

文章编号: 0253-3782(2003)05-0492-11

地球内部结构和物质性质的研究^{*}

臧绍先¹⁾ 周蕙兰²⁾ 魏荣强¹⁾ 周元泽²⁾

1) 中国北京 100871 北京大学地球物理学系

2) 中国北京 100039 中国科学院研究生院地球系统科学中心

摘要 对 1999~2002 年中国地球物理学家在地球内部结构和物质性质方面的研究工作进行了总结。分别对地球内部结构的地震波速度成像研究, 中国及其周边地区上地幔介质各向异性的研究, S 波介质品质因子 Q_p , 俯冲带研究, 地幔间断面的研究, 地球物质性质的实验研究以及其它方面的一些研究工作进行了综述。指出了各方面的主要研究内容、使用的主要方法和得到的结果。从这 4 年的研究中可以发现, 中国的科学家在地球内部结构和物质性质的研究中又取得了新的进展, 主要表现在 3 个方面: 一些原有领域中的研究更加深入; 开辟了新的方向; 研究方法更先进。

关键词 地球内部结构 物质物理性质 地震层析成像 介质各向异性 俯冲带 地幔间断面

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A

引言

近年来中国在地球内部结构和物质性质的研究方面不断取得进展。Zang 等(1999)曾对 1995~1998 年中国科学家在地球内部结构、地球动力学和地球内部的物理性质的研究进行过总结。本文将主要总结 1999~2002 年中国地球物理学家在地球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。与此相关的内容请参见其他相关文章。其中地震波的传播见张海明和陈晓非(2003)文章; 岩石圈的结构与大陆动力学见许忠淮和石耀霖(2003)文章; 岩石力学性质的实验研究及构造物理学见马胜利和马瑾(2003)文章。

1 地球内部结构的地震波速度成像研究

地球内部结构是近几年研究的一个重点, 研究的区域主要是中国及其周边地区, 使用的方法是地震波速度成像的方法, 其中又可以分为面波速度成像和体波速度成像。

面波速度成像是使用较早的研究方法, 近几年来又得到进一步发展。Zhu 等(2002)使用 10~120 s 周期的 Rayleigh 波群速度资料, 反演得到中国大陆及其邻近海域(70°~145°E, 10°~55°N)的地壳上地幔结构——塔里木盆地有较深的根; 南北地震带表现为强烈的速度梯度带, 泰国清迈附近存在 1 000 km 左右尺度的低速带; 而环绕菲律宾海及日本海存

^{*} 国家自然科学基金(40174023)资助项目。

2003-02-19 收到初稿, 2003-05-20 收到修改稿, 2003-06-01 决定采用。

在 400 km 左右宽的低速带. Cao 等(2001)对南海及邻区台站的面波长周期记录图作波形反演,得到南海及邻区深至 430 km 的地壳上地幔三维 S 波速度结构,发现海域、岛弧和大陆在速度分布、岩石圈和软流圈等方面有明显的结构差异. Chen 和 Chen(2002)提出一种求解水平层状海洋-地球模型中面波振型问题的新算法. 其理论简洁,计算高效,在高频计算上稳定. Teng 等(2001)使用中国地震台站的瑞利波资料和适配滤波频时分析技术,获得了穿越我国东南及陆缘地区的纯路径瑞利波数据,并在此基础上反演了该区剪切波的三维速度结构. 结果表明, Moho 界面埋深在华南大陆为 30~40 km,向东逐渐减薄;在陆缘与浅海地域为 25~28 km;上地幔低速层埋深为 60~150 km,变化幅度较大. Li 等(2001)使用基阶瑞利波的频散曲线,研究了中国大陆东部及海域($98^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$, $5^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$)的 S 波速度的横向变化,对位于欧亚大陆和太平洋两大板块的衔接地带的该研究区的复杂情况进行了讨论. He 等(2001, 2002)用长周期 Rayleigh 波群速度资料和层析成像方法,采用光滑约束的遗传算法反演得到了中国大陆及其邻域的地壳上地幔 S 波三维速度结构;给出了沿北纬 30° 、 38° 两条东西向剖面和沿东经 90° 、 120° 两条南北向剖面的地壳上地幔 S 波速度结构,并在 4 个不同深度的水平切片上展示了中国大陆及邻域的 S 波速度分布图象. Wu 等(2001)用云南数字地震台网资料和接收函数方法,反演获得了云南地区 0~100 km 深度范围的 S 波速度结构. 朱介寿等(2002)采用面波频散及波形拟合反演的方法,对东亚及西太平洋边缘海地区($60^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{N}$)的地壳上地幔进行了高分辨率三维 S 波速度成像. 结果表明,从上地壳到 70 km 深,在东亚东部及西太平洋边缘海地区为高速分布,西部以青藏高原为中心呈极低速分布. 自地中海经土耳其、伊朗、喜马拉雅山到缅甸、印尼群岛的特提斯汇聚碰撞带,显示为低速异常链. 从 85~250 km 深,在东亚东部及西太平洋边缘海,自北向南显示出一条巨型低速异常带;西部地区为高速异常分布.

