

中国及邻区瑞利面波高分辨率层析成像 及其地球动力学意义

朱介寿 曹家敏 严忠琼

(成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要:用分布于欧亚大陆及西太平洋地区 106 个宽频带数字地震台站约 2 万多个长周期波形记录, 挑选出沿 10600 条大圆路径传播的瑞利面波, 采用频散分析及波形拟合反演方法, 对中国及相邻地区地壳上地幔进行高分辨率三维层析成像。瑞利面波高分辨率速度成像表明, 从上地壳到 70 km 深, 在东亚东部及西太平洋边缘海地区均为高速分布, 西部以青藏高原为中心呈极低速分布。从 100~250 km 深, 在东亚东部及西太平洋边缘海, 自北向南显示出一条宽 2500~4000 km, 长约 8000 km 的巨型低速异常带。在深度 300~400 km 的平面图上, 速度差异幅度不大, 塔里木—扬子地块仍然显示为高速分布。东西两部分岩石圈与软流圈的结构有着巨大的差异。西部主要是印度板块与欧亚板块碰撞引起的岩石圈汇聚增厚区, 东部则主要是由于软流圈上涌(地幔热物质上升)引起的岩石圈拉张减薄区。古新世印度与欧亚大陆的碰撞汇聚, 岩石圈板片以低角度下插到青藏高原之下, 引起高原隆起和地壳增厚, 西部地区成为岩石圈汇聚区。中生代中晚期东亚大陆东缘岩石圈解体, 软流圈物质上涌, 岩石圈减薄张裂, 形成巨型低速带, 并演化为东亚裂谷系。现今的西太平洋边缘海、沟弧盆体系是新生代中晚期太平洋板块、澳大利亚板块与欧亚板块相互作用形成的。

关键词:中国及邻近陆域海区; 瑞利面波层析成像; 岩石圈结构与动力学; 东亚巨型裂谷系

中图分类号: P541 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2007)05-0759-09

1 引言

瑞利波是由非均匀平面波 P 及 SV 叠加合成, 沿地球表面传播且很少衰减的强能量波。面波在传播过程中发生频散, 其频散特性与层状介质的物理结构有关。利用面波频散可以对地球深部介质的性质及结构进行研究。

从 20 世纪 50 年代起, 就开始利用地震面波研究地壳上地幔结构, 当时由于资料及反演方法的限制, 只能获得大范围的水平层状或一维圈层结构。到 20 世纪 80 年代中期, 由于全球宽频带数字地震仪台网的建立, 极大地拓展了面波研究地球结构的深度和精度。地震波层析成像技术的引进和发展, 进入了用面波研究地球三维结构的时期。

20 世纪 80 年代用面波层析成像获得的全球地幔三维速度模型, 仅能获得低分辨率的速度结构, 可以反映大陆地盾、海洋中脊等大型构造特征^[1-8]。随着数字地震仪资料的积累,

90 年代用面波研究地球三维结构的分辨率得到了较大提高, 其横向分辨率可达到数百至 1000 km^[9-25]。

利用面波频散进行区域性三维结构层析成像研究有宋仲和等^[2]利用 298 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, Feng^[5]利用 10°×10°网格对欧亚大陆横波速度结构的反演, 周兵^[3]、滕吉文^[13]对中国区域性面波的反演, Friederich 对东亚大陆面波及横波速度反演^[18], Huang 对中国及邻区的面波成像^[19]以及 Ritzwoller, et al 对欧亚大陆面波群速度反演^[21-22]。吴大铭等对中国及邻区的 Rayleigh 速度的反演^[23]。

Ekström 等用 55000 条路径对 Rayleigh 及 Love 波解速度全球分布进行反演^[17, 18], 其球谐展开系数达到 40 阶, 其横向分辨率可达到 500 km。张禹胜等^[14, 24-25]用约 18000 条面波传播路径, 将全球按 5°×5°网格划分, 对周期 85~250 s 的 Love 及 Rayleigh 相速度分布进行反演, 这些速度异常除与大

收稿日期: 2007-03-26; 改回日期: 2007-05-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40234047、49734150)、国土资源部专项计划(20001010)、高等学校博士学科点专项科研基金(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资助。

作者简介: 朱介寿, 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 从事深部地球物理研究; E-mail: zhujies@cdu.edu.cn。

陆地盾、海洋中脊、活动构造区等相关外,还与海底年龄、热点分布有明显关系。

用面波研究地壳上地幔三维速度结构目前主要有两种方法。一是频散曲线反演方法,它假设面波沿大圆路径传播测定相速度或群速度频散曲线,再得到各网格的纯路径频散曲线,然后反演地震波三维速度结构。二是近年来发展起来的面波波波形反演方法,该方法可对基阶和高阶面波波波形直接反演三维速度结构^[7-8]。随着计算能力的提高和众多数字台网的建立,该方法已从理论阶段走向实际应用阶段,它充分利用波形记录中丰富的信息,研究地壳上地幔精细结构。

东亚(包括中亚南亚)大陆是晚古生代(250~230 Ma)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)快速汇聚形成的^[3,5,6,8,10]。自中生代(150 Ma)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大的构造与岩浆活动、岩石圈由原来的 150~200 km 减薄到 50~70 km。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(2500 km)及隆升(5000 m),冈瓦纳古陆岩石圈板片的大规模俯冲与拆沉,岩石圈叠加增厚(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。

