克拉通块体(绿色), 陆陆碰撞造山带(浅蓝色)岩石圈厚, 速度显著高于反演的地球模型平均值。岩石圈速度为 4.5~4.8 km/s。显生宙造山带(黄色) v_s 速度分布与模型平均值基本相

似, 处于中间。新生代边缘海海盆(红色)及大陆裂谷盆地(浅红色), 岩石圈减薄, 且速度减低, 均低于模型 v_s 平均值。为与大陆对比, 还给出了海洋板块的 v_s 速度深度变化(紫色), 它显示了海洋岩石圈薄而高速的特征。

为了更清楚显示各个岩石圈地块 v_s 随深度分布特征, 给出了每一组同类岩石圈地块 v_s 随深度变

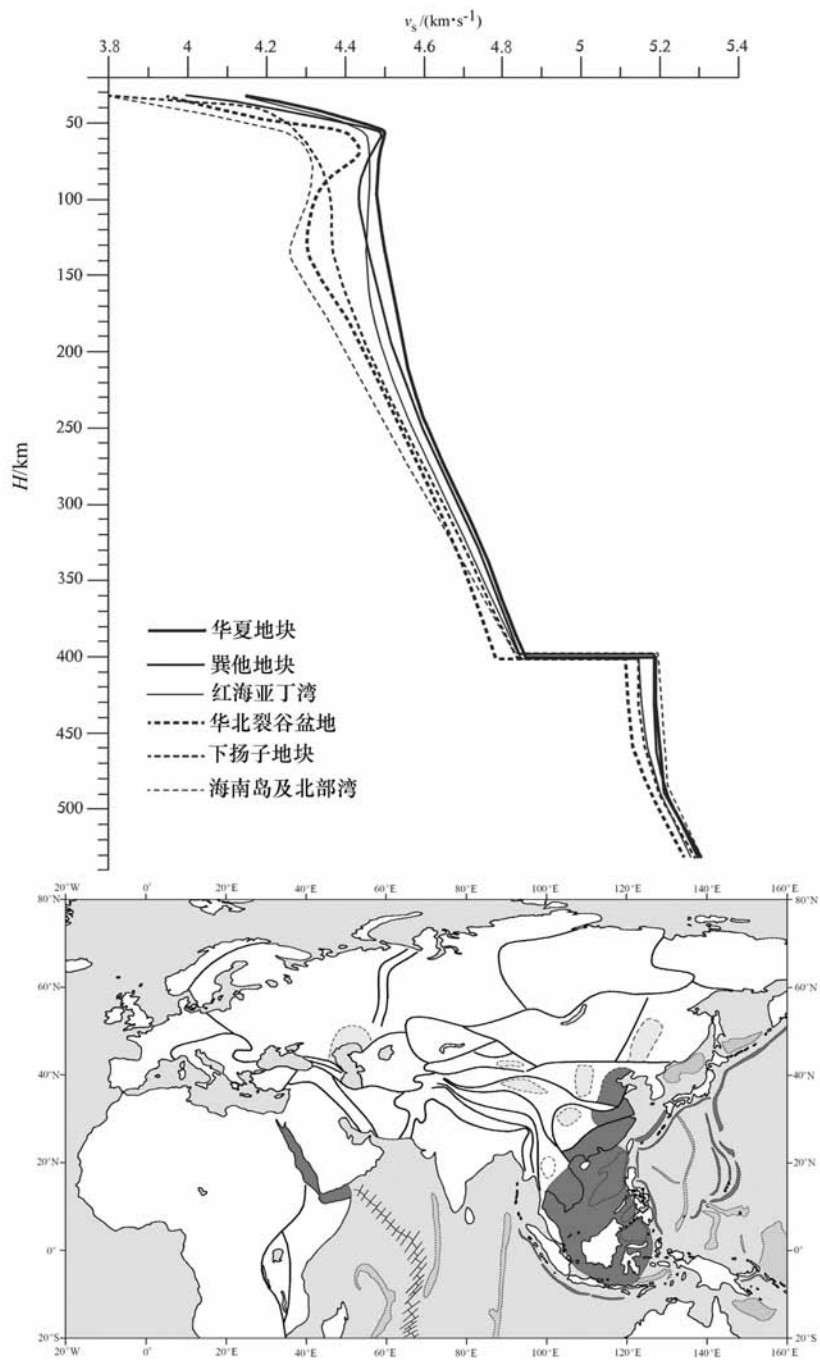


图9 裂谷盆地及增生地块 v_s 速度分布图

Fig. 9 v_s velocity distribution with depth in rifting basins and accretion blocks

