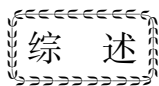


臧绍先, 周蕙兰, 魏荣强. 2008. 中国地幔结构及物性研究的进展. 地震学报, 30(5): 525-532.

Zang Shaoxian, Zhou Huilan, Wei Rongqiang. 2008. Study on structure and physical property of the mantle in China. *Acta Seismologica Sinica*, 30(5): 525-532.



## 中国地幔结构及物性研究的进展<sup>\*</sup>

臧绍先<sup>1),\*</sup> 周蕙兰<sup>2)</sup> 魏荣强<sup>1,2)</sup>

1) 中国北京 100871 北京大学地球与空间科学学院

2) 中国北京 100049 中国科学院研究生院地球科学学院

**摘要** 对 2004—2007 年中国地球物理学家在地幔内部结构和物质性质方面的研究工作进行了总结. 对地幔结构的地震波速度成像, 地幔介质的各向异性, 地幔间断面, 地幔对流, 以及地幔介质物性进行了综述, 指出了各方面的主要内容, 使用的主要方法和主要结果. 从这 4 年的研究可以发现, 一些原有的研究领域工作更加深入, 方法更加先进, 而且进行了广泛的国际合作, 合作的范围也逐渐扩大, 方式多样, 并出现了一些新的研究方向.

**关键词** 地幔结构 地幔物质性质 地幔间断面 地幔对流 波速各向异性

**文章编号:** 0253-3782(2008)05-0525-08 **中图分类号:** P315.2 **文献标识码:** A

### Study on structure and physical property of the mantle in China

Zang Shaoxian<sup>1),\*</sup> Zhou Huilan<sup>2)</sup> Wei Rongqiang<sup>1,2)</sup>

1) Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871, China

2) College of Earth Science, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Studies on structure and physical property of Earth's mantle done by Chinese geophysicists from 2004 to 2007 are reviewed in this report. It mainly contains the seismic velocity structure of the mantle, mantle anisotropy, mantle discontinuities, mantle convection and physical property of mantle. The review concerns mainly with the contents, the methods used and the results obtained. New progress in the study on structure and physical property of mantle has been made in the last 4 years in China; In some preexistent areas much progress has been made, advanced methods have been adopted, extensive international co-operation has been conducted in many ways, and the scope of the co-operation has gradually expanded. Moreover, some new fields appear as well.

\* 基金项目 国家自然科学基金(40604006)资助.

收稿日期 2008-02-02 收到初稿, 2008-07-21 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: sxzang@pku.edu.cn

**Key words:** mantle structure; physical property of the mantle; mantle discontinuity; mantle convection; seismic velocity anisotropy

## 引言

近年来中国在地幔结构及物性的研究方面不断取得进展. 臧绍先等(2003)曾对 1999—2002 年中国科学家在地球内部结构和物质性质方面的研究进行过总结. 本文将按照该文的思路总结 2004—2007 年中国地球物理学家在地幔内部结构和物质性质方面的研究工作, 但主要限于岩石圈以下的地球内部结构和物理性质, 内容上肯定有局限性. 与此相关的其它内容请参见其它相关文章.

## 1 地幔波速结构

地幔波速结构仍是这几年的研究重点, 研究区域主要是中国及周边地区, 使用的方法主要是地震波的速度成像和接收函数方法.