在中新世(为 15~20 Ma),由于欧亚大陆受印度板块继续向北及北北东方向推挤,东亚地区向东运移,太平洋板块向西扩张俯冲,东亚岩石圈由扩张转为挤压,东亚裂谷进一步转化为沟弧盆系,在西太平洋形成一系列边缘海。

中国及邻近陆域海区复杂的地壳地幔结构,是和地球深部(特别是地幔部分)结构与动力过程有密切关系。因此,建立地壳地幔内部的三维结构图像,研究其横向变化及深部动力过程,对了解大陆及边缘海形成及演化,地表构造与深部结构的关系有着重大意义。

笔者利用新一代国内外数字地震台站资料,利用瑞利面波频散作高分辨率层析成像,对中国及邻近地区岩石圈速度结构进行研究,并讨论其动力学意义。

2 资料处理及反演方法

为用地震面波的频散特性和波形来研究中国及邻近陆域海区的岩石圈三维结构,笔者搜集了分布于欧亚大陆及西太平洋区域(0°E~180°E,40°S~80°N)的宽频带数字地震仪(包括 CDSN,GDSN,DWWSSN,GEOSCOPE 及中国数字地震台网)记录。这些地震事件为 1982—2006 年,震级 5.0~7.0,震源深度小于 100 km。地震事件的震源参数(包括震中、震源深度、中心矩张量 CMT)来自美国哈佛大学和国际地震中心(ISC)通报。

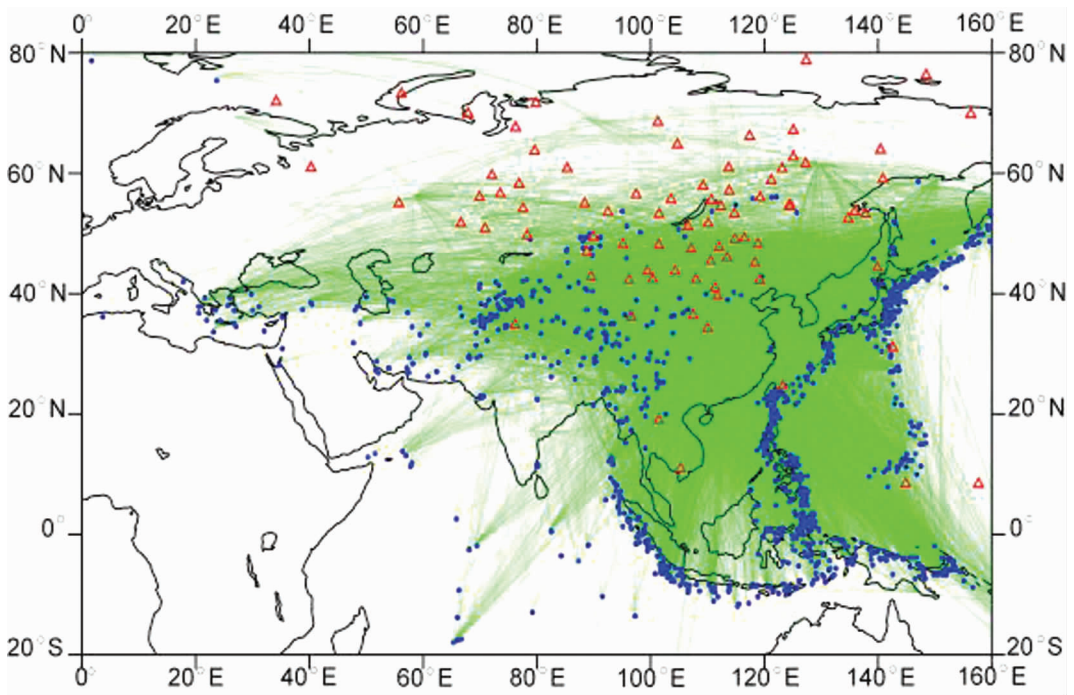


图 1 面波大圆路径及地震震中、台站分布
(图中点表示地震震中,三角形表示台站)

Fig.1 Great circle path propagation of surface waves and distribution of stations and epicenters
(the dot stands for the epicenter and the triangle stands for the station)

对上述数字地震台网中 106 个地震台约 20000 个三分向长周期数字化记录进行搜集,采样率为每秒 1 个样点。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 8~250 s 10400 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东亚(包括中亚及东南亚)及西太平洋边缘海,大圆路径及地震震中、台站分布见图 1。

用面波频散数据进行速度层析成像分两步计算,第一步对研究区域分为 $1^\circ \times 1^\circ$ 或 $2^\circ \times 2^\circ$ 的网格单元求纯路径频散群速度值。对于第 i 条路径,可求出它在第 i 个网格单元内的长度 d_{ij} 以及大圆路径总长度 D_i 。根据上述理论,假定该大圆路径的总相移为各均匀网格单元相移之和,而网格边界上无相移。所以第 i 条路径的理论群速度 $V_i(T)$ 为

$$\frac{1}{V_i(T)} = \sum_{j=1}^n \frac{d_{ij}}{D_i} \frac{1}{v_j(T)} \quad (1)$$