在过去的 4 年中,体波层析成像也得到了进一步发展,与大陆动力学的研究相结合,取得了不少成果. Xu 等(2001a)用地震层析成像法重建了中国大陆西北造山带及其毗邻盆地的地壳上地幔三维速度图象. 上地壳造山带大都为高速区,盆地和地陷区的高速与较厚的松散沉积层有关;东、西天山之间在地壳中部存在低速边界,造山带及青藏高原北部的莫霍面深度较大,盆地和坳陷区的莫霍面相对较浅;上地幔软流层在青藏高原、阿尔泰山、祁连山等地较浅,在塔里木盆地和天山一带较深. 地幔热物质有可能在板块碰撞中沿构造边界上升到造山带的底部. Xu 等(2001b)还以中国大陆西北地区地震层析成像的结果为基础,提出了西部造山带与相邻块体之间几种可能的碰撞类型:天山与塔里木之间存在地块的嵌入拼合、俯冲、岩石层拆离下沉以及层间插入等多种构造样式;青藏高原与北部地质单元之间存在十分清晰的深部边界,反映出上地幔物质向北扩展的痕迹;推测青藏高原的岩石层在向北运动的过程中由于受到塔里木刚性块体的阻滞发生弯曲甚至折断,但是祁连山以北较浅的软流层相当于一个开放边界,使高原的上地幔物质得以进一步向北迁移. Lei 和 Zhou(2002)利用 ISC、中国和 NEIC 基本测震台网报告中的 80 974 条 P 波资料,对中国西南及邻区($10^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$)的深至 400 km 的上地幔三维速度结构的研究结果表明,研究区速度的横向不均匀性至 400 km 深度仍很明显;在 16°N 和 24°N 的纵剖面上,可以看到与印度板块向东与欧亚板块相碰撞挤压相对应的速度结构,以及印度板块与欧亚板块速度结构的差异. 在 90°E 的纵剖面上,与印度板块向北俯冲的影像也很明显. Xu 等(2000a)根据 P 波速度层析成像结果,发现在大别-苏鲁造山带的莫霍面之下有古俯冲板

块的踪迹,并推测扬子板块向北俯冲于华北板块之下,而且在 170~200 km 的深度上发生了板块断离,年代大约为 200~190 Ma. Xu 等(2000b)同样由层析成像结果发现大别—苏鲁碰撞造山带下的岩石圈速度横向不均匀性显著;南、北大别构造单元之下,莫霍面下凹,地壳内发育了向北倾斜的相对高速体,与超高压变质岩体相对应. Liu 等(2000b)用地震层析成像揭示了在滇西特提斯造山带下 250 km 深度有板片状高速异常,并论证了该板片状高速异常是古特提斯洋闭合后扬子地块俯冲板片的一部分.