化的平均值,如图 13 所示。可以看出各种不同类型岩石圈 v_s 速度分布的显著差异。

欧亚大陆及其边缘海地区不同类型岩石圈厚度与速度分布见表 1。

3 欧亚大陆岩石圈模型的建立

为了系统地研究欧亚大陆及其边缘海的岩石圈

结构,本文进行了以下研究工作。

(1)人工地震测深剖面研究

对欧亚大陆及边缘海地区 108 条总长约 78 000 km 的人工地震测深剖面地壳及上地幔顶部结构基本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 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ (东经 $60^{\circ}\sim 160^{\circ}$,南纬 10° 至北纬 60°)网格结点 3 590 个地壳基本数据,编制出中国及邻近陆海精细地壳厚度图。

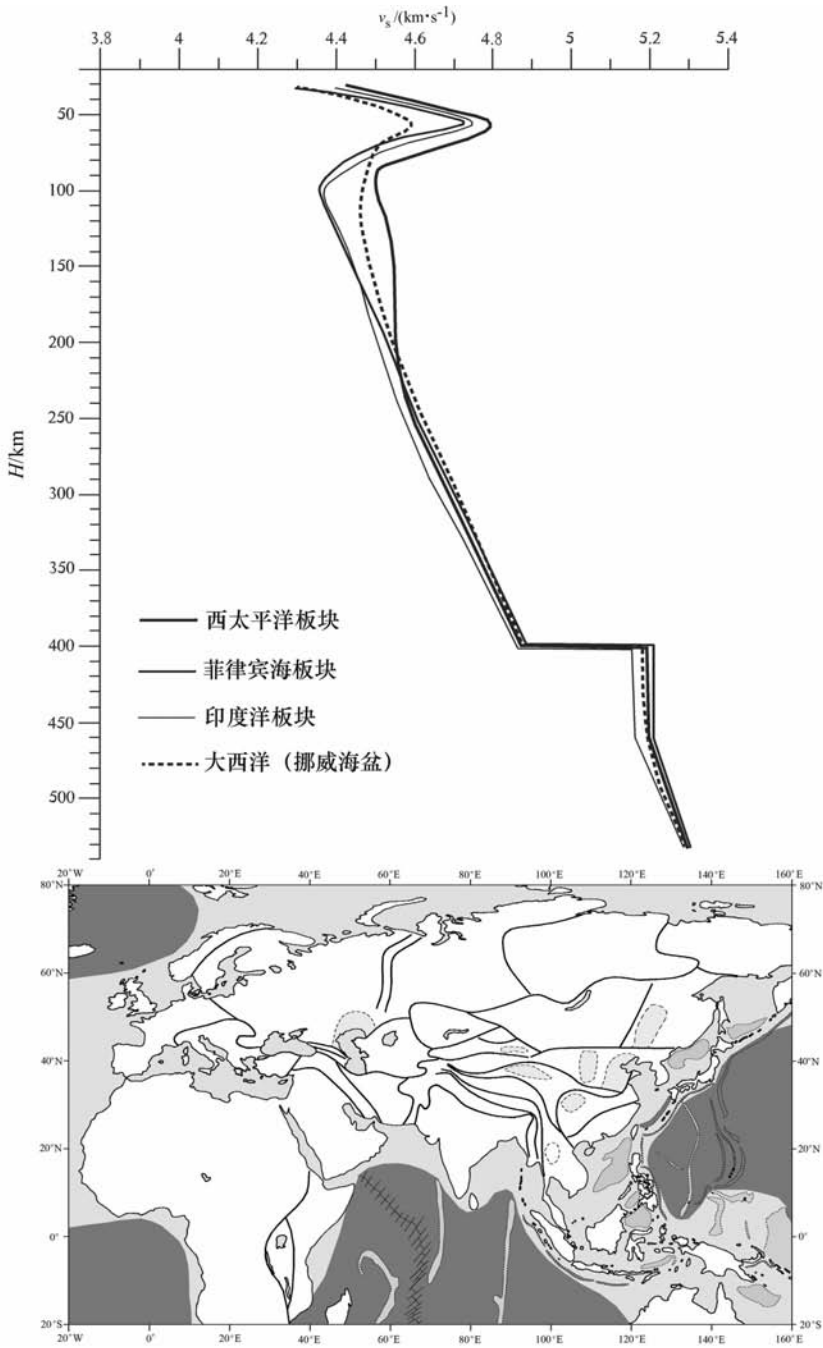


图 10 海洋板块 v_s 速度随深度变化

Fig. 10 v_s velocity distribution with depth in oceanic plates

进一步获得 $2^\circ\times 2^\circ$ (东经 $0^\circ\sim 180^\circ$, 南纬 $10^\circ\sim$ 北纬 84°)网络结点 3 524 个地壳基本数据,在此基础上,初步建立起亚欧及其边缘海地区 $2^\circ\times 2^\circ$ 地壳三维速度结构模型,编制出该区地壳厚度(莫霍界面深度图)(图 14)。