如果第 i 条路径实测的群速度为 $U_i(T)$,而待求的第 $j(j=1,2,\dots,n)$ 个网格单元内的区域纯路径群速度值为 $u_j(T)$,同理可得

$$\frac{1}{U_i(T)} = \sum_{j=1}^n \frac{d_{ij}}{D_i} \frac{1}{u_j(T)} \quad (2)$$

两式相减,可得出第 i 条路径实测群慢度与理论群慢度之差

$$\frac{1}{U_i(T)} - \frac{1}{V_i(T)} = \sum_{j=1}^n \frac{d_{ij}}{D_i} \left(\frac{1}{u_j(T)} - \frac{1}{v_j(T)} \right) \quad (3)$$

写成矩阵形式如下:

$$[\mathbf{b}]_{\text{next}} = [\mathbf{A}]_{\text{next}} \cdot [\mathbf{X}]_{\text{next}} \quad (4)$$

其中, \mathbf{b} 是慢度残差向量, \mathbf{A} 是网格单元内射线长度 d_{ij} 与大圆路径总长度 D_i 比值的大型稀疏矩阵, \mathbf{X} 是待求的各网格单元群慢度之差向量。用 LSQR 方法求解矩阵方程(4)得到的每个网格单元纯频散数据,第二步利用 SVD 方法等广义线性反演方法,对每一网格单元的纯频散曲线进行反演求取该单元的 S 波速度随深度的分布。

作为面波频散反演结果的改进,以提高层析成像分辨率,笔者还进行了面波波形反演,直接从波形信息中求解地球内部结构。Nolet 等提出一种新的面波波形反演方法,即分块波形反演法(PWI 法)。采用振型叠加计算理论地震图,通过对面波波形的拟合,先计算震源与台站之间的路径平均地壳、上地幔模型,再把该模型当作对整个区域速度结构的约束,通过引入正交基函数反演整个区域的地壳、上地幔三维速度结构。

3 三维 S 波速度层析成像

研究区大陆与海底构造略图如图 2 所示^[26-28]。由瑞利面波频散及波形反演得到的中国及邻近陆域海区 S 波三维速度分布如图 3 所示。

将面波反演得到的 400 km 以上不同深度的 S 波速度从地壳、岩石圈地幔、软流圈和过渡带几个层次的速度分布

特征进行对比分析。

15~70 km 深度,主要反映地壳(青藏高原)及地壳和上地幔顶部(青藏高原以外区域)的速度分布特征。

海域中印度洋区域呈较高速分布,西太平洋边缘海及太平洋地区总体上呈高速分布,其中海洋板块在 40 km 深度高速特征最为突出。

对比高分辨率速度成像及构造图表明,自地球上层到 70 km 深度,东亚(包括俄罗斯远东地区,中国东北、华北、华南)、南亚(印度板块)及西太平洋板块和边缘海(鄂霍次克海、日本海、菲律宾海)均为高速分布。西部(以青藏高原为中心)为低速分布区。从土耳其、伊朗、兴都库什、喜马拉雅山、缅甸、印尼群岛提斯缝合碰撞带,显示为低速异常。沿大兴安岭—太行山—武陵山有一条十分清晰的速度分界线(与中国东部重力梯级带位置吻合)。现分述如下:

(1)在深度为 15 km 的平面图上,西太平洋及日本海、菲律宾海、南海等边缘海,以及印度洋海域均呈现高速。大陆地区在 104°E 以东区域(西伯利亚地区、中国华北、华南),以及哈萨克斯坦、印度板块出现高速外,其他如帕米尔、阿富汗、兴都库什、青藏高原、蒙古高原、孟加拉湾、婆罗洲等均为低速区。

在深度 40 km 的平面图上,青藏高原显示大范围的低速异常,其周边区域出现更大范围的低速带,它表明青藏高原的中下地壳 S 波速度很低,而且低速物质已向北、向东弥散到周边区域的下地壳中,中亚的乌兹别克斯坦、蒙古—大兴安岭地块为低速分布。扬子地块、华夏地块、中朝地块东部、东北及俄罗斯远东地区高速带呈北北东向分布,其西侧速度急剧下降,与大兴安岭、太行山、武陵山重力梯级带相一致,这表明分布于亚洲东部的重力异常带的物质密度差异来自上地幔。印度次大陆、印度支那地块、西伯利亚、哈萨克斯坦出现较高速。西太平洋及日本海、菲律宾海、南海等边缘海,以及印度洋海域仍然呈现高速。

深度为 70 km 的平面图上,青藏高原仍为低速异常,但范围已大大缩小。东部地区仍为高速分布。塔里木、上扬子、大兴安岭及中朝地块有较高速分布。

在 70 km 深度,菲律宾海板块与太平洋板块速度分布有明显差异。菲律宾海重要特点是岩石圈速度较太平洋高。而菲律宾海板块中;以九州帛琉海岭为界,将此海盆分为 2 个不同速度区域,西菲律宾海盆形成时间较早(60~35 Ma),具有较高的密度和弹性,所以西菲律宾海盆岩石圈速度明显较高,帕里西维拉海盆形成时间较晚(30~17 Ma),速度明显较低。菲律宾海盆内北西向构造线也很清晰,显示出早期扩张及后期挤压的动力学痕迹。沟为界,其东边的太平洋板块在地壳和岩石圈地幔(深至 70 km)都呈现为高速。大洋、海沟、岛弧、俯冲带的界限清晰。