### 1.1 地幔结构的地震波速度成像

黄金莉和赵大鹏(Huang, Zhao, 2006)利用高分辨率的 P 波地震层析成像, 确定了中国及周边深至 1000 km 的地壳和地幔结构, 给出了太平洋俯冲带、马里亚纳俯冲带、印度及菲律宾海俯冲带的俯冲情况及火山活动与俯冲带的关系, 并发现了塔里木、鄂尔多斯和四川盆地上地幔是高速异常体. 贺日政等(2006)利用在西昆仑山前布置的 14 个宽频带地震台站记录到的远震 P 波初至和层析成像方法, 研究了西昆仑造山带下的岩石圈地幔结构特征. 层析成像结果显示, 西昆仑造山带下的高速岩石圈地幔可能是印度岩石圈地幔的俯冲前缘. 在西昆仑造山带下的 150—300 km 处, 高速异常的岩石圈地幔前锋与低速异常的塔里木块体岩石圈地幔发生了面对面碰撞. 许志琴等(2004)通过横穿青藏高原近 8000 km 长的 4 条天然地震层析剖面, 获得 400 km 深度以上的地壳和地幔速度图象及地震波各向异性, 揭示了青藏高原 400 km 深度范围内的地壳和地幔结构特征, 讨论了大的走滑断层的延伸深度, 印度板块向北的俯冲, 并提出了青藏高原碰撞的动力学模式. 赵文津等(2004)利用布置在亚东—格尔木的 164 个流动地震台站记录的 926 次远震事件的 24 241 条射线, 进行了远震 P 波层析成像处理, 并利用得到的结果讨论了印度巨厚地幔岩石圈在向高原之下推进的动力学过程.

郭飏等(2004, 2006)根据流动宽频带地震台阵和区域地震台网的走时数据, 利用地震层析成像方法, 研究了青藏高原东北缘—鄂尔多斯地区和天山地区 400 km 深度范围内地壳上地幔的 P 波速度结构. 结果表明, 青藏高原东北缘—鄂尔多斯地区地壳上地幔结构呈明显的横向不均匀性, 这种不均匀性体现在不同块体之间, 同时也存在于块体内部; 天山地壳具有明显的横向分块结构, 且南、北天山地壳显示了较为强烈的横向变形特征, 表明塔里木地块对天山地壳具有强烈的侧向挤压作用; 并利用这些结果讨论了这两个地区的动力学演化.

李志伟等(2006)利用环渤海地区的天然地震 P 波到时资料, 采用纬度和经度方向分别为  $0.5^{\circ} \times 0.6^{\circ}$  的网格划分, 反演了该地区地壳上地幔的三维 P 波速度结构. 结果表明, 环渤海地区地壳上地幔的速度结构具有明显的横向不均匀性, 京津唐地区地壳上部的速度异常反映了浅表层的地质构造特征.

Hearn 等(2004)用 Pn 波到时资料和层析成像方法,建立了中国上地幔的 P 波速度结构.对长短不同的射线路径采用了不同的反演方法,从而将上部地幔内的浅部与深部结构区别开来,并讨论了地震波速度变化与构造的关系.

## 1.2 地幔结构的接收函数方法及其它方法研究

近几年利用接收函数方法研究地球深部结构有了较大发展.薛光琦等(2005)依据中国地质科学院与法国科研中心于 2001 年 6—11 月合作在叶城—狮泉河路线布设的 49 台宽频地震仪器的记录,用接收函数方法探测青藏高原西缘的深部构造,发现了塔里木岩石圈与青藏高原岩石圈汇聚地北侧的甜水海地体下方存在一个深达 200 km 的 S 波低速异常.吴庆举等(2004)应用远震体波接收函数波形的偏移叠加方法,自 INDEPTH-3 远震资料中获得可靠的喜马拉雅—青藏高原上地幔构造.结果显示,在藏南下面,一个倾斜界面自 100 km 深度由南向北俯冲到 410 km 界面附近.赵志新等(2004)分析了中国东部的上地幔剪切波速度结构及其与超高压变质岩带之间关系的构造意义,并指出了这些速度结构成像的几何形态可能意味着 200 Ma 前大别超高压变质岩带的形成与演化的俯冲、折返的构造运动在上地幔和岩石圈中留下的“痕迹”.郑月军等(2006)利用布设在云南西部的 50 个流动观测台站记录的三分量数字面波资料,采用频率域奇异值分解法,分析了中短周期 Love 波在青藏高原东部传播中的偏振状况.结果显示,Love 波的传播呈现明显的有规律的偏离大圆路径的异常,地壳-上地幔速度结构显著的横向不均匀性可能是造成这些偏振异常的主要原因.同时利用以前研究中得到的剪切波速度模型,计算了 Love 波到达台站的理论偏离情况,大多数理论计算与实际观测结果的偏离方向基本一致,但理论偏离角通常小于观测值.

