

文章编号: 1009-3850(2003)02-0090-05

利用体波层析成像技术研究 欧亚及邻区地幔三维速度结构

程先琼, 朱介寿, 蔡学林

(成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要: 根据体波层析成像技术, 利用大量走时数据, 做出 $0^{\circ} \sim 180^{\circ} \text{E}$, $30^{\circ} \text{S} \sim 90^{\circ} \text{S}$ 范围内 $0 \sim 2889 \text{km}$ 深的三维速度分布图像, 得到欧亚地区局部区域岩石圈及地幔的高分辨率速度结构, 并从地球动力学角度出发对这些成像结果做进一步解释。

关键词: 体波层析成像; 三维速度结构; 地球动力学

中图分类号: P542⁺.5

文献标识码: A

地球物理学家和地球化学家们对地球内部结构及物质组成的研究做了大量的探索。在地球物理学领域, 地震波是最主要信息来源。在目前可利用的信息载体中, 只有地震波才能完全穿透地球深部(地幔及地核), 从而带回地球深部物质结构、物质成分、物理状态、温度、压力、物质流动等信息。据最新的资料研究, 推断地幔全球范围的对流形成了两个超级下降地幔柱和一个上升地幔柱, 而超级下降地幔柱所对应的高速异常就分布在中亚及东亚^[1~4]。

笔者搜集了最新的地震体波走时资料, 综合多学科、多手段的研究成果, 建立欧亚地区地幔的高分辨率体波速度结构。这对于研究各圈层的相互关系及深部动力过程、了解欧亚大陆形成及演化、地表构造与深部结构的关系、地幔对流及地幔柱模式等地学基础问题不仅有重大理论意义, 而且有现实意义。本文主要目的在于建立欧亚地区三维体波速度图像, 并从地球动力学角度对这些成像结果做初步解释。

1 地震体波层析成像以及球坐标系下三维射线追踪原理

体波走时层析成像的基本原理就是利用速度分布和体波走时的倒数之间的线积分关系, 根据走时残差或差分走时来反演地球内部(尤其是深部)的速度结构。

对于三维地球速度模型, 体波正演是通过射线追踪来实现的。由于笔者研究的对象是具有球体性质的地球, 因此推导球坐标系下射线追踪的公式具有很大的实用性。梁春涛^[5](2000, 东亚及邻区地震体波层析成像, 硕士论文)从波动方程出发, 在高频近似(0 阶级数解)条件下得到程函方程, 进而得到射线传播的矢量方程组, 将矢量方程在曲线坐标系下离散化, 最终得到曲线坐标系下离散的射线追踪系统:

$$\begin{cases} \frac{dr}{ds} = v^{-1} \\ p_j = \frac{d\tau}{dx^j} \\ \frac{dx^i}{ds} = v G^{ij} p_j \\ \frac{dp_i}{ds} = -\frac{1}{v^2} \frac{\partial v}{\partial x^i} + v \Gamma_{ij}^k G^{ji} p_j p_k \end{cases}$$

其中： τ —相位函数； v —体波速度； s —射线路径； p_j —慢度矢量的第 j 个分量； G_{ij} —协变量矩阵； Γ_{ij}^k —第二类 Christoffel 符号；

3 欧亚地区成像及结果分析

基于以上原理, 利用搜集到的 ISC 报告1964 ~ 1997年约700万条走时数据、未包含在 ISC 中国内台站的约 70 万条走时数据以及新搜集到的1993 ~ 1998年东北(黑龙江、辽宁、吉林)台站走时数据, 分别做出具有代表性深度(35km、70km、120km、470km、530km、660km、760km、1250km、1400km、2000km、2200km和2889km)欧亚及邻区成像结果平面图, 分析其特点(参照东亚西太平洋地区构造分区图^[6]):