(2)在 85~200 km 深度,速度分布有明显变化。其最大特征是亚洲东部(俄罗斯远东地区,中国东北、华北、东南沿海地区),黄海、东海,西太平洋边缘海(包括千岛海盆、日本

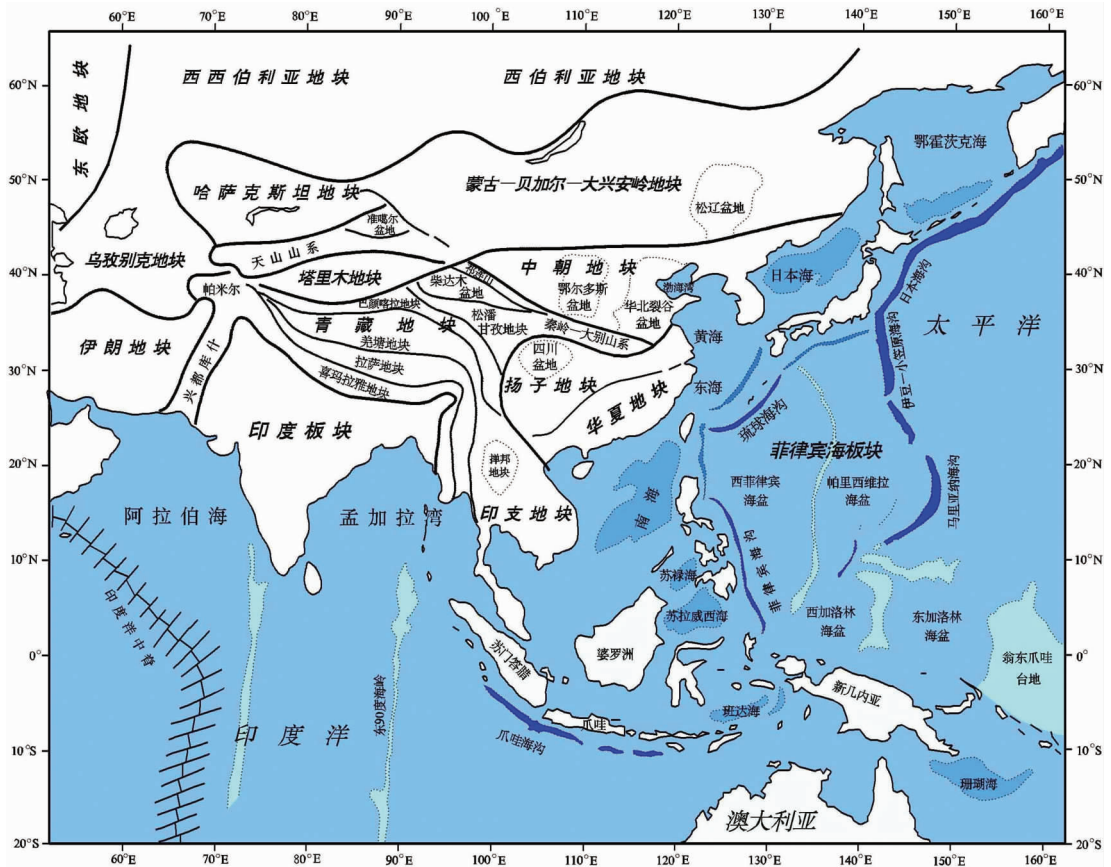


图2 东亚及西太平洋地区构造略图

Fig.2 Tectonic sketch map of East Asia and the Western Pacific

海、菲律宾海、冲绳海槽、南海、苏禄海、苏拉威西海、班达海)及婆罗洲等,自北向南显示出一条宽 2500~4000 km,长约 10000 km 的低速异常带。这一低速异常带清晰显示了东亚裂谷系和西太平洋边缘海的深部速度结构,表明这一上地幔有巨厚的低速层。

其余地区,如中亚的乌孜别克地块、哈萨克斯坦地块,以及西伯利亚板块、印度板块等均呈高速分布。此外,太平洋板块也出现较高的速度分布。沿日本伊豆、小笠原群岛马里亚纳海沟(西太平洋俯冲带)出现高速异常带。

蒙古—贝加尔—大兴安岭地块是中古生代增生于西伯利亚克拉通地块的造山带,其速度分布仍呈较低速度分布。

在 130~200 km 深度,青藏地块为高速分布,其速度可与印度板块、扬子、塔里木等地块相比。表明青藏高原岩石圈地幔部分为较冷的和高速的克拉通地块,从历史演化来看,应该是年代达 2~2.5 Ga 以上的冈瓦纳古陆板片俯冲到高原以下 130~200 km 深度。

卡洛林海盆速度较低,表明它形成较晚。以千岛海沟、日本海沟及小笠原—马里亚纳海沟为代表。

(3)270~400 km 深度,这一深度范围已达低速层(软流圈)底部,进入软流圈以下相对稳定的上地幔底层。速度横向

变化已不明显,整体表现为较高速度分布。在 270 km 深度,沿千岛、日本海、伊豆—小笠原—马里亚纳海沟,以及冲绳、菲律宾海沟板片,出现向西俯冲的各带状高速异常明显。