(2)天然地震面波层析成像研究

通过对欧亚大陆及其边缘海地区天然地震面波

层析成像,对 v_s 速度结构进行三维反演,建立了该区从 $0\sim 400\text{ km}$ 不同深度 v_s 速度分布图,这项研究为研究亚欧及其边缘海地区岩石圈、软流圈结构及动力学提供了重要依据。建立了欧亚大陆及边缘海地区岩石圈厚度图(图 15)。

由地壳厚度图及岩石圈厚度分布图可以看出,无论地壳及岩石圈在大陆地区均较海洋地区厚。由

表 1 欧亚大陆及边缘海地区不同类型地块岩石圈厚度与速度分布

Table 1 The lithosphere thickness and velocity for various type of blocks in Eurasia and its marginal seas

| 厚度及速度 | 分块类型 | | | | | | |
|--------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|---------|
| | 巨型克拉通 | 小型克拉通 | 陆陆碰撞地块 | 显生宙造山带 | 边缘海 | 裂谷盆地 | 海洋板块 |
| 地壳厚度(km) | 40~50 | 35~50 | 60~80 | 40~60 | 5~15 | 10~30 | 5~8 |
| 下地壳 v_s 速度(km/s) | 4.2~4.3 | 4.2~4.3 | 3.6~4.0 | 4.1~4.3 | 3.6~4.1 | 3.6~4.1 | 4.3~4.5 |
| 岩石圈厚度(km) | 200~300 | 160~220 | 160~240 | 100~140 | 50~80 | 50~80 | 40~70 |
| 岩石圈盖层速度(km/s) | 4.6~4.75 | 4.45~4.65 | 4.55~4.75 | 4.45~4.55 | 4.25~4.48 | 4.3~4.5 | 4.6~4.8 |
| 软流圈厚度(km) | <50 | 50~100 | 100 | 120~200 | 160~200 | 160~200 | 240~280 |
| 软流圈 v_s 速度(km/s) | 4.6 | 4.42~4.62 | 4.5~4.62 | 4.4~4.5 | 4.2~4.4 | 4.2~4.45 | 4.3~4.5 |

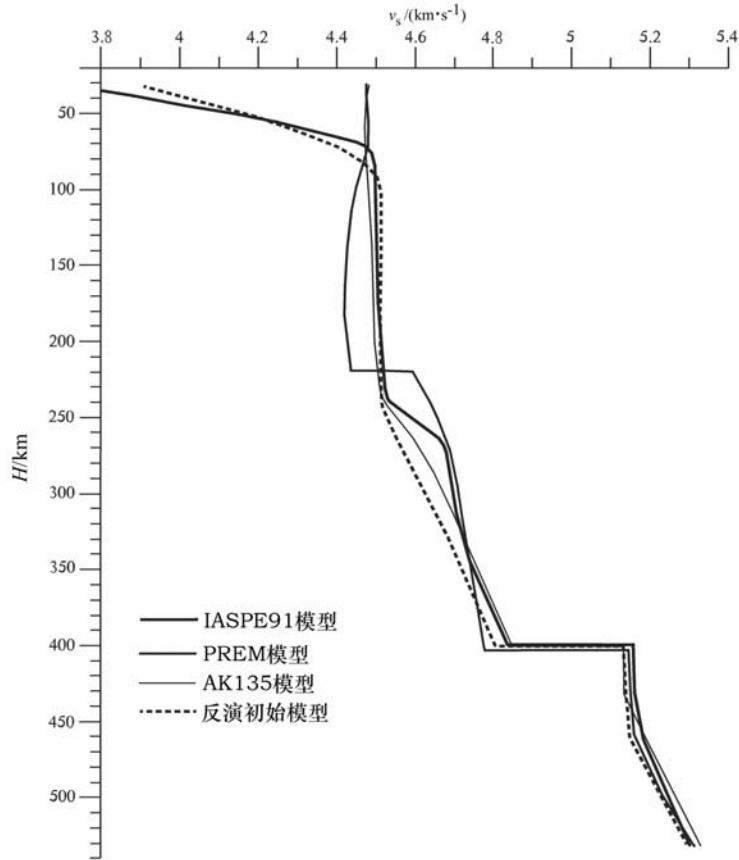


图 11 三个地球模型及初始模型的 v_s 分布图

Fig. 11 v_s velocity distribution with depth of three Earth's model and starting model

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。欧亚大陆及其边缘海地区各构造单元的地壳厚度及岩石圈厚度参见表 2。

欧亚大陆岩石圈最厚的地区分布于北部几个巨大古老的地盾及地台,即波罗的地盾(200~210 km),东欧地台(190~200 km),西伯利亚地台(180~190 km),西西伯利亚地台(160~170 km),这些都是地球上前寒武纪形成的最主要的古老陆块,在以后的地质年代里作为整体在地球表面漂移,岩石