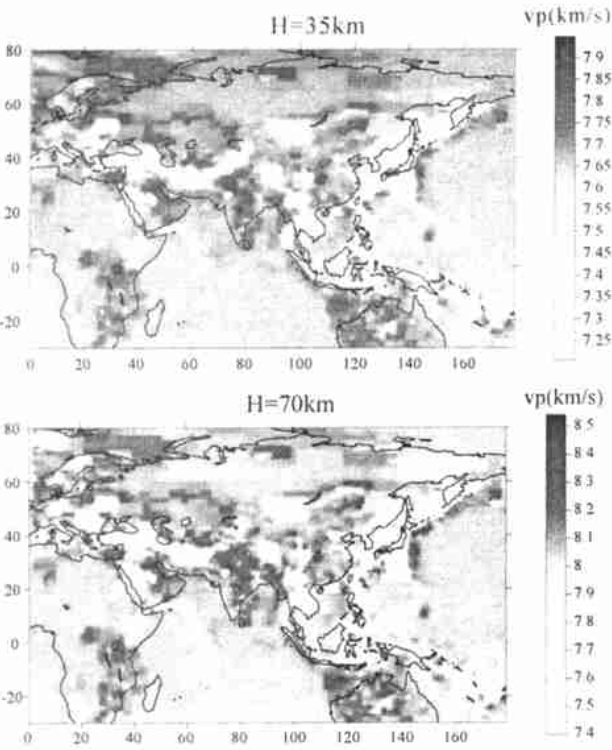


图1 欧亚 35km 和 70km 深度速度平面图
Fig.1 Velocity plan of the Eurasian area at the depths of 35 km and 70 km

(1) 在深度为 35 ~ 70km 的平面图上(图 1), 西太平洋及日本海、菲律宾海、南海等边缘海, 以及东欧地块—地中海—伊朗地块为两个相对低速带, 欧亚大陆主体部分、非洲板块西南以及澳洲板块体波速度相对较高;

(2) 在深度为 120 ~ 470km 的平面图上(图 2), 速度变化总体趋势与(1)类似, 即西太平洋边缘海速度相对低, 但另外一个低速带范围扩大到北欧地区, 并分为两支, 一支低速带是东欧地块—地中海—伊朗地块—印度半岛, 另一支低速带是红海-东非裂谷区域。欧亚大陆主体部分及澳洲地块仍为相对高速, 非洲板块西南速度相对较高, 但幅度不及(1)大。

(1)、(2)的这种趋势表明西太平洋边缘海已进入软流圈。表明欧亚大陆西部克拉通地块以及岩石圈汇聚区存在较厚的岩石圈, 而在西太平洋边缘海地区岩石圈拉张减薄, 致使原来巨厚的脆性岩块发生断裂拆沉, 出现巨厚的软流圈^[6]。

(3) 在深度为 530 ~ 660km 的平面图上(图 3), 速度变化总体趋势与(1)、(2)相反, 即西太平洋边缘海速度相对较高, 欧亚大陆大部分地区速度相对较低。

(4) 在深度为 760 ~ 1250km 的平面图上(图 4),

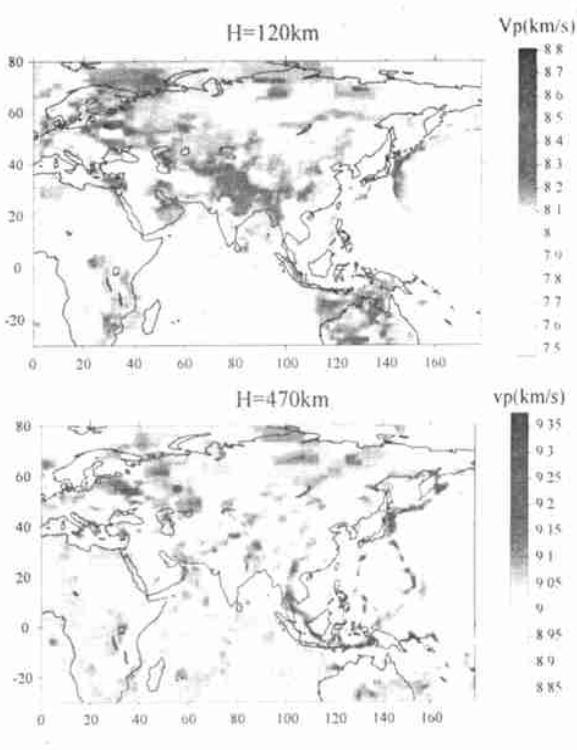


图2 欧亚 120km 和 470km 深度速度平面图
Fig.2 Velocity plan of the Eurasian area at the depths of 120 km and 470 km