2 中国及其周边地区上地幔介质各向异性的研究

随着数字化资料的出现,各向异性的研究工作不断得到进一步开展,并取得了不少成果. Liu 等(2001a)通过对中国陆区 8 个天然地震台站的资料进行 Butterworth 带通滤波处理,研究了不同频带宽度下的 S 波分裂现象,得出中国陆区 S 波分裂时差、快波偏振方向随频带的不同而变化. 其中,乌鲁木齐台在 0.1~0.2 Hz 频带内不发生 S 波分裂,北京、恩施、昆明与牡丹江台 S 波分裂时差随频带增宽而减小,兰州与琼中台分裂时差随频带变化规律相似;随着频带的增宽,恩施台快波偏振方向由西向东变化,海拉尔台快波偏振方向由东向西变化,北京、昆明和牡丹江各台的快波偏振方向基本一致;并对中国陆区 S 波分裂的频率依赖性的意义进行了初步讨论. Liu 等(2001b)在剪切波分层各向异性介质中的传播理论和分裂剪切波观测的基础上,用小波分析等高分辨率的信号处理技术,给出了对 136 次地震的 ScS 波形的分析结果,得到了中国及邻区 20 个台站下面的上地幔各向异性介质的变形强度和方向的空间变化图象;并结合已有研究结果,对该研究区上地幔各向异性特性及其起源问题进行了讨论. 姜枚等(2001)在研究青藏高原及其部分邻区的剪切波各向异性特征后得出,在该区 200 km 以上的上地幔范围内的各向异性的方向性变化主要受上地幔物质运移方向的影响,各地体的岩石圈与地壳在相当长时间内是连贯的运移;各向异性的主要方向决定于上地幔承受的剪切作用,方向常常与地表的山系和构造方向不一致;最强的各向异性特征出现在高速体地体边缘,与深部热的地幔物质有关;在各地体边缘的走滑断裂附近各向异性与断裂带走向一致. Ruan 和 Wang(2002)采用理论切向分量与实测切向分量拟合的方法,分析 SKS 震相的快、慢波分裂现象及有关参数. 结果表明,云南地区的快波方向总体特征是北北东向,时间延迟变化范围为 0.5~2.0 s;作为青藏高原与华南块体之间的过渡带,云南地区的 S 波快方向反映了印度板块向欧亚板块俯冲是该地区地球动力学的基本背景,并进一步推断出上地幔的各向异性主要存在于岩石圈而不是整个上地幔. 阮爱国和王椿镛(2002)推导了弱各向异性介质的地震波速,介绍了用 Pn 震相研究上地幔各向异性的几种具体算法;阐述了用 SKS 震相和 ScS 震相反演上地幔各向异性的方法、优缺点及几种方法的相互关系.

此外,还开展了内核各向异性成因的研究. Liu 等(2000a)根据地球内核相对于外部地球有差异的转动的观测结果,利用晶体生长理论,讨论了内核地震波速度的各向异性的成因,指出构成地球内核的 hcp 型铁晶体的 c 轴沿着内核自转轴的方向排列,导致观测到的地球内核波速的各向异性.

3 S 波介质品质因子 Q_p

品质因子是表征介质粘弹性的重要参数. Li 等(2000)用 763 长周期地震台网的双台

Rayleigh 波垂直向记录和改进的多重滤波法,提取震中到台站路径的群速度频散和振幅谱信息,求出每一双台大圆路径的面波衰减因子,采用 Talentola 概率反演得到不同周期面波衰减因子的分布,再反演出中国大陆东部地壳、上地幔 S 波品质因子的三维 Q_β 结构. 层析结果显示:华北地区地壳、上地幔的 Q_β 结构与地震活动性有密切的联系;在陕南秦岭段的南缘, Q_β 结构显示出扬子块体碰撞并俯冲于华北块体之下的迹象. 胡家富和段永康(2000)用 CDSN 记录到的基阶振型面波 Rayleigh 面波资料,根据与震源处于同一大圆弧上的两台记录的基阶振型信号计算出台间格林函数,测定了经过中朝准地台地区周期 10~98 s 的基阶 Rayleigh 波衰减系数,并在此基础上反演得到了中朝准地台的地壳上地幔 Q_β 结构. 结果表明,华北地区地壳的 Q_β 为 250,而黄海地区地壳 Q_β 为 450;中朝准地台的地幔 Q_β 值明显低于稳定地区,而更接近构造活动地区的 Q_β .