圈内部无强烈的构造变形。

欧亚大陆岩石圈另一较厚区域是东亚及中亚地区,这是由于印度板块快速向北漂移,与欧亚大陆发生陆陆碰撞,造成以塔里木地块、扬子地块、拉萨地块、印度北部地块以及准噶尔地块、吐哈及阿拉善等地块强烈挤压拼合,形成中亚及东亚岩石圈增厚区,其厚度为 140~190 km。岩石圈增厚带还出现于地中海东部的爱琴海一带,这里是非洲板块与欧亚板块发生碰撞部位,厚度达 150 km。

岩石圈的减薄区主要位于大陆边缘及裂谷区,特别是亚洲东部边缘及西太平洋一系列边缘海。欧

表 2 欧亚大陆及其边缘海地区地壳厚度及岩石圈厚度统计表

Tables 2 Thickness of crust and lithosphere in Eurasia and its marginal seas

| 构造单元名称 | 地壳厚度 /km | 岩石圈厚度 /km | 构造单元名称 | 地壳厚度 /km | 岩石圈厚度 /km |
|-----------|-------------|--------------|----------------|-------------|--------------|
| 东欧地块 | 50 | 240 | 蒙古—贝加尔—大兴安岭构造带 | 48 | 140 |
| 西伯利亚地块 | 40 | 200 | 兴蒙地块中部 | 48 | 140 |
| 东西伯利亚造山带 | 34 | 100 | 兴蒙地块西部 | 47 | 127 |
| 西西伯利亚地块 | 38 | 180 | 兴蒙地块东部 | 35 | 98 |
| 哈萨克斯坦地块 | 42 | 200 | 日本海海盆 | 16 | 60 |
| 波罗的地盾 | 50 | 200 | 日本列岛 | 30 | 60 |
| 印度地盾 | 40 | 200 | 鄂霍次克海海盆 | 20 | 70 |
| 印度北部 | 39 | 200 | 库页岛 | 32 | 70 |
| 印度南部 | 40 | 140 | 东海及冲绳海沟 | 24 | 65 |
| 塔里木地块 | 48 | 200 | 华夏地块 | 32 | 80 |
| 上扬子地块 | 45 | 180 | 印支地块北部 | 40 | 90 |
| 华北地块西部 | 42 | 120 | 印支地块南部 | 33 | 70 |
| 鄂尔多斯地块 | 44 | 140 | 安达曼海 | 31 | 80 |
| 图兰地块 | 40 | 160 | 南海海盆 | 18 | 80 |
| 里海盆地 | 36 | 160 | 苏禄海、苏拉威西海 | 20 | 70 |
| 阿拉伯地块 | 50 | 80 | 班达海 | 18 | 72 |
| 阿拉伯海 | 12 | 70 | 西菲律宾海板块 | 12 | 90 |
| 青藏地块 | 70 | 180 | 帕拉西维亚海盆 | 10 | 70 |
| 青藏地块东北部 | 60 | 140 | 西太平洋板块 | 8 | 100 |
| 青藏地块东部 | 64 | 180 | 翁东爪哇台地 | 28 | 110 |
| 青藏地块中部 | 68 | 170 | 东加洛林海盆 | 16 | 80 |
| 青藏地块西部 | 62 | 180 | 西加洛林海盆 | 12 | 55 |
| 喜马拉雅造山带 | 60 | 170 | 婆罗洲 | 26 | 70 |
| 天山山系 | 60 | 160 | 巽他地块 | 24 | 80 |
| 昆仑山系 | 65 | 180 | 下扬子地块 | 32 | 90 |
| 伊朗地块 | 44 | 160 | 华北裂谷盆地 | 32 | 60 |
| 加里东造山带 | 40 | 120 | 红海亚丁湾 | 12 | 50 |
| 华力西造山带 | 40 | 100 | 孟加拉湾 | 20 | 80 |
| 阿尔卑斯造山带 | 30 | 130 | 印度洋 | 10 | 60 |
| 地中海西部 | 24 | 80 | 东西伯利亚海 | 20 | 70 |
| 地中海东部 | 28 | 140 | 拉普捷夫海 | 24 | 80 |
| 扎格罗斯造山带 | 50 | 120 | 喀拉海 | 30 | 140 |
| 土耳其地块 | 40 | 110 | 巴伦支海 | 32 | 180 |
| 松辽—佳木斯构造带 | 36 | 110 | | | |

洲的华力西构造带,阿尔卑斯构造带西部,地中海西部,阿拉伯板块及红海亚丁湾等也属于岩石圈减薄区。

欧亚大陆的地壳厚度分布则是另外一种格式,其最厚部分与新生代大陆块体碰撞变形有密切关系。欧亚大陆地壳增厚与印度板块和欧亚大陆碰撞有密切关系,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,其最深处可达 76~80 km,边缘区可达 40~44 km。

地壳另一增厚区为欧洲地区(包括波罗的地盾,东欧地台)。南亚及阿拉伯板块,厚度为 44~50 km。而西伯利亚及西西伯利亚地台地壳平均厚度为 36~40 km,且在大面积内厚度无变化。地壳减薄区出现于其边缘海边缘海及裂谷区,厚度仅数公里到十余 km。