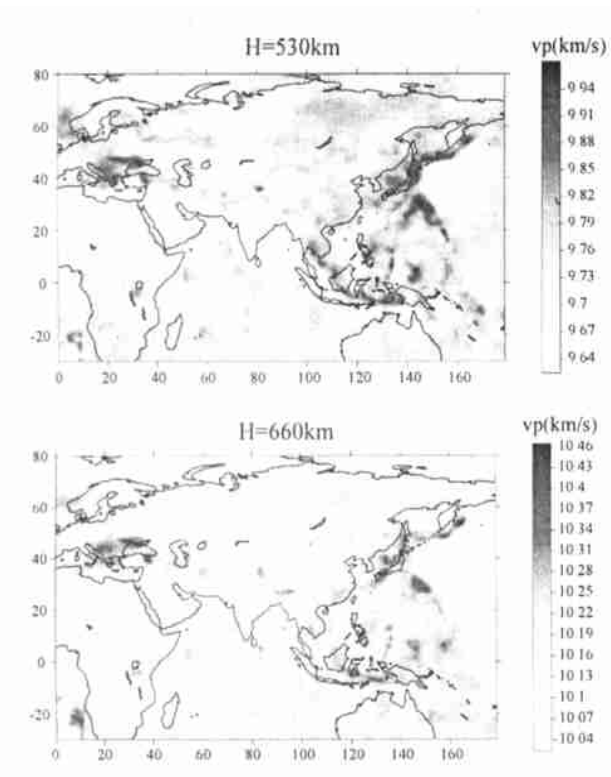


图3 欧亚 530km 和 660km 深度速度平面图

Fig.3 Velocity plan of the Eurasian area at the depths of 530 km and 660 km

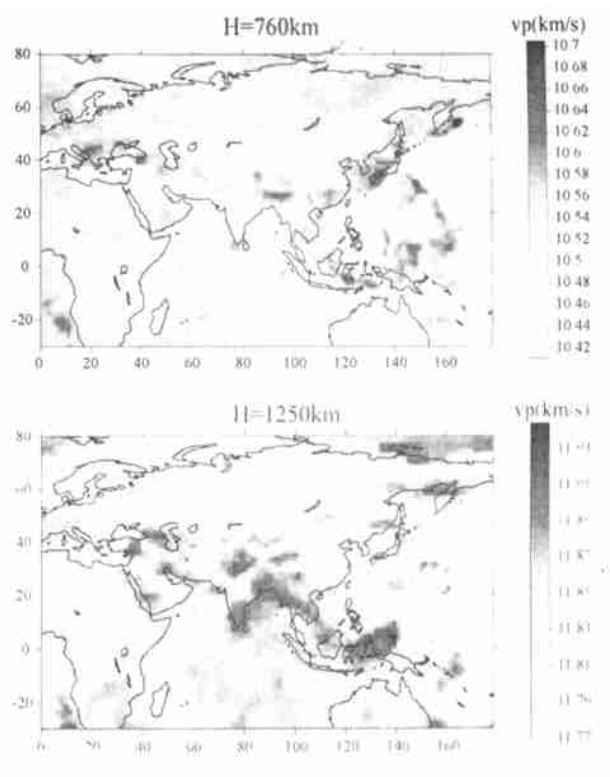


图4 欧亚 760km 和 1250km 深度速度平面图

Fig.4 Velocity plan of the Eurasian area at the depths of 760 km and 1250 km

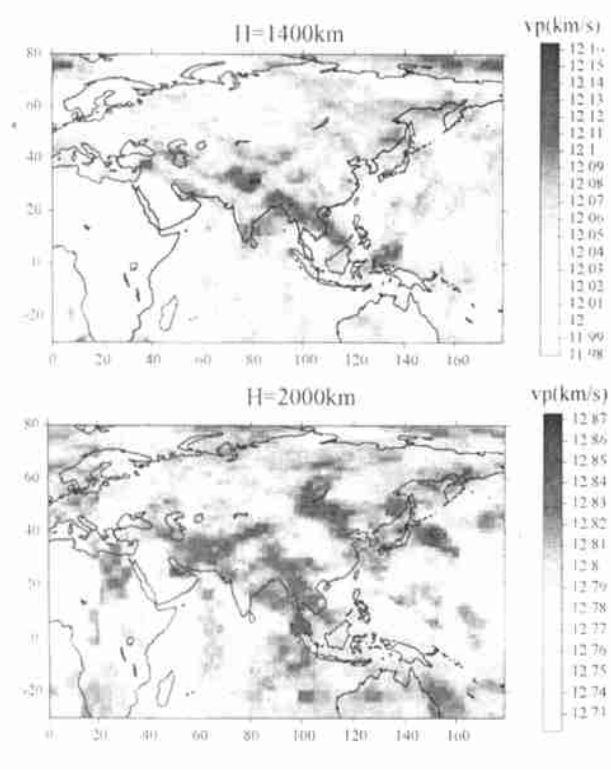


图5 欧亚 1400km 和 2000km 深度速度平面图

Fig.5 Velocity plan of the Eurasian area at the depths of 1400 km and 2000 km

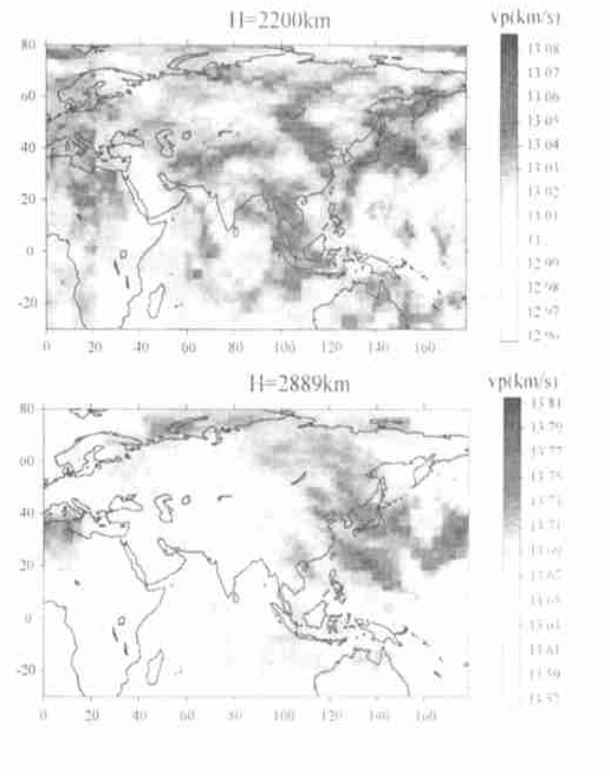


图6 欧亚 2200km 和 2889km 深度速度平面图

Fig.6 Velocity plan of the Eurasian area at the depths of 2200 km and 2889 km

西太平洋边缘海仍现出高速异常。另外,伊朗地块、印度地块、印支地块、部分菲律宾海板块表现出明显的高速异常。

(5) 在深度为 1400~2000km 的平面图上(图 5),西太平洋边缘海没有明显的速度异常,伊朗地块—印度地块—印支地块仍为显著的高速异常带;