赵大鹏等(2006)利用高精度的走时数据,研究了地幔体波的走时残差的范围及地幔非均匀性的强度.结果表明,P 波、PP 波和 Pdiff 波的走时残差最大分别为 9 s, 11 s 和 15 s.发现当震中距小于  $40^\circ$  时,P 波走时残差的范围为 -6 s 至 +9 s.而对于  $40^\circ$ — $99^\circ$  之间的震中距,P 波走时残差的范围为 -3 s 至 +5 s,表明上地幔和地幔过渡带中的横向非均匀性的强度要远强于下地幔.

艾印双等(Ai *et al.*, 2005)用了 3 种不同的接收函数叠加方法,研究了南-中阿拉斯加地区的地壳和地幔结构.H-kapa 叠加方法的结果显示,阿拉斯加地区地壳厚度为 26.0—42.6 km,  $v_p/v_s$  在 1.66—1.94 间;沿 3 条剖面的共转换点叠加方法的结果显示出 Moho 面和俯冲带的清晰图象,其中俯冲带的深度与利用 Wadati-Benioff 带估计的结果相当一致;共深度点叠加方法的结果不但显示出 410, 520, 660 地幔间断面,在研究区西南和东南部还显示出过渡带厚度的明显变化(-30 km 至 15 km).

从这 4 年的研究工作看,利用层析成像和接收函数方法研究深部结构的人逐渐增多.在利用已有方法的过程中,对方法逐步进行了改进,结果的质量逐步提高.这方面的工作是地球内部研究工作的基础,应进一步加强研究.但综观整体研究情况,综合对比工作不够,同一个地方,不同的人给出的结果有差异,缺少深入分析和比较.如果能进行一定讨论,会促进研究工作的深入

## 2 地幔介质的波速各向异性

波速各向异性的研究近几年仍继续受到关注,有的问题研究在不断深入.罗艳等

(2004) 选用中国数字化宽频带地震台网(CB 台网)和美国 IRIS 数据中心提供的三分量宽频带数字化地震资料,使用 SC(Silver, Chan, 1991) 方法,得到了中国大陆及周边地区 80 多个台站下方上地幔各向异性参数. 分析表明,整个研究区域的分裂延迟时间在 0.4—2.4 s 之间,平均为 1.2 s. 而快波偏振方位在相同地块有一定的优势排列方向,大多数台站快波偏振方向都能与过去或现今大规模的构造运动得到很好地符合.

常利军等(2006)根据云南地区 47 个台站记录到的远震 SKS 震相,计算分析了各个台站下方的各向异性. 结果表明,各向异性的快波偏振方向由在云南北部的南北向,逐渐过渡到在南部的近东西向,整体表现有一旋转的趋势;时间延迟为 0.58—1.88 s,各向异性层主要分布于上地幔,其厚度在 67—216 km 之间.

王小平等(2005)使用上海地震台阵记录的远震波形和台阵处理技术,测量分析了 PpSmS、P660S 及 SKS 震相的分裂参数——快波偏振方向和快慢波延迟时间. 他们给出的上海地震台阵地区的数值为:快波偏振方向和快慢波延迟时间在地壳中大致分别为  $67.7^\circ$  和 0.26 s;在上地幔分别为  $66.6^\circ$  和 0.25 s;在下地幔分别为  $65.5^\circ$  和 0.58 s.

阮爱国等(2004)使用伪谱法研究了地壳各向异性对上地幔各向异性分析的影响,发现当地壳各向异性与上地幔各向异性方向为一般夹角时,反演结果会出现较大的误差或误判,并进而提出了解决这一问题的方法.

地幔介质各向异性研究是地幔研究工作的深入,它可以提供地幔结构及地幔物质运动的进一步的信息,是一个重要的研究方向. 但目前研究工作仍然比较分散,如果能将同一地区的研究结果进行综合比较和分析,将会取得更好的结果.