深度为 320~400 km 平面图上,速度差异幅度变小,且大部分为较高速度分布。印度、西太平洋出现高速带,塔里木至扬子地块一带有较高速度分布。

南海及婆罗洲,苏禄海、苏拉威西海高分辨率图像显示岩石圈仅 60~80 km 厚,岩石圈盖层、软流层的速度较低,软流层厚度可达 200 km 以上。此外,红河断裂带可能一直沿北西至南东向通过南海海盆延长到菲律宾,它不仅将扬子地块与印支地块分开,而且将南海海盆分为南北两部分。

4 速度成像的意义及主要结论

中国及邻近陆域海区的高分辨率瑞利面波层析成像,从浅到深反映了岩石圈及软流圈的速度结构。不同深度速度分布特征有很大不同,表明这一陆域海域深部结构有很大变化,其主要结论如下:

(1)地块速度特征及岩石圈厚度

自晚古生代以来,东亚大陆及相邻区域拼合的各个块体(哈萨克斯坦地块、印度板块、塔里木地块、中朝地块、扬子地

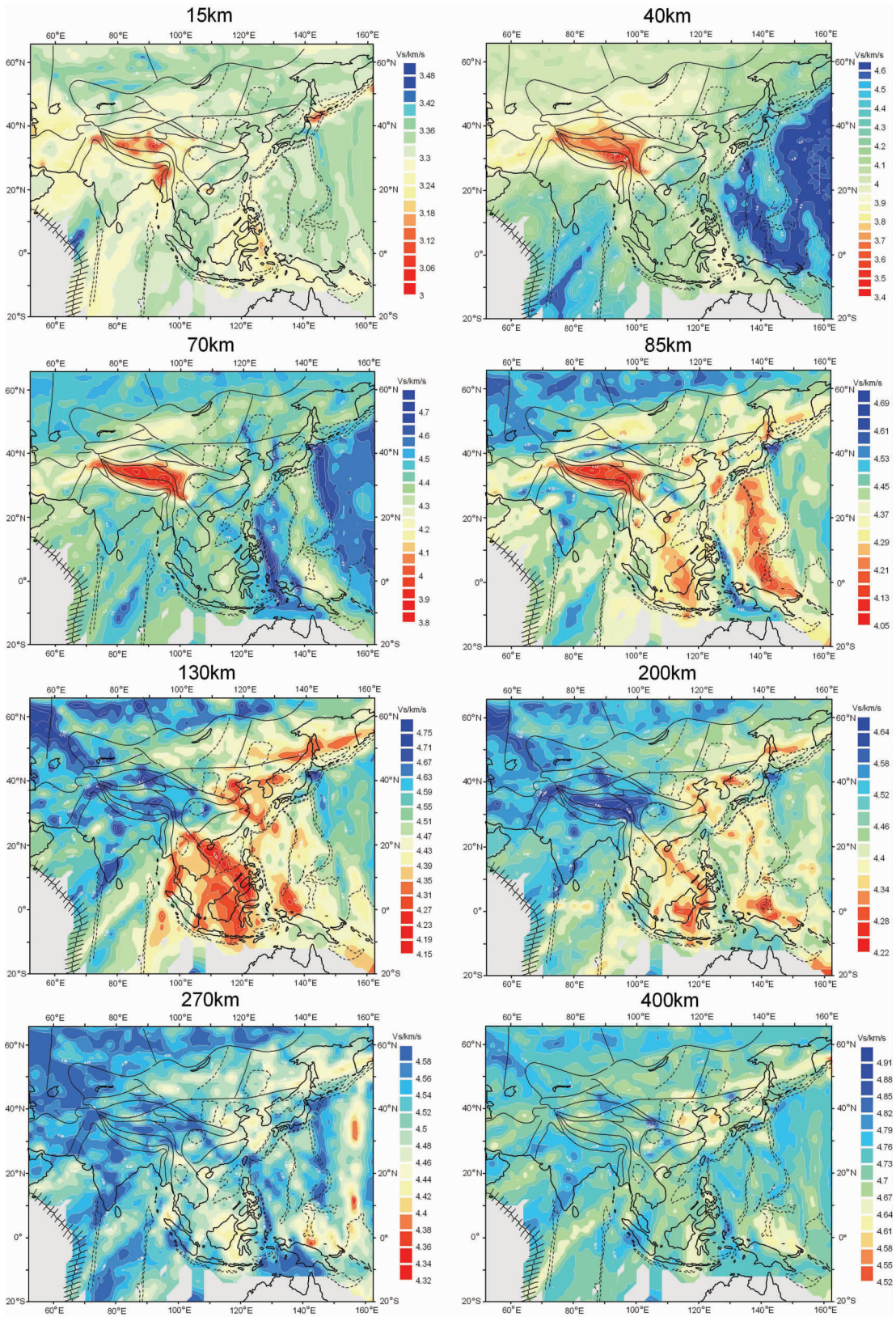


图 3 中国及邻近陆域海域 S 波三维速度分布

Fig.3 3D S-wave velocity distribution in China and its adjacent land and sea areas