4 俯冲带研究

俯冲带仍然是吸引中国地球物理学家注意的一个研究领域. 这方面的研究在不断地深入. 俯冲带的各种物理性质是研究的重要内容之一. Ning 和 Zang(2001)通过准静态俯冲模型,利用有限元方法研究了俯冲带的 P 波速度结构,结果显示俯冲板片在大部分深度范围存在高速度异常,并在 400 km 左右和 550 km 左右的深度存在高速异常的极大值. 这与层析成像得到的波速结构相一致. 同时显示在某些深度存在负的速度异常区,负速度异常主要出现在 400 km 及 720 km 附近. 其异常幅度的大小决定于俯冲条件,最大可达 -10%. Zang 和 Ning(2001)研究俯冲板片引起的负浮力,并讨论了亚稳态橄榄岩对负浮力的影响,指出在 $h < 400$ km 和 $h > 740$ km 的深度范围内,低温、高密度的俯冲板片使负浮力随深度单调增加. 因为尖晶石相到后尖晶石相的相变有负的克拉帕龙斜率,俯冲带冷的物质在 660 km 间断面以下约 100 km 以内的深度范围以低密度的低压相存在. 在 $400 \text{ km} < h < 660 \text{ km}$ 深度范围内,由于橄榄石相变的影响,不同的计算条件下,浮力随深度增加不同,亚稳态橄榄石的存在使负浮力随深度增加值减少,其作用不利于俯冲带穿透 660 km 间断面. Zang 等(2001)利用俯冲带的热结构、相变过程计算俯冲板片的粘度分布,得到俯冲带上层有高粘度值,可达 $10^{34} \text{ Pa} \cdot \text{s}$;下层粘度较小,在橄榄石-尖晶石相变面以下深度,俯冲带粘度有明显的减小,最低可达 $10^{22} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. 在 700 km 附近尖晶石-钙钛矿相变面以上的小区域内有明显的高粘度区,而尖晶石相占 1%~99% 的等值线之间的距离,有从浅部的约 1 km 到最底部的约 5 km 的变化. 这可能是俯冲带内的一个低粘度区,它的存在可能影响俯冲带的动力学特性. 俯冲带的应力状态是研究的另一个重要方面. Mao 等(2002)利用二维弹性有限元方法,模拟了俯冲带俯冲过程中相变引起的体积变化、板内温度差、密度异常以及边界力产生的应力场分布情况. 模拟结果表明,利用弹性模型得到这几种因素产生的应力场,不能解释深源地震成因,需要考虑其它方法. Liu 等(2002)利用粘弹性平面应变有限元方法研究了俯冲带深部应力场特征,结果表明,在橄榄石-尖晶石相变界面以下中心低粘度区两侧出现应力集中区,而且其主压应力方向与俯冲方向一致. 其特征与深震主压应力方向一致,而有亚稳态橄榄石存在的情况下橄榄石-尖晶石过渡区的应力状态与地震观测结果不符.

陆壳俯冲是地球动力学中的一个极有意义的问题. Shi 和 Fan(2001)利用三维有限元方法研究俯冲海洋板块拖曳陆壳俯冲的情况,计算表明,俯冲海洋板块可以拖曳宽度不超过

过 150 km 的一窄条大陆板块俯冲到 100 km 的深度, 形成超高压变质带, 成熟的陆-陆碰撞则不可能使陆壳俯冲到超高压变质的深度。

印度板块-欧亚板块的碰撞是中国科学家近期研究的热点。Zeng 等(2000)通过地震活动性、地震机制及地震测深结果的分析, 提出了多次地壳俯冲的概念, 用来解释印度板块和欧亚板块的碰撞过程。他们认为首先在雅鲁藏布缝合带产生地壳俯冲, 在 80~100 km 深处停止, 然后在其以南以 MCT 和 MBT 相继俯冲, 并也在 80~100 km 深度处停止。这样入侵的印度地壳与地幔分离, 形成多次俯冲, 而其地壳以下部分可俯冲至更深的欧亚板块的上地幔。

俯冲带中深震的成因是一个尚在深入研究的问题。Ning 和 Zang(1999)利用数值模拟方法, 计算了俯冲带上的应力分布, 通过地震探测结果和实验室破裂实验结果的对比, 提出 400 km 以下俯冲带的地震可能由反裂纹机制所控制。

近几年来, 对俯冲带的研究除以上提到的对俯冲带本身的研究之外, 尚有俯冲带与 410 km 和 660 km 间断面相互作用的问题。因为这与间断面的研究有关, 将在地幔间断面一节讨论, 本节不再单独述及。

5 地幔间断面的研究

随着数字化地震资料的积累, 地幔间断面也成为这 4 年研究的一个重要方向。地幔间断面研究的一个重要方面就是研究方法的探讨, 因为地幔间断面研究大部分是利用振幅较弱的次生震相, 所以使用有效的方法成为一个必要的前提。Wei 等(2000)讨论了上地幔低速层对 660 km 间断面 PdS 震相的影响, 指出 PdS 震相对应的震中距-射线离源角和震中距-相对幅度都存在振荡关系。当震中距大于 33° 时, 振荡呈降低趋势, 可以比较容易地识别 PdS 震相。Zhou 和 Zang(2001)对提取 P—SV 转换震相的线性滤波方法(Vinnik 1977; Paulssen, 1988)进行了改进, 引进了立体角(即转换震相 SV 震动方向与其理论方向的夹角)约束, 形成了线性-偏振滤波方法, 使转换震相的提取更加快捷和客观。Zang 和 Zhou(2002)分析了 N 次根倾斜叠加方法在提取地幔间断面次生波中的作用和步骤, 指出 N 次根倾斜叠加, 可以提高信噪比, 使信号清晰, 但同时使信号变形, 是提取信号到时的较好方法。同时他们指出间断面倾斜可以影响信号的慢度和走时, 因此研究了对间断面倾斜的校正方法。Zhou 和 Zang(2001)在研究牡丹江及海拉尔台下的间断面深度时, 进一步发展了 N 次根倾斜叠加方法, 使之可以用于同一台站记录到的许多个不同地震资料的叠加。通过对震源深度的校正, 利用这一方法研究了台下方间断面, 使 N 次根倾斜叠加方法的应用得到扩展。