### 3 地幔间断面

地幔间断面继续是这 4 年的主要研究方向,研究的范围有所扩大. 段永红等(2005)利用布设在长白山地区的 19 个 PASSCAL 宽频带流动地震台站近一年的远震记录和布设在镜泊湖火山区 14 个宽频带轻便数字地震仪 3 个月的远震记录,通过接收函数方法得到了研究区的间断面的分布及形态. 结果表明,研究区存在 410, 520 km 和 660 km 间断面. 410 km 和 660 km 间断面较为连续且具有正相关性质. 410 km 间断面在长白山天池火山下局部上隆,660 km 间断面具有复杂的多界面性质. 珲春深震区下 660 km 界面下陷,其上还有多组震相,这些震相在珲春深震区东西两侧不连续. 薛光琦等(2005)依据中国地质科学院与法国科研中心 2001 年 6 月—11 月合作在叶城—狮泉河路线布设的 49 台宽频地震仪器的记录,用接收函数方法探测了青藏高原西缘的深部构造. 结果表明,地幔中尖晶石型向方镁石型结构转变的过渡层有可能出现在 670—700 km 深度间.

艾印双和郑天愉(Ai, Zheng, 2003)在“华北内部结构”计划中应用接收函数的共转换点叠加方法研究中国东部的地幔间断面. 结果显示,研究区 410 km 间断面明显,表明其受到西太平洋俯冲带的微弱影响;520 km 间断面较弱,由数段组成,分布在 500—550 km 深度间;同时,还发现了研究区 660 km 间断面呈双层,660 km 附近有一宽度不大的下陷带.

艾印双等(Ai *et al.*, 2003)用接收函数方法研究了我国东北地幔 660 km 间断面,在  $128.0^\circ\text{E}$ — $130.5^\circ\text{E}$ ,  $40.0^\circ\text{N}$ — $44.0^\circ\text{N}$  的区域内,发现了 660 km 间断面局部下陷,在邻近区域分裂成多层间断面.

臧绍先等(Zang *et al.*, 2006)利用美国西北太平洋台站的 SdP 转换波资料,研究了汤加

俯冲带下的地幔间断面情况,发现了 660 km 间断面呈双层现象.通过对转换波 SdP 与直达 P 波振幅比的研究,显示上层转换点分布在 660—690 km 间(峰值在 680 km),下层转换点分布在 700—745 km 间(峰值在 740 km).双间断面明显受到汤加俯冲带的影响而呈下陷状态.根据实验资料,作者认为上层可能是由  $\gamma$ -尖晶石到钙钛矿和镁方铁矿的相变引起,下层可能是由钛铁矿到钙钛矿的相变形成.

何小波和周蕙兰(2005)对全球地形高程和 Moho 面深度(CRUST2.0 模型)及上地幔各间断面深度数据进行了球谐分析.在此基础上,通过叠加前 4 阶模式得到了各类数据的空间大尺度分布信息,通过叠加振幅平方值最大的 4 项得到了各类数据的空间主能量分布.结果表明,Moho 面和‘410’间断面的地形存在半球尺度的大尺度非对称性,而且南北半球非对称性比东西半球更显著;而‘520’和‘660’间断面的地形起伏已没有半球尺度那么大的非对称性,而是尺度略小些的不对称性.

郑斯华等(2007)发现中国地震台网(CSN)台站记录到的南美洲地震的 PKP 波的射线,对中太平洋下的 D"层有很好的采样.他们采用这些 PKP 波的 AB 和 DF 两个分支的走时差,研究了中太平洋下地幔底部 P 波速度的小尺度变化.其观测到的 P 波速度异常的空间分布,总体上与 Grand 等(1997)通过层析成像得到的核幔界面(CMB)的 S 波的速度异常相一致,并在变化的幅度上很好地相关,P 波速度的扰动值(在 D"层大约为 2%)是 Grand 速度模型中的 S 波异常的 36%.这一结果有助于对太平洋下超大地幔热柱的结构和性质的进一步研究.