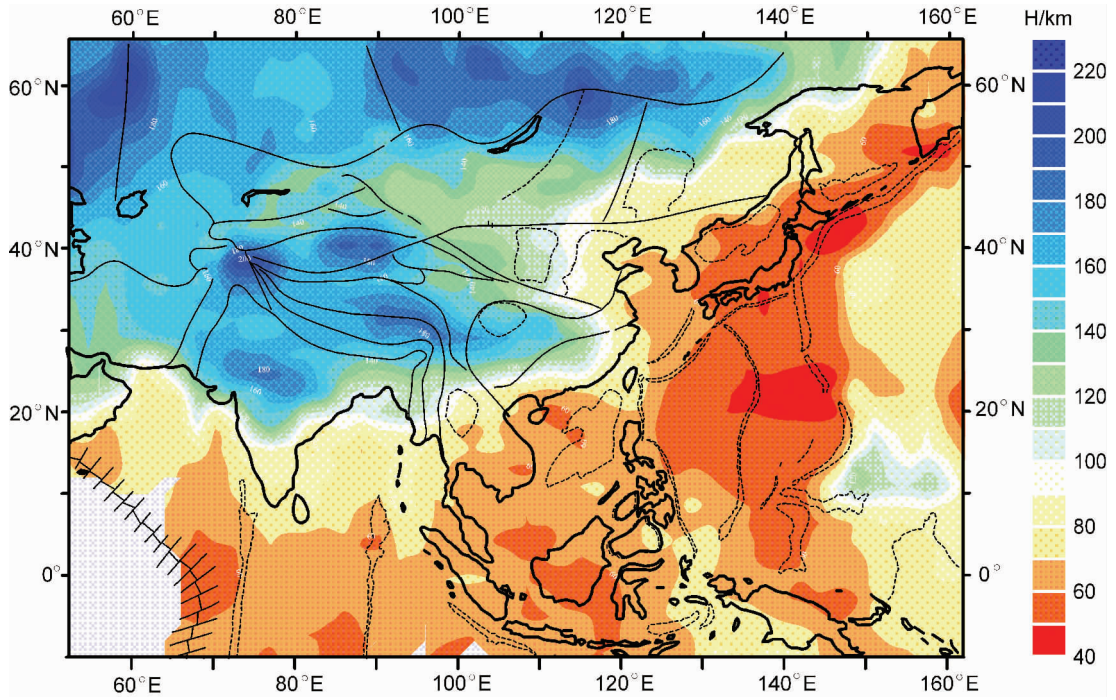


图4 东亚及西太平洋地区岩石圈厚度图

Fig.4 Isopach map of the lithosphere in East Asia and the Western Pacific

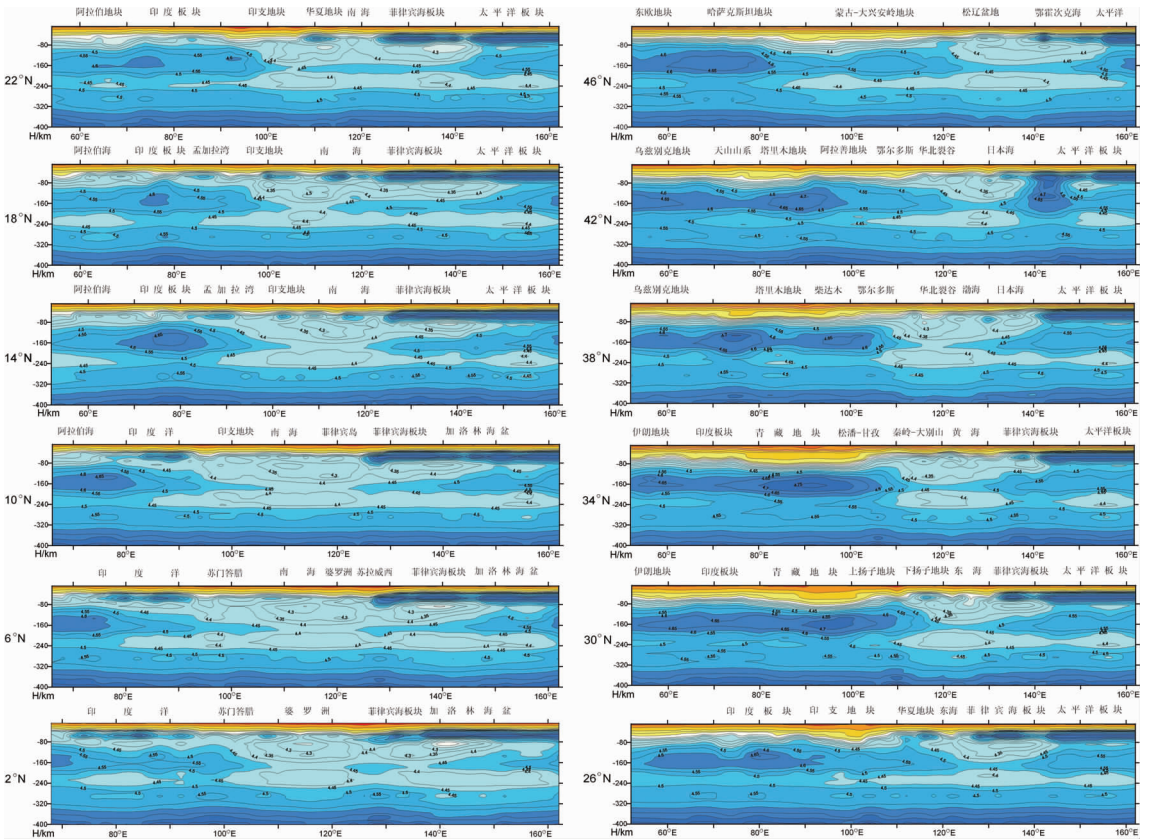


图5 东亚地区巨型上地幔低速异常带

Fig.5 Giant low-velocity anomaly zone of the upper mantle in East Asia

块、印度支那地块以及青藏地块)的岩石圈的速度分布均有独立的显示。塔里木、中朝、扬子、印度等地台或地盾区,岩石圈呈高速分布。青藏地块除地壳部分速度异常低外,其岩石圈盖层也呈高速显示。西太平洋边缘海也具有独立的速度分布特征。

各块体的岩石圈厚度变化较大(图4),厚岩石圈(厚度达150 km以上)主要分布在塔里木地块、扬子地块、印度次大陆等区域。这些厚岩石圈一般具有高速分布,其下层的软流圈不发育,它们是大陆上的克拉通区(地台或地盾)。减薄的岩石圈主要出现在大陆裂谷或张性盆地(如松辽及华北沉降带),以及造山带(华南褶皱带、秦岭、大别山、蒙古、外贝加尔造山带),岩石圈厚度仅70~100 km。

从印度次大陆到西藏的中南部以及塔里木、扬子地块等都具有较厚地幔根,高速的地幔根可以延伸到150 km甚至200 km的深度,都是自寒武纪以来固结的克拉通地块,但其规模较北美、西伯利亚、澳大利亚等克拉通要小得多。

(2) 东亚巨型上地幔低速异常带

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85~250 km深度出现巨型上地幔低速异常带(长约8000 km,宽2500~4000 km),如图5所示。一般称为东亚西太平洋边缘海巨型低速带。岩石圈厚60~80 km,具有明显的极低速软流圈,它们与西太平洋边缘弧后盆地的地幔浅部上升热流有关,构成上地幔中的热室。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。

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,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,西太平洋边缘海的地幔软流圈物质为富含钾、钙、铅、锶同位素,表明西太平洋板块俯冲带已将地壳物质成分卷入地幔。岩石圈减薄,构造侵蚀及岛弧消融作用,多期弧后扩张是这一地区新生代以来的主要事件。

(3) 欧亚板块与印度板块的陆陆碰撞

欧亚板块与印度板块的陆陆碰撞,使印度次大陆岩石圈板片以低角度下插到西藏高原之下,具有克拉通特性的地幔根,地壳部分发生剧烈形变,引起地壳增厚与高原隆升,是塑性板片叠加与地幔流相互作用的结果。东亚大陆各地块也都显示岩石圈板片碎块的俯冲、仰冲,及相互碰撞、叠加在一起的动力过程,形成现今东亚众多的造山带。

(4) 拼合的岩石圈结构特征

中国及邻近陆域海区岩石圈是古生代由多个块体拼合而成,中新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(图4),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。

②青藏高原岩石圈汇聚增厚区:是印度板块与欧亚板块碰撞汇聚的增厚区。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。