岩石圈厚度分布特征:

根据 v_s 速度特征,可以划分出岩石圈与软流圈的分界线。长期稳定的巨型克拉通地块有最厚的岩石圈,其中东欧地块厚达 220~260 km。西伯利亚地块为 180~220 km,哈萨克斯坦地块厚 200~220 km 印度地盾达 180~200 km。西西伯利亚为 160~200 km。小型克拉通地块厚度 160~200 km。陆陆碰撞的青藏高原岩石圈急剧增厚,达到 220 km。

显生宙造山带岩石圈厚度为 80~120 km,如欧洲加里东构造带及华力西构造带为 80~100 km,阿尔卑斯构造带为 100~120 km。东亚边缘海及裂谷盆地普遍为 50~80 km。西太平洋海盆为 80~100 km。印度洋中脊及红海亚丁湾、东非裂谷为 40~70 km。

欧亚大陆北沿的边缘海,基本是大陆向北极海延伸的大陆架部分,因此与该区域大陆岩石圈结构

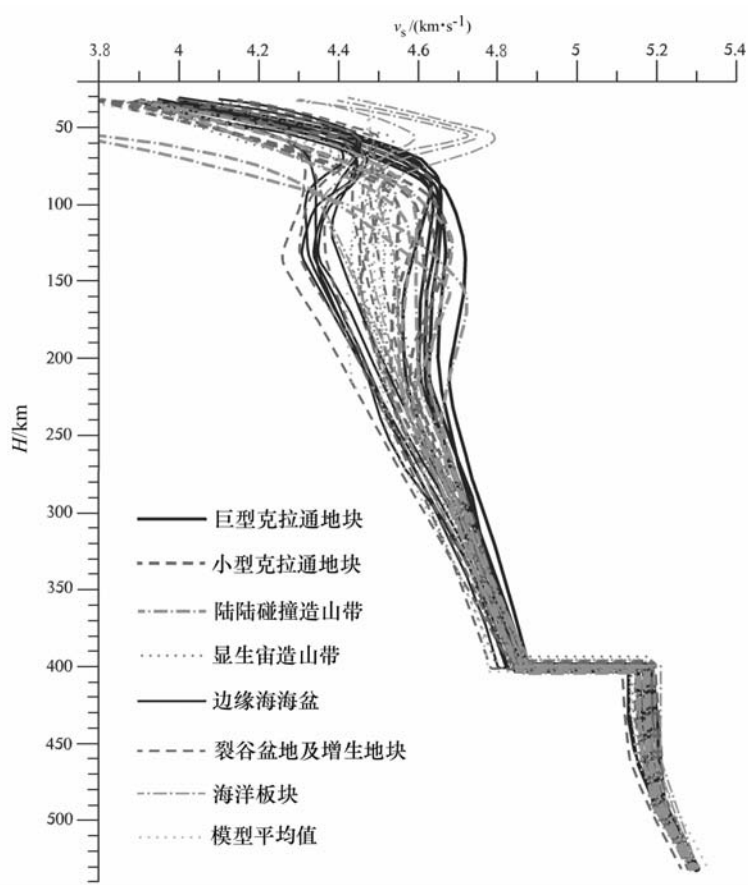


图 12 欧亚大陆及边缘海不同类型的岩石圈分块的 v_s 随深度变化综合曲线图, 灰色阴影表示速度变化范围

Fig. 12 Integrated map of v_s velocity distribution with depth in various types of lithospheric blocks in Eurasia and its marginal seas. The grey area shows the range of velocity changing

特征一致。如巴伦支海是波罗的前寒武纪地盾向海域的延伸, 岩石圈厚度达 160 km 以上。喀拉海是西西伯利亚地块向海域的延伸, 厚度达 140 km。而拉普捷夫海及东西伯利亚海则是岩石圈减薄的东西伯利亚造山带向北极海的延伸部分, 厚度为 70~80 km。

4 结论

(1) 欧亚大陆及其边缘海地区是由多个岩石圈板块或块体拼合而成, 三十多个尺度不同, 形成时代和演化特征相异的块体经历长期演化, 最后于新生代汇聚在一起。按其特征可以分为以下六类: ①前寒武纪巨型克拉通地块及地盾; ②前寒武纪小型克拉通地块及板块; ③显生宙造山带及汇聚地块; ④陆陆碰撞型地块及造山带; ⑤新生代边缘海海盆; ⑥大

陆裂谷盆地及增生地块。高分辨率地震面波层析成像, 显示同一类地块岩石圈和软流圈的速度结构十分相似, 呈现出其独有的特征。

欧亚大陆及其相邻的边缘海的面波高分辨率层析成像, 对岩石圈各块体的速度随深度变化特征进行了详细研究, 不同时代形成的岩石圈块体的速度结构有很大差异。一般而言, 前寒武纪克拉通板块及地块的岩石圈巨厚、软流圈不发育甚至不存在, 而造山带裂谷盆地边缘海的岩石圈较薄及速度较低, 有很厚的软流圈。各块体间的速度差异主要在 400 km 以上, 400 km 以下横向变化大大减小。