地幔间断面的研究是很重要的课题,但要取得更好的结果,必须与地球内部物理和矿物物理的工作更好地结合.

## 4 地幔对流

地幔对流的研究将会在地球动力学中涉及,但它与地幔结构和介质物性密切相关,所以本文也简略地涉及地幔对流的研究.

王建和叶正仁(2005)利用动力学模拟方法,研究了地幔对流对于大尺度岩石圈内部应力场形成的作用,认为地幔物质内部的密度横向非均匀及表面板块运动引起地幔流动,并在岩石圈底部产生一个应力场.该应力场将造成岩石圈本身变形,从而产生岩石圈内部的应力分布.研究表明,地幔对流是造成岩石圈内部大尺度应力状态及分布的一个重要因素.

朱涛等(2006)建立了三维粘度扰动下的变粘度地幔对流模型,并提供了在引入地幔的三维地震波速度结构下相应的求解方法,有助于深化对地幔物质流动和大地构造运动的深部动力学过程的认识和理解.

傅容珊等(2005a)发展了在上、下地幔不同粘性结构框架下密度异常驱动地幔对流的物理模型,直接反演了不同粘滞系数的双层地幔结构下地幔对流的模式,讨论了对流与全球构造之间的关系.

熊熊等(2005)指出,青藏高原的形成是印度板块与欧亚大陆碰撞、挤压的结果,但简单的碰撞模型及南西—北东向的挤压无法解释高原现今所有的构造.

傅容珊等(2005b)建立了由密度异常驱动上地幔小尺度对流的数学-物理模型,发展了利用地震层析成像数据反演上地幔小尺度对流的基本理论和方法.通过数值实验证明了

此方法可以直接应用于与区域岩石层构造动力学相关的上地幔小尺度对流的研究. 许萍等(2006)利用密度异常驱动上地幔小尺度对流的数学-物理模型, 计算得到了我国西北及周边地区上地幔对流模式, 指出上地幔物质南下向青藏高原北部西昆仑运动, 以及北上向天山下部流动, 可能是天山隆升的原因之一.

刘洁等(2006)针对非均匀介质中热蠕变流动问题, 提出了有限单元法和网格-粒子法联合求解的一种新方法, 并分析了数值解的稳定性. 利用这种方法, 刘洁等(刘洁, 2007; Liu *et al.*, 2007)研究了中国境内天山地区上地幔小尺度对流. 结果表明, 北天山—准噶尔盆地下方的上地幔中存在一个逆时针对流环, 南天山—塔里木盆地一侧的上地幔中存在一个顺时针对流环; 对流环尺度为 500 km 左右; 对正常的粘度模型, 天山上地幔顶部对流速度值不应小于 20 mm/a; 塔里木盆地向北的水平推挤作用是天山新生代隆升的决定性因素, 但对上地幔对流场的影响很小; 上地幔小尺度对流对天山现今构造变形格局起着重要作用.

黄金水和钟世杰(Huang, Zhong, 2005)研究了岩石圈下小尺度对流(SSC)和内部加热对海底热流、海底地形及地幔热结构的影响, 并利用公式化的高分辨率的二维对流数值模型结果和与深度和温度相关的流变结构来检验板块模型动力学上的可行性. 结果表明, 与半空间冷却模型的结果相比较, 古老大洋盆地的剩余热流和地形由圈闭的热和 SSC 决定; 如果要板块在动力学上可行, 则内部加热和 SSC 都是必须的.

地幔对流的研究, 目前主要限于数值模拟方面, 为使其更进一步深入, 必须加强理论方面的研究.