③中亚及中国西北华南岩石圈稳定区: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、菲律宾海的巨型上地幔低速带,是中新代欧亚大陆东缘岩石圈开裂减薄,陆块分离软流层上涌形成的。

参考文献(References):

- [1] 冯锐,朱介寿,丁韞玉,等.利用地震面波研究中国地壳结构[J].地震学报,1981,3(4):335-350.
Feng Rui, Zhu Jieshou, Ding Wenyu, et al. Study the crustal structure in China by using the seismic surface wave[J]. Seismological J. 1981, 3(4):335-350(in Chinese with English abstract).
- [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),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 (Series B), 1993, 23(2):180-188(in Chinese).
- [3] 周兵,朱介寿,秦建业.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.
Zhou Bin, Zhu Jieshou, Chun Kin-Yip. Three dimensional shear velocity structure beneath Qinghai-Tibet and its adjacent area. Chinese Journal of Geophys, 1991, 34(4):426-441(in Chinese with English abstract).
- [4] 朱介寿.全球地幔三维结构模型及动力学研究新进展[J].地球科学进展[J].1996,11(5):421-431.
Zhu Jieshou. The recent development of three-dimensional models and geodynamics of the earth's mantle [J]. Advance in Earth Sciences, 1996,11(5):421-431(in Chinese with English abstract).
- [5] 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.
- [6] Nakanishi I, Anderson D L. Worldwide distribution of group velocity of mantle Rayleigh waves as determined by spherical harmonic inversion[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1982, 72:1185-1194.
- [7] Snieder R, Nolet G. Linearized scattering of surface waves on a spherical Earth[J]. J. Geophys., 1987, 61:55-63.
- [8] Snieder R. Large-scale waveform inversions of surface waves for