(2) 利用欧亚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, 编出地壳厚度图。对欧亚大陆及其边缘海边缘海进行面波高分辨率层析成像, 可以根据 v_s 波速度特征, 划分出岩石圈及软流圈的空间分布, 编出岩石圈厚度图。

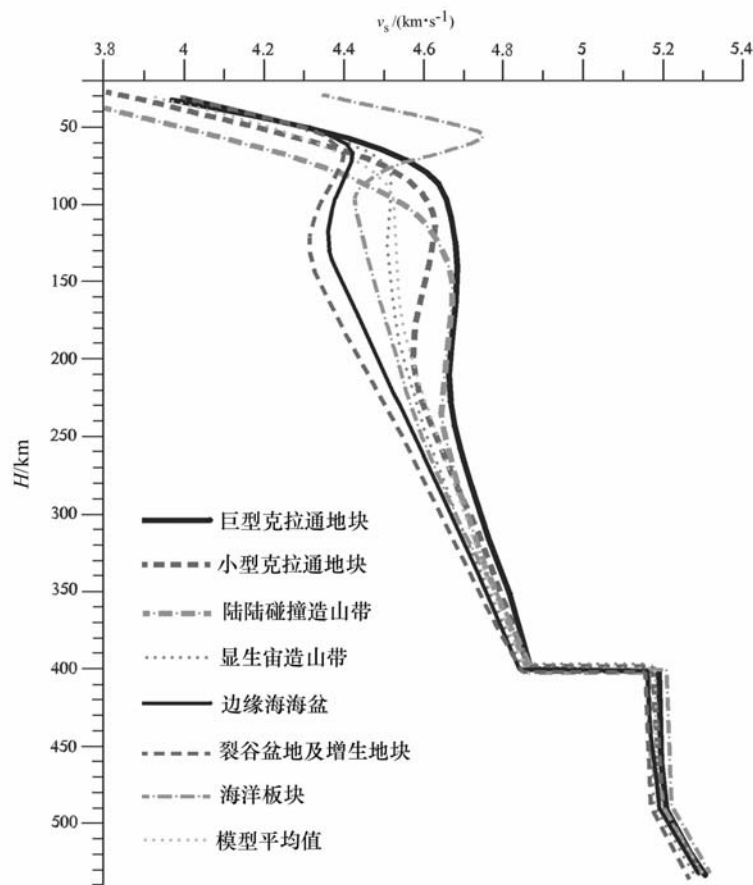


图 13 欧亚大陆及边缘海不同类型岩石圈块体 v_s 随深度变化的平均值曲线图，灰色阴影表示速度变化范围
Fig. 13 Integrated map of average v_s velocity distribution with depth in various types of lithospheric blocks in Eurasia and its marginal seas. The grey area shows the range of velocity changing