## 5 介质物性

近几年对地幔物质的物理性质的高温高压研究一直稳步地发展着. 黄晓葛等(2005)在 Kawai-1000 型多顶砧压机上, 利用橄榄石相变人工合成地幔过渡带矿物瓦兹利石(wadsleyite)和林伍德石(ringwoodite), 研究了含水量与电导率的关系. 结合大地电磁反演获得的电导率结果和他们的实验数据, 推断中国东北地区地幔过渡带中的水含量约为 0.1wt%—0.3wt%, 远远高于上地幔中的水含量, 或许表明在 410 km 处可能发生了部分熔融. 张莉等(2004)在 60—110 GPa 冲击压力(估算温度为 2300—4800 K)范围内进行了 5 发原始样品为  $(\text{Mg}_{0.92}, \text{Fe}_{0.08})\text{SiO}_3$  顽火辉石的冲击压缩回收实验. 对回收样品进行的 X 射线衍射(XRD)和红外吸收光谱(IR)分析, 认为在冲击压缩过程中样品处于钙钛矿结构, 在冲击卸载过程中样品发生了由钙钛矿结构向单链状结构的逆转相变; 特别是, 在实验的温度压力范围内, 不可能发生由  $(\text{Mg}_{0.92}, \text{Fe}_{0.08})\text{SiO}_3$  向  $\text{SiO}_2$  和  $(\text{Mg}_{0.92}, \text{Fe}_{0.08})\text{O}$  的化学分解相变, 顽火辉石的高压相——钙钛矿结构是稳定的. 刘巍等(2005)应用超声波透射法和超声波频谱振幅比法、在 4.0 GPa 压力条件下测量了弹性纵波通过纯橄岩的波速和品质因子值  $Q$  随压力的变化, 并分析了纯橄岩内部结构的变化对波速和衰减的影响.

利用观测资料对地幔介质性质进行研究一直是地球物理研究的重要方面, 并取得了不少进展, 其中大地电磁观测最为突出. 汤吉等(2005)在青藏高原东北缘至鄂尔多斯地块沿玛沁—兰州—靖边剖面进行了 62 个测点的大地电磁观测, 分析了视电阻率和阻抗相位曲线、二维偏离度、区域走向. 采用 RRI 二维反演技术进行了资料的反演解释, 并对电性结构进行了讨论.

地幔的粘滞性也是近几年地幔物理研究的一个方向. 朱守彪和蔡永恩(2006)考虑了震后震源区介质物性的变化, 利用台湾集集地震后 GPS 观测的时间序列数据, 反演了台湾地壳和地幔的粘度: 地壳粘度为  $1.2 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 地幔粘度为  $3.6 \times 10^{19} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ . 林传勇等(2003)收集了数十个雷州半岛的地幔捕俘体标本, 利用地质温度计估算了它们的平衡温压, 然后建立起该区上地幔的热结构, 并估计了相应的流变结构. 其等效粘度在  $10^{21} - 10^{23} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  间, 随深度的增加有明显地减小.

地幔介质物性的高温高压工作, 在中国虽然起步不晚, 但进展缓慢. 其主要原因是设备落后, 重视也不够. 近年来一些地学工作者与国外进行了比较密切的合作, 工作有了起色; 但与国际上相比, 差距还比较大. 今后应与其它研究工作结合在一起形成相互合作, 以促进这方面研究工作的发展.