利用不同的方法对地幔间断面的深度和状态的研究近几年逐渐增多, 并形成地球内部结构研究的一个重要方向。Zhou 和 Zang(2001)利用线性-偏振滤波方法和 N 次根倾斜叠加方法, 分析了中国东北牡丹江和海拉尔台记录的数字化资料, 研究了两台下方地幔间断面的情况。两种方法得到的结果基本一致。表明在牡丹江和海拉尔台下方, 除了 220, 410, 520 和 660 km 深度附近存在间断面之外, 在 140, 350, 570, 740 和 1 080 km 深度附近也有间断面存在的可能。牡丹江台下的 660~840 km 之间间断面结构比海拉尔台下方复杂, 似有分层结构, 可能反映了俯冲带的影响。

Yang 和 Zhou(2001)利用接收函数方法研究了中国及邻区的上地幔间断面的埋藏深

度,使用 18 个数字化台站的三分量地震记录,得到 263 条径向接收函数.通过对 P410S 和 P660S 与 P 的到时差的理论值和观测值的拟合,确定了 410 km 和 660 km 两个间断面的深度.各台站之下 410 km 间断面有明显的横向不均匀性和区域性,平均深度为 403 km,最浅为 390 km,最深为 416 km;660 km 间断面也有横向不均匀性,平均深度为 663 km,最浅为 653 km,最深者 672 km.

Zhou 等(2002)利用南北加州台网、西北太平洋台网和德国台网的资料,研究了日本伊豆-小笠原下方间断面起伏情况,发现在 170, 220, 300, 410, 660, 850 和 1 150 km 的深度存在速度间断面.伊豆-小笠原地区 410 km 间断面抬升,660 km 间断面下降,并存在区域性差异,与俯冲带的俯冲深度有关. Jiang 等(2002)研究了鄂霍茨克海下面间断面情况,结果表明在 150, 280, 410, 520, 660 和 900 km 附近均有间断面存在,410 km 间断面发生抬升,而 660 km 间断面出现下沉,在北部 660 km 间断面受俯冲带影响明显.

6 实验室研究

近几年来,在高温高压下对地幔物质的物理性质的研究工作也逐渐开展起来. Zhao 等(1999),利用人工合成的多晶材料,研究了镍锆尖晶石(Ni_2GeO_4)和两相介质($(\text{Mg}, \text{Ni})_2\text{GeO}_4$)在位错域和扩散域的高温蠕变性质.在围压为 300 MPa,温度为 1 223~1 523 K 的条件下,得到镍锆尖晶石在位错域的流动机制为位错蠕变(应力指数 $n=2.9\pm0.1$),在扩散域的流动机制为颗粒边界的扩散蠕变(coble creep).当把橄榄石和尖晶石的资料归一化并外推到地球环境下,发现在位错蠕变区域,尖晶石的强度类似于橄榄石的强度.在扩散域,在粗粒度的情况下,尖晶石的强度明显大于橄榄石;但当粒度减小时,尖晶石的强度变得比橄榄石要弱,因为它对颗粒粒度敏感. Lawlis 等(2001)还研究了含铁量不同的橄榄石单晶在不同温压条件下的水溶性.样品在 300 MPa 的静水压和 1 000~1 300℃的温压条件下进行热压.结果表明,橄榄石中的水含量随铁含量的增加而增加.对于同样铁含量的橄榄石,则随温度的增加,橄榄石水含量也增加.

岩石电性性质随温度的变化是实验研究的一个重要方面. Liu 等(2001a)在高压(1.0~2.5 GPa)和高温(563~1 173 K)的条件下研究了花岗岩、玄武岩和辉橄岩 3 种岩石电导率随温度的变化趋势.结果表明,这几种岩石的电导率均随温度的升高而变化,在 563~1 173 K 的温度范围内电导率发生了 3~5 个数量级的变化.并且均在一定温度附近,电性会有突变或较大变化,如在 1.5 GPa、973 K 附近,辉橄岩的电性有突然的变化;在 2.5 GPa、710~830 K 附近,玄武岩电导率存在突变,认为可能是与岩石的部分熔融过程有关. Zhu 等(1999, 2001)分别在 1.0~3.0 GPa、300℃~870℃和 2.5~4.0 GPa、220℃~780℃的温压条件下测定了蛇纹石的电导率,并用阻抗谱分析了其微观电传导机制.结果表明,蛇纹石的脱水作用可使电导率显著增大.

地震波速度随温度的变化及成因也是实验室研究的重要课题. Xie 等(2000)研究了在 1.0 GPa 围压下蛇纹岩脱水过程的弹性性质.实验表明,当温度升高至 640℃时超声波纵波速度随温度的升高而急剧下降,但超声波振幅明显增大.分析表明与蛇纹石的脱水有关. Gong 等(2000)用光分析技术在 40~140 GPa 的冲击压力范围内测量了钙钛矿型顽火辉石的声速.纵波的声速-压力曲线比 PREM 模型的低约 0.5%,S 波的则高出约 2%;实验数据确认在下地幔的温压条件下钙钛矿型顽火辉石是稳定的;实验结果说明,下地幔主

要由 $(\text{Mg}_{1-x}, \text{Fe}_x)\text{SiO}_3$ 组成, 仅允许少量 $(\text{Mg}_{1-x}, \text{Fe}_x)\text{O}$ 的存在. Zhou 等(1999)利用在高温(最高温度为 $1\,350^\circ\text{C}$)、高压($2.0\,\text{GPa}$)条件下测量粗面玄武岩的纵波速度, 经过详细薄片的鉴定表明, 对应着粗面玄武岩弹性波速度的变化, 实验样品已经发生了相变. 据此讨论了粗面玄武岩中含水矿物脱水、固固相变、部分熔融与其弹性波速度之间的关系.

品质因子是表征介质粘-弹性的重要参数. 叶林等(2001)利用波形反演并对杆状样品的波形进行了反演, 计算其 Q 值并对波形反演法进行了研究, 认为由衰减引起的速度对数频散在杆波情况下仍然成立, 即使在 Q 值较小时, 对波形的影响也并不显著, 因此不会对反演计算结果的可靠性造成影响.

顾芷娟等(2000)进行了高温高压下橄榄石含水效应与光学性质的实验研究. 结果表明, 水不但可以进入矿物空隙, 而且还能进入其晶格中. 与干样相比, 橄榄石显示了特殊的光学性质和红外吸收谱带, 矿物比重也下降约 0.02 .

7 其它方面

除了上述6个方面对地球内部结构及物性的研究, 还有其它方面, 但比较分散, 这里仅简述一些工作, 由于学科的交叉, 有些研究工作将会在其它的综述中述及.

近几年来, 地球内部(包括岩石圈)粘度的研究也是中国科学家研究的课题. 但地幔粘度研究得较少. Yang 和 Shum(2001)利用观测的平极长期漂移速度作为约束, 基于 $1\,066\,\text{B}$ 地球模型估计了下地幔的平均粘度为 $0.5 \times 10^{22} \sim 1.7 \times 10^{22}\,\text{Pa} \cdot \text{s}$. Zang 等(2003)考虑了摩擦滑动、脆性破裂及蠕变3种主要的流变机制在岩石圈中的作用, 计算了华北岩石圈($105^\circ \sim 124^\circ\text{E}$, $30^\circ \sim 42^\circ\text{N}$)粘度的三维分布. 结果表明, 岩石圈的粘度有着明显的分层特征. 在应变率为 $\dot{\epsilon} = 10^{-15}\,\text{s}^{-1}$ 的情况下, 上地壳上部为脆性区, 下部有可能是以蠕变为主的延性区; 中地壳可以是以脆性破裂为主的脆性区, 也可以是上层以脆性破裂为主但大部分是以蠕变为主的延性区; 而下地壳几乎均是以蠕变为主的延性区; 壳下岩石圈上部可以是脆性破裂为主也可以是以蠕变为主的高强度区. 热岩石圈底界处的有效粘度的量级平均在 $10^{20}\,\text{Pa} \cdot \text{s}$.

利用重力资料进行地球内部物理性质的研究也是研究的一个重要方面. Lei 和 Xu (2002)提出了有直观地球物理意义的三频谱线法, 采用3个超导重力台站的资料进行解算, 获得的FCN常数与VLBI的观测基本吻合. Lei 等(2002)利用超导重力仪对2001年6月30日在秘鲁发生的 $M_s = 7.8$ 地震的记录资料进行检测, 得到了地球自由震荡的 ${}_0S_0-{}_0S_{32}$ 全部基频振型及 ${}_0S_2-{}_0S_3$ 的谱线分裂结果, 与HB1模型很符合.

Ye 和 Bradford(2001)利用不同的粘度模型, 分别研究了地幔内部密度异常及板块运动激发的地幔流动的热效应以及其对地表热流产生和分布特征的影响. 结果显示, 若下地幔粘度比上地幔粘度高出30倍, 则所得结果拟合得更好, 并给出了岩石圈和 D'' 层温度随深度的剧烈变化, 与其它方法得到的结果一致.

Sun 等(2002)运用Lagrange乘子非协调区域分解法(LMDDM)与并行Lagrange乘子非连续变形分析法(LMDDA)耦合的有限元算法, 研究了四维球壳内不可压缩与常粘度牛顿流体非定常地幔流动, 求解出亚洲大陆下地幔流动的物理场.

地球介质非完全弹性参数对研究地幔对流、大陆动力学是非常重要的. Wang 和 Di (2000)从一般线性流变体介质内波动方程出发, 导出了由观测的地震体波波速和振幅确定

一般线性流变体介质内虎克定律系数的两种具体方法及相应的理论公式. 在线性近似下, 这些参数可确定地球介质的非弹性性质.

把磁场观测数据向导电区域延拓, 是地球电磁学的经典问题之一. 马石庄(1999)从准静态近似和非零矢势规范的电磁场方程出发, 依据矢量的球面分解唯一性定理, 建立了支配三维非均匀电导率分布全球地幔中的环型场、极型场和电位势场的耦合方程组; 考虑地球深部研究对认识全球地幔非均匀性横向变化尺度的限制, 提出横向缓变意义下三维非均匀地幔中电场和磁场的摄动理论. 其零级近似不要求电导率分布一维球对称, 并研究了地幔深源极型场的反扩散问题, 作为零级近似可解的例证. 在利用地面磁场观测反演到核幔边界时, 可以考虑地幔横向非均匀性影响.

张永红等(1999)讨论了上地幔各向异性介质中的潮汐运动方程, 根据 Dziewonski 提供的地球模型参数, 利用经典的 Runge-Kutta 数值积分方法, 计算了固体潮勒夫数和负荷勒夫数. 结果表明, 考虑上地幔介质各向异性与否对固体潮勒夫数的影响较小(约为 0.06%), 而对负荷勒夫数的影响较大(2.5%). 进一步说明了中低阶负荷勒夫数对上地幔介质特性的敏感性, 以及上地幔各向异性介质对固体潮及负荷潮的影响.

参 考 文 献

- 顾芷娟, 孙天泽, 张虹. 2000. 橄榄石高温高压含水效应与光学性质实验研究[J]. 地球物理学进展, **15**(4): 35~40
- 胡家富, 段永康. 2000. 利用基阶面波反演地壳上地幔的 Q_p 结构[J]. 地震研究, **23**(3): 318~323
- 姜枚, 许志琴, Hirn A, 等. 2001. 青藏高原及其部分邻区地震各向异性和上地幔特征[J]. 地球学报, **22**(2): 111~116
- 马胜利, 马瑾. 2003. 我国实验岩石力学与构造物理学研究的若干新进展[J]. 地震学报, **25**(5): 526~532
- 马石庄. 1999. 三维非均匀地幔中深源电场和磁场的谱理论(II)——横向缓变摄动和极型场快速扩散[J]. 地球物理学报, **42**(3): 322~332
- 阮爱国, 王椿镛. 2002. 上地幔各向异性的反演方法. 西北地震学报, **24**(2): 104~112
- 许忠淮, 石耀霖. 2003. 岩石圈结构与大陆动力学[J]. 地震学报, **25**(5): 510~525
- 叶林, 李伟东, 施行觉. 2001. 波形反演法测量 Q 值的实验室研究[J]. 地球物理学进展, **16**(1): 31~38
- 张海明, 陈晓非. 2003. 地震波研究[J]. 地震学报, **25**(5): 463~472
- 张永红, 李国营, 孙和平. 1999. 上地幔各向异性介质对固体潮及负荷潮的影响[J]. 地球物理学报, **42**(3): 333~340
- 赵永红, Ginsburg S, Kohlstedt D L. 2001. 橄榄岩水溶性与含铁量相关性的研究[J]. 岩石学报, **17**(1): 123~128
- 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 2002. 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, **45**(5): 646~664
- Cao Xiaolin, Zhu Jieshou, Zhao Lianfeng, *et al.* 2001. 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 Seismologica Sinica*, **14**(2): 117~128
- Chen Weitian, Chen Xiaofei. 2002. Modal solutions in stratified multi-layered fluid-solid half-space[J]. *Science in China (Series D)*, **45**(4): 358~365
- Gong Zizheng, Xie Hongsen, Huo Hui, *et al.* 2000. High-pressure sound velocity of perovskite-enstatite and the possible composition of the Earth's lower mantle[J]. *Chinese Science Bulletin*, **45**(10): 921~925
- He Zhengqin, Ding Zhifeng, Ye Tailan, *et al.* 2001. Surface wave tomography of the crust and upper mantle of Chinese mainland and its neighboring region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **14**(6): 634~641
- He Zhengqin, Ding Zhifeng, Ye Tailan, *et al.* 2002. Group velocity distribution of Rayleigh waves and crustal and upper mantle velocity structure of the Chinese mainland and its vicinity[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **15**(3): 269~275
- Jiang Zhiyong, Zang Shaoxian, Zhou Yuanze. 2002. Topographies of seismic velocity discontinuities and penetrations of subducting slabs beneath the Sea of Okhotsk[J]. *Chinese Science Bulletin*, **47**(24): 2 034~2 041

- Lawlis J D, Zhao Yonghong, Karato S. 2001. High-temperature creep in Ni_2GeO_4 : A contribution to creep systematics in spinel[J]. *Phys Chem Min*, **28**(8): 557~571
- Lei Xiang, Xu Houze, Sun Heping. 2002. Check of free oscillation signal with SG data[J]. *Chinese Science Bulletin*, **47**(18): 1 432~1 436
- Lei Xiang, Xu Houze. 2002. Tri-frequency spectrum method and results for resolving the parameters of earth's liquid core free mutation[J]. *Science in China (Series D)*, **45**(4): 325~336
- Lei Jianshe, Zhou Huilan. 2002. 3-D velocity structure of P wave in the upper mantle beneath southwestern China and its adjacent areas[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **15**(2): 134~142
- Li Guangpin, Xu Guoming, Gao Ergen, *et al.* 2000. Q_p tomography under the crust and upper mantle in eastern China [J]. *Acta Seismologica Sinica*, **13**(1): 84~92
- Li Hongyi, Liu Futian, Sun Ruomei, *et al.* 2001. Crust and upper mantle structure in east China and sea areas[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **14**(5): 503~511
- Liu Bin, Zhang Qunshan, Wang Baoshan, *et al.* 2000a. The origin of the earth inner core's seismic anisotropy[J]. *Chinese J Geophys*, **43**(3): 338~347
- Liu Futian, Liu Jianhua, Zhong Dalai, *et al.* 2000b. The subducted slab of Yangtze continental block beneath the Tethyan orogen in western Yunnan[J]. *Chinese Science Bulletin*, **45**(5): 466~471
- Liu Jianglin, Bai Wuming, Kong Xiangru, *et al.* 2001a. Electrical conductivity of granite, basalt and pyroxene peridotite at high temperature and pressure[J]. *Chinese J Geophys*, **44**(4): 523~528
- Liu Kun, Zhang Zhongjie, Hu Jiafu, *et al.* 2001b. Frequency band—dependence of S-wave splitting in China mainland and its implications[J]. *Science in China (Series D)*, **44**(7): 659~665
- Liu Xiqiang, Zhou Huilan, Li Hong, Ji Aidong. 2001c. Anisotropy of the upper mantle in Chinese mainland and its vicinity[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **14**(4): 359~370
- Liu Yajing, Ye Guoyang, Mao Xinhua, *et al.* 2002. 2-D viscoelastic FEM simulation on stress state in the deep part of a subducted slab[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **15**(3): 301~308
- Mao Xinghua, Liu Yajing, Ye Guoyang, *et al.* 2002. 2-D elastic FEM simulation on stress state in the deep part of a subducted slab[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **15**(3): 294~300
- Ning Jieyuan, Zang Shaoxian. 