- lateral heterogeneity, 2, Application to surface waves in Europe and the Mediterranean[J]. *J. Geophys. Res.*, 1988, 93:12067-12080.
- [9] 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.
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 Geophys*, 2002, 45(5):646-664(in Chinese with English abstract).
- [10] 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 3-D S-wave quality factor of the crust and Upper Mantle in China [J]. *Chinese J. Geophys*, 2003, 46 (5):642-651 (in Chinese with English abstract).
- [11] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 欧亚大陆及西太平洋边缘海岩石圈结构[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(3):387-391.
Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Cai Xuelin, et al. The structure of lithosphere in Eurasia and west Pacific [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(3):387-392(in Chinese with English abstract).
- [12] 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):387-392(in Chinese with English abstract).
- [13] 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.
Teng Jiwen, Hu Jiafu, Zhang Zhongjie. The 3-D structure of Rayleigh wave and sedimentary basins in the Northwest China [J]. *Chinese Journal of Geophys*, 1995, 38(6):737-749(in Chinese with English abstract).
- [14] 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, 40:181-192.
Zhang Yushen, Ma Shizhuang. Global surface wave phase velocity variations and their tectonic implications [J]. *Chinese Journal of Geophys*, 1997, 40(2):181-192(in Chinese with English abstract).
- [15] Cao Xiaolin, Zhu Jieshou, Zhao Lianfeng, et al. Three dimensional shear wave velocity structure of crust and upper mantle in South China Sea and its adjacent regions by surface waveform inversion [J]. *Acta Seismol. Sinica*. 2001, 23(2):113-124.
- [16] Ekström G. J, Tromp J E, Larson W F. Measurements and global models of surface wave propagation [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102: 8137-8158.
- [17] Ekstrom G. Mapping the lithosphere and asthenosphere with surface waves: Lateral structure and anisotropy the History and Dynamics of Global Plate Motions in [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.
- [18] Frieridich 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.
- [19] Huang Z, W Su, Y. Peng, et al. Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(B2): 2073.
- [20] Nakamura Y, Shibutani T. 3-D shear wave velocity structure in the upper mantle beneath the Philippine Sea [J]. *Earth Planets Space*, 1998, 50:939-952.
- [21] Ritzwoller M H, Lavelly E M. Long period surface waves and mantle boundary undulations [J]. *Geophys. J. Int.*, 1994, 116:205-216.
- [22] Ritzwoller M H, Levshin A L. Eurasian surface wave tomography: Group velocities [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, 83:4839-4878.
- [23] Wu F, Levshin A. Surface wave tomography of East Asia. *Phys. Earth Planet [J]. Inter.*, 1994, 84:59-78.
- [24] Zhang Y S, Tanimoto T. High-resolution global upper mantle structure and plate tectonics [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98:9793-9823.
- [25] Zhang Y S, Lay T. Global surface wave phase velocity variations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101:8415-8436.
- [26] 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.
- [27] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 从全球看中国大地构造—中国及邻区大地构造图简要说明 [M]. 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 Guide to the Tectonic Map of China and Adjacent Regions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999(in Chinese).
- [28] 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).

High-resolution Rayleigh surface wave tomographic imaging of China and adjacent regions and its geodynamic implications

ZHU Jie-shou, CAO Jia-min, YAN Zhong-qiong

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

Abstract: Rayleigh surface waves propagating along 10,600 great-circle paths were selected using more than 20,000 long-period waveform records from 106 wide-band digital seismic stations distributed in Eurasia and the Western Pacific, and high-resolution 3D tomographic imaging of the crust and upper mantle in China and its adjacent regions was performed using the inversion of both dispersion analysis and waveform fitting. The high-resolution Rayleigh surface wave tomographic imaging indicates that: from the upper crust to 70 km depth, high velocities are displayed in the eastern part of East Asia and Western Pacific marginal seas, while very low velocities distributed in the western region centering around the Qinghai-Tibet Plateau; from the 100 to 250 km depth, a giant low-velocity anomaly belt ~250 to 400 km wide and ~8000 km long are shown in the eastern part of East Asia and Western Pacific marginal seas; from the 300 to 400 km depth, there is no appreciable velocity difference and high velocities are still displayed from the Tarim block to Yangtze block. There exist significant differences in lithospheric and asthenospheric structure between the eastern and western parts with longitude 110° E as the boundary. The western part is the lithospheric thickening convergent region formed by India-Eurasia collision, whereas the eastern part the lithospheric extension-thinning region arising from upwelling of asthenospheric material (rise of mantle thermal material). Due to the Paleocene India-Eurasia collision and convergence, the Indian lithospheric sheet was subducted beneath the Qinghai-Tibet Plateau at low angles, causing the plateau uplift and crustal thickening; thus the western part became a lithospheric region. In the Mid-Late Mesozoic, the lithosphere beneath the eastern margin of the East Asian continent was disassembled; as a result, the asthenospheric material upwelled and the lithosphere underwent extension and thinning, thus forming a giant low-velocity zone, which later evolved into the East Asian rift system. The present marginal seas and trench-arc-basin system of the Western Pacific was formed by interaction of the Pacific plate, Australian plate and Eurasia plate in the Mid-Late Cenozoic.

Key words: China and adjacent land and sea areas; Rayleigh surface wave tomographic imaging; lithospheric structure and dynamics; giant East Asian rift system

About the first author: ZHU Jie-shou, born in 1936, male, professor and director of Ph.D students of Chengdu University of Technology, engaged in deep geophysical research; E-mail: zhujs@cdut.edu.cn.