### 参 考 文 献

- 常利军, 王椿镛, 丁志峰. 2006. 云南地区 SKS 波分裂研究[J]. 地球物理学报, **49**(1): 197-204.
- 段永红, 张先康, 刘志, 方盛明, 王夫运, 徐朝繁, 原秦喜. 2005. 长白山—镜泊湖火山区上地幔间断面接收函数研究[J]. 地球物理学报, **48**(4): 834-842.
- 傅容珊, 王毅, 黄建华, 常筱华, 查显杰, 戴志阳. 2005a. 黏滞分层地幔中密度异常驱动对流模型的研究[J]. 地球物理学报, **48**(4): 824-833.
- 傅容珊, 王景赞, 常筱华, 黄建华, 戴志阳, 查显杰. 2005b. 上地幔密度异常驱动小尺度对流及实验模型[J]. 地震学报, **27**(1): 25-32.
- 郭颺, 刘启元, 陈九辉, 赵大鹏, 李顺成, 赖院根. 2004. 青藏高原东北缘—鄂尔多斯地壳上地幔地震层析成像研究[J]. 地球物理学报, **47**(5): 790-797.
- 郭颺, 刘启元, 陈九辉, 赵大鹏, 李顺成, 赖院根. 2006. 中国境内天山地壳上地幔结构的地震层析成像[J]. 地球物理学报, **49**(6): 1693-1700.
- 何小波, 周惠兰. 2005. Moho 面和上地幔间断面大尺度地形起伏的低阶球谐分析[J]. 中国科学院研究生院学报, **22**(3): 315-321.
- 贺日政, 赵大鹏, 高锐, 王宝善, 齐诚. 2006. 西昆仑造山带下岩石圈地幔速度结构[J]. 地球物理学报, **49**(3): 778-787.
- 黄晓嵩, 白武明, Xu Yousheng, Karato Shun-ichiro. 2005. 水对 Wadsleyite 和 Ringwoodite 电导率的影响及地球动力学意义[J]. 岩石学报, **21**(6): 1743-1748.
- 李志伟, 胥颐, 郝天珧, 刘劲松, 张岭. 2006. 环渤海地区的地震层析成像与地壳上地幔结构[J]. 地球物理学报, **49**(3): 797-804.
- 林传勇, 黄小龙, 徐义刚, 史兰斌, 陈孝德. 2003. 广东省雷州半岛上地幔的热结构和流变学特征[J]. 热带海洋学报, (2): 49-62.
- 刘洁, 刘启元, 宋惠珍. 2006. 非均匀介质热蠕变流动的数值求解[J]. 地球物理学报, **49**(4): 1029-1036.
- 刘洁, 刘启元, 郭颺, 宋惠珍. 2007. 中国境内天山上地幔小尺度对流与造山作用[J]. 中国科学(D 辑), **37**(6): 728-735.
- 刘巍, 杜建国, 谢鸿森, 周文戈, 郭捷. 2005. 4.0 GPa 压力下纯橄岩弹性纵波速度和衰减的实验研究[J]. 高压物理学报, **19**(4): 293-298.
- 罗艳, 黄忠贤, 彭艳菊, 郑月军. 2004. 中国大陆及邻区 SKS 波分裂研究[J]. 地球物理学报, **47**(5): 812-821.
- 阮爱国, 王椿镛, 李清河, 臧宏. 2004. 上地幔各向异性分析中地壳的影响[J]. 地球物理学报, **47**(3): 441-448.
- 汤吉, 詹艳, 赵国泽, 邓前辉, 王继军, 陈小斌, 赵俊猛, 宣飞. 2005. 青藏高原东北缘玛沁—兰州—靖边剖面地壳上地幔电性结构研究[J]. 地球物理学报, **48**(5): 1205-1216.
- 王建, 叶正仁. 2005. 地幔对流对全球岩石圈应力产生与分布的作用[J]. 地球物理学报, **48**(3): 584-590.
- 王小平, 朱元清, 宋秀青, 于海英. 2005. 基于 PpSms、P660S、SKS 震相分裂研究上海地区地壳、地幔各向异性[J]. 西