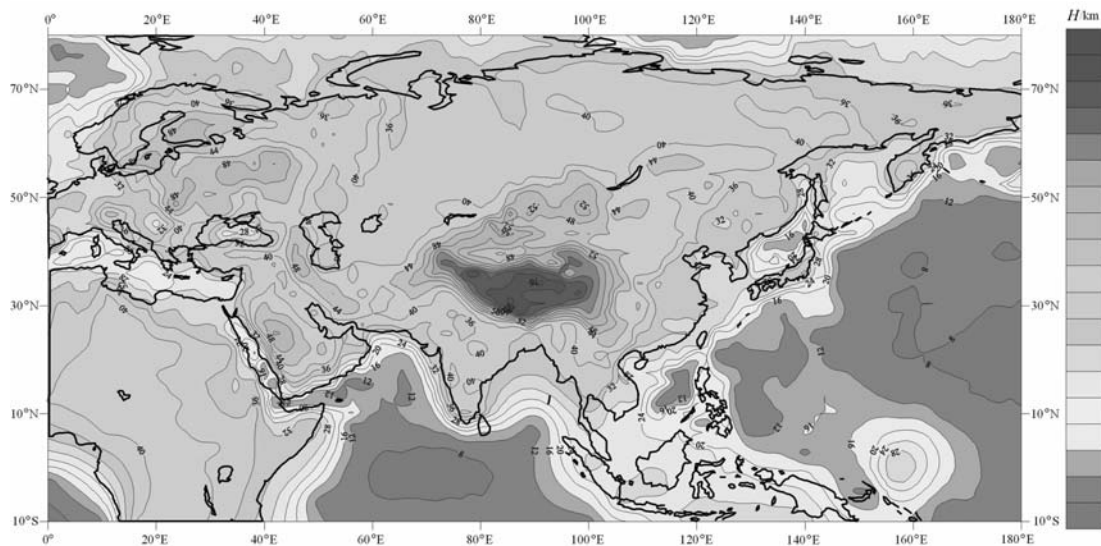


图 14 欧亚大陆及西太平洋地区地壳厚度图
Fig. 14 The crustal thickness of Eurasia and west Pacific

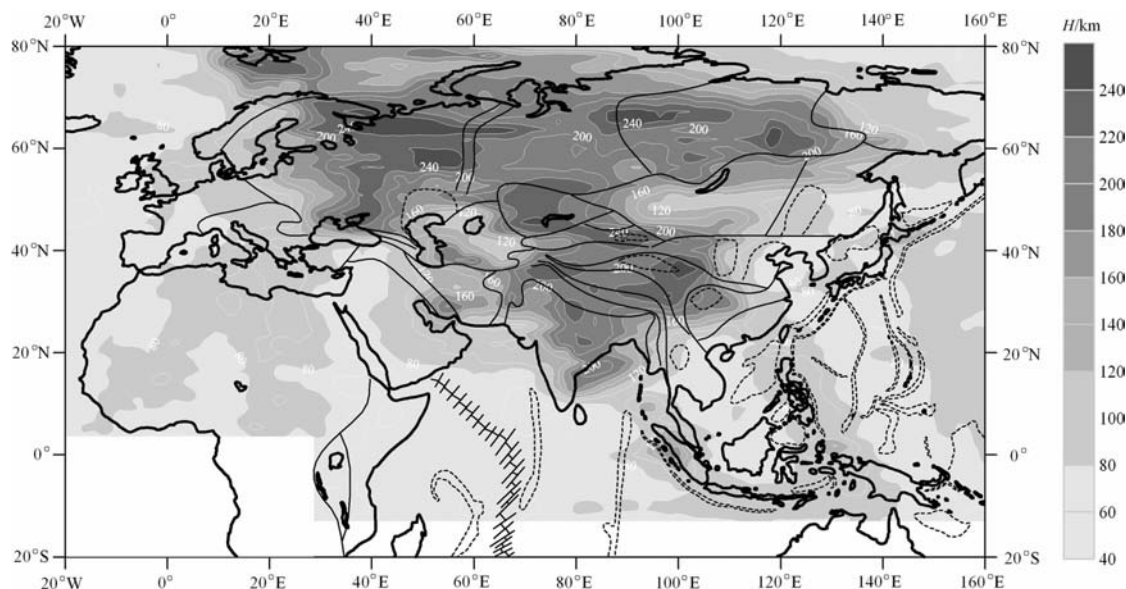


图 15 欧亚大陆及边缘海岩石圈厚度图

Fig. 15 The lithospheric thickness of Eurasia and its marginal seas

(3)一般而言,欧亚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。印度岩石圈板块向青藏高原拆沉俯冲,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),且莫霍界面十分平坦,但岩石圈十分巨厚(达 180 km)。东欧克拉通地块及波罗的地盾地壳和岩石圈均较厚。

(4)欧亚大陆及其边缘海地区岩石圈是由多个块体拼合而成,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欧亚大陆北部,大约在北纬 45°以北区域。主要由巨型前寒武纪地盾及地台组成,如波罗的地盾、东欧地台、西西伯利亚地台、西伯利亚地台等。这一区域主要属地球早期形成的劳亚古陆部分,岩石圈巨厚,地壳厚度变化很小,在构造上长期处于稳定状态。②欧亚大陆中部及南部地区,北纬 45°以南部分。这里多是古生代及中生代以来众多小型的克拉通块体(哈萨克斯坦地块、图兰地块、土耳其地块、伊朗地块、阿富汗地块、塔里木地块、中朝地块、扬子地块、青藏地块、印支地块等)与褶皱山系组成的复杂岩石

圈结构体系,岩石圈及地壳厚度横向变化大。其中特别是新生代印度板块与欧亚大陆的陆陆碰撞,形成了全球地壳最厚的青藏高原。③亚洲东缘及其边缘海,这是中生代以来发生张裂的巨型裂谷系,在新生代以来由于太平洋板块向西挤压俯冲,这一巨型裂谷系已停止张裂并转为闭合。其岩石圈大大减薄,仅数十 km。④欧亚大陆以北的北极海地区为大陆架部分,是大陆向北延伸部分,其岩石圈结构特征与相邻近的大陆是一致的。

References:

- [1] Ekström G. Mapping the lithosphere and asthenosphere with surface waves: lateral structure and anisotropy[M]//Richards M A, Gordon R G, van der Hilst R D. The history and dynamics of global plate motions. Geophys Monogr Ser AGU, Washington D. C., 2000,121:277-288.
- [2] Song Z H, Chen G Y, An C Q, et al. The 3-D structure of crust and mantle in continental China and adjacent seas[J]. Science in China: Series B, 1993, 23 (2): 180-188 (in Chinese).
- [3] Xu G M, Li G P, Wang S E, 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).
- [4] Zheng Y J, Huang Z X, Liu F T, et al. Rayleigh wave velocity and structure of the crust and upper mantle beneath the seas in eastern China[J]. Chinese J Geophys, 2000, 43(4): 480-487 (in Chinese).