(6) 在深度为 2200~2889km 的平面图上(图 6),高速块体由分散分布逐渐汇集到兴蒙地块—华北地块—菲律宾海地块—太平洋板块—日本海围成的高速区域,有可能是不同高速块体从各个方向俯冲而汇聚到核幔边界。

欧亚地区的地震高分辨率层析成像结果,从浅到深反映了岩石圈、软流圈及下地幔的三维速度结构。横向上大体以 60°E 、 110°E 为界,纵向上以 70~85km、520~530km 为界,中部与东、西部速度图像差异很大。这表明东亚地区的东部以及边缘海地区,与东、西部地区的构造演化与地球动力学过程是十分不同的。

自从新生代初印度与欧亚大陆的碰撞以来(约 55Ma),一个增厚的岩石圈(140~180km)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,使其岩石圈缩短了约 2500km,岩石圈缩短增厚的主要方式为分层楔入及叠加。青藏高原岩石圈具有刚性的克拉通性质(温度较低、变形较小),在体波层析图上呈高速分布,相反高原邻区地壳呈低速分布,可能与其变形及壳内温度升高,引起物质部分熔融及流变等因素有关。

从鄂霍次克海、千岛海盆,经日本海和我国的东北、华北、华南地区、冲绳海沟,到我国南海、菲律宾海,出现巨型上地幔低速异常带(长约 8000km,宽约 2500~4000km),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不同,却与太平洋中脊、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。

4 结 论

笔者利用体波层析成像研究的成果和利用面波资料反演得到相似的结论,使用面波成像能更深入地刻画岩石圈及软流圈变化,体波技术能反映出至下地幔的结构特征。对欧亚地区的成像结果进行分析,初步得到以下几点结论:

(1) 欧亚及邻区不存在统一的地幔根,岩石圈分为若干块体甚至碎片,各块体的岩石圈、软流圈厚度

及速度值差异很大。

(2) 在欧亚及邻区以 60°E 、 110°E 为界,纵向上以 70~85km、520~530km 为界,东部和西部与中部的图像有很大差异,岩石圈、软流圈以及下地幔的结构也存在显著不同。此界线中部区域主要是印度板块与欧亚板块碰撞汇聚引起的岩石圈增厚区,东、西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。当东、西部进入软流圈越 100km,而中部地区仍然在岩石圈,因此中部地区岩石圈比东、西部厚 100km 左右,软流圈的厚度分布正好相反,中部地区软流圈一般不发育,而东、西部地区软流圈厚度平均比中部厚 100~140km。

(3) 古新世印度与欧亚大陆的碰撞以来,印度次大陆岩石圈板片以低角度下插到青藏高原之下,在青藏高原及中亚地区形成增厚的岩石圈大陆根。青藏高原岩石圈地幔具有克拉通特性,在体波层析图上呈高速分布。高原隆升地壳增厚发生剧烈形变,地壳内部物质发生部分熔融及物质流变,在体波层析图上呈低速分布。当进入到软流圈及下地幔时,青藏高原地区的速度反而比周围地区速度要低。

(4) 东亚东部及西太平洋边缘海巨型低速带与东太平洋中脊、大西洋中脊和印度洋中脊的岩石圈、软流圈速度结构特征十分相似。其构造演化可能经过以下过程(梁春涛,2000):中生代中晚期亚洲大陆岩石圈解体,软流层上涌,岩石圈减薄张裂,形成巨型裂谷系。现今的西太平洋弧沟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。

(5) 在上地幔偏上部(深度小于 530km),整个欧亚板块都显示为高速异常,反映出了欧亚大陆根,表明大陆岩石圈相对于海洋岩石圈有较高速。

(6) 在中地幔(900km~1800km),一条由北向南东展布的构造带(包含了特提斯带)非常明显,该构造带从地中海、红海,经喜马拉雅山、缅甸弧一直到印度尼西亚。这个构造带由特提斯洋闭合时海洋顶板向欧亚板块俯冲,较冷物质下沉引起。

(7) 在下地幔,中国大陆东部及邻近海域为高速异常,而东非裂谷和西印度洋区域为大片的低速带。在下地幔底部(深度 $>2200\text{km}$),速度不再呈碎块状变化,有可能是不同高速块体从各个方向俯冲而汇聚到核幔边界而形成大范围的高速异常。

(8) 在核幔边界附近,地震波速度减小,表明受高温地核的影响较大,高速异常区集中在欧亚的东北区域。从岩石圈到下地幔,中亚及东亚都呈高速

异常, 该区域有可能存在一个超级下降地幔柱。

参考文献:

[1] 朱介寿, 等. 研究地壳上地幔结构的地震体波计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 1988.

[2] 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, 1996, 11(5): 421— 431.

[3] 刘福田, 曲克信, 吴华, 等. 中国大陆及其邻近地区的地震层析成像[J]. 地球物理学报, 1989, 32(3): 281— 291.

[4] 宋仲和, 庄真. 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.

[5] 梁春涛, 雷建设. 球坐标系下三维射线追踪原理和应用[J]. 物化探计算技术, 2001, 23(3): 199— 205.

[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(4): 646— 664.

The 3-D velocity structures of the Eurasian mantle based on the body wave tomography

CHENG Xian-qiong, ZHU Jie-shou, CAI Xue-lin
(*Faculty of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*)

Abstract: About 7 000 000 travel time data for 1964—1997 from ISC were used to construct the images of the 3-D velocity distribution within the context of 0°—180°E and 30°S—90°S at the depths from 0 km to 2 889 km, and the images of the high-resolution velocity structures of the lithosphere and mantle in the Eurasian area. The results of research show that: (1) the high-velocity anomalies appear in the upper part of the Upper Mantle (depth<530 m) throughout the Eurasian plate, suggesting an Eurasian continental root and a higher velocity of the continental lithosphere than that of the oceanic lithosphere in this part of the mantle; (2) the NW—SE-trending Tethyan tectonic zone is observed in the Middle Mantle (at the depths of 900—1 800 km); (3) the high-velocity anomalies occur in eastern China and its neighbouring sea areas, while the low-velocity anomalies appear in the East Afria rift and western Indian Ocean, and (4) the decreasing seismic wave velocities at the core-mantle boundary indicate a stronger effect of high temperatures of the core.

Key words: body wave tomography; 3-D velocity structure; geodynamics