- 北地震学报, **27**(1): 52-55.
- 吴庆举, 曾融生, 赵文津. 2004. 喜马拉雅—青藏高原的上地幔倾斜构造与陆—陆碰撞过程[J]. 中国科学(D 辑), **34**(10): 919-925.
- 熊熊, 傅容珊, 滕吉文, 许厚泽. 2005. 青藏高原的地幔动力学研究[J]. 地球科学进展, **20**(9): 970-979.
- 许萍, 傅容珊, 黄建平, 查显杰, 戴志阳. 2006. 中国西北及周边地区上地幔密度异常[J]. 地震学报, **28**(5): 513-522.
- 许志琴, 姜枚, 杨经绥, 薛光琦, 宿和平, 李海兵, 崔军文, 吴才来, 梁凤华. 2004. 青藏高原的地幔结构: 地幔羽、地幔剪切带及岩石圈俯冲板片的拆沉[J]. 地学前缘, **11**(4): 329-343.
- 薛光琦, 钱辉, 姜枚. 2005. 青藏高原西缘上地幔构造特征: 穿越西昆仑造山带的接收函数反演[J]. 地质论评, **51**(6): 708-712.
- 臧绍先, 周惠兰, 魏荣强, 周元泽. 2003. 地球内部结构和物质性质的研究[J]. 地震学报, **25**(5): 492-501.
- 张莉, 龚自正, 刘红, 邓力维, 薛学东, 经福谦. 2004. 下地幔温压下(Mg, Fe)SiO<sub>3</sub> 钙钛矿的相稳定性: 对冲击回收样品的微观分析[J]. 高压物理学报, **18**(2): 170-176.
- 赵文津, 薛光琦, 吴珍汉, 赵逊, 刘葵, 史大年, Mechie J, Nelson D, Brown L, Hearn T. 2004. 西藏高原上地幔的精细结构与构造地震层析成像给出的启示[J]. 地球物理学报, **47**(3): 449-455.
- 赵志新, 徐纪人, 许志琴. 2004. 上地幔三维 S 波速度结构与大别苏鲁超高压变质带俯冲折返机制探讨[J]. 岩石学报, **20**(1): 157-164.
- 郑斯华, 孙新蕾, 宋晓东. 2007. 利用中国地震台网(CSN)记录到的 PKP 波研究中太平洋下地幔底部的小尺度 P 波速度变化[J]. 地球物理学报, **50**(1): 184-192.
- 郑月军, 黄忠贤, 刘建华, 胥颐. 2006. 青藏高原东部 Love 波偏振研究[J]. 地球物理学报, **49**(4): 1068-1073.
- 朱守彪, 蔡永恩. 2006. 利用 GPS 观测的时间序列资料反演地壳地幔黏性结构[J]. 地球物理学报, **49**(3): 771-777.
- 朱涛, 马宗晋, 冯锐. 2006. 三维地震波速结构约束下的变黏度地幔对流及其动力学意义[J]. 地球物理学报, **49**(5): 1347-1358.
- 赵大鹏, Yamada A, Ohta Y. 2006. 精确测量的地幔体波走时及地幔非均匀性的强度[J]. 地学前缘, **13**(2): 37-47.
- Ai Y S, Zhao D P, Gao X, Xu W W. 2005. The crust and upper mantle discontinuity structure beneath Alaska inferred from receiver functions[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **150**(4): 339-350.
- Ai Y S, Zheng T Y. 2003. The upper mantle discontinuity structure beneath eastern China[J]. *Geophys Res Lett*, **30**(21): 2089.
- Ai Y S, Zheng T Y, Xu W W, He Y M, Dong D. 2003. A complex 660 km discontinuity beneath northeast China[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **212**(1-2): 63-71.
- Grand S P, Van der Hilst R D, Widiyantoro S. 1997. Global seismic tomography: A snapshot of convection in the Earth [J]. *GSA Today*, **7**: 1-7.
- Hearn T M, Wang S Y, Ni J F, Xu Z H, Yu Y X, Zhang X D. 2004. Uppermost mantle velocities beneath China and surrounding regions[J]. *J Geophys Res*, **109**(B11): B11301, doi:10.1029/2003JB002874.
- Huang J L, Zhao D P. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions[J]. *J Geophys Res*, **111**: B09305.
- Huang J S, Zhong S J. 2005. Sublithospheric small-scale convection and its implications for the residual topography at old ocean basins and the plate model[J]. *J Geophys Res*, **110**(B5): B05404, doi:10.1029/2004JB003153, 2005.
- Liu J, Liu Q Y, Guo B, Song H Z. 2007. Small-scale convection in the upper antle beneath the Chinese Tian Shan Mountains[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **163**: 179-190.
- Silver P G, Chan W W. 1991. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation[J]. *J Geophys Res*, **96**: 16429-16454.
- Zang S X, Zhou Y Z, Ning J Y, Wei R Q. 2006. Multiple discontinuities near 660 km beneath Tonga area[J]. *Geophys Res Lett*, **33**: L20312, doi: 10.1029/GL027262.