- [5] Zhou B, Zhu J S, Qin Jianye. Three dimensional shear velocity structure beneath Qinghai-Tibet and its adjacent area[J]. Chinese J Geophys, 1991, 34(4): 426-441(in Chinese).
- [6] Zhu J S, Cao J M, Cai X L, et al. High resolution surface wave tomography in east Asia and west Pacific marginal sea [J]. Chinese J Geophys, 2002, 45(5): 679-698.
- [7] Zhu J S, Cao J M, Cai X L, et al. The surface wave tomography and structure of lithosphere in Eurasia and west Pacific[M]//Advance of continental seismology and geophysics of Earth interior study. Beijing: Seismological Press, 2004 (in Chinese).
- [8] Calcagnile G, Panza G F. Crust and upper mantle structure of the Mediterranean area derived from surface wave data[J]. Phys Earth Planet Inter, 1990, 60: 163-168.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Huang Z, Su W, Peng Y, et al. Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions[J]. J Geophys Res, 2003, 108 (B2): 2073.
- [12] Lebedev S, Nolet G. Upper mantle beneath Southeast Asia from S velocity tomography[J]. J Geophys Res, 2003, 108 (B1): 2048.
- [13] Maceira M, Taylor S R, Ammon C J, et al. High-resolution Rayleigh wave slowness tomography of central Asia[J]. J Geophys Res, 2005, 110: B06304, doi: 10. 1029/ 2004JB003429.
- [14] Pasyanos M E. A variable resolution surface wave dispersion study of Eurasia, North Africa, and surrounding regions[J]. J Geophys Res, 2005, 110: B12301, doi: 10. 1029/ 2005JB003749.
- [15] Priestley K, Debayle E, McKenzie D, et al. Upper mantle structure of eastern Asia from multimode surface waveform tomography[J]. J Geophys Res, 2006, 111: B10304, doi: 10. 1029/2005JB004082.
- [16] Ritzwoller M H, Levshin A L. Eurasian surface wave tomography: group velocities [J]. JGR, 1998, 103 (B3): 4839-4878.
- [17] Ritzwoller M H, Levshin A L, Ratnikova L I, et al. Intermediate-period group-velocity maps across Central Asia, western China and parts of the Middle East[J]. Geophys J Int, 1998, 134: 315-328.
- [18] Wu F T, Levshin A L. Surface-wave group velocity tomography of East Asia[J]. Phys Earth Planet Inter, 1994, 84: 59-77.
- [19] Yanovskaya T B, Kozhevnikov V M. 3D S-wave velocity pattern in the upper mantle beneath the continent of Asia from Rayleigh wave data[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2003, 138: 263-278.
- [20] Zhang Y S, Lay T. Global surface wave phase velocity variations[J]. J Geophys Res, 1996, 101: 8415-8436.
- [21] Bhundell D, Freeman R, Mueller St. The European geotraverse[M]. Cambridge University Press, 1992: 275.
- [22] Eugeni Working Group. The European geotraverse seismic refraction experiment of 1986 from Genova, Italy, to Kiel Germany[J]. Tectonophysics, 1990, 176: 43-57.
- [23] Eurobridge Seismic Working Group. Seismic velocity structure across the Fennoscandia-Sarmatia suture of the East European Craton beneath the EUROBRIDGE profile through Lithuania and Belarus[J]. Tectonophysics, 1999, 314: 193-217.
- [24] Eurobridge Seismic Working Group. EUROBRIDGE'95: deep seismic profiling within the East European Craton[J]. Tectonophysics, 2001, 339: 153-175.
- [25] Du Z J, Michelini A G, Panza F. EurID: a regionalized 3-D seismological model of Europe[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1998, 105: 31-62.
- [26] Ritzwoller M H, Barmin M P, Villasenor A, et al. Pn and Sn tomography across Eurasia to improve regional seismic event locations[J]. Tectonophysics, 2002, 358(1-4): 39-55.

参考文献:

- [2] 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辑, 1993, 23(2): 180-188.
- [3] 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.
- [4] 郑月军, 黄忠贤, 刘福田, 等. 中国东部海域地壳—上地幔瑞利波速度结构的研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(4): 480-487.
- [5] 周兵, 朱介寿. 青藏高原及邻近区域 S 波三维速度结构[J]. 地球物理学报, 1991, 34(4): 426-441.
- [6] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 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.
- [7] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 欧亚大陆及西太平洋面波层析成像及岩石圈结构[M]//大陆地震学与地球内部物理学研究进展. 北京: 地震出版社, 2004: 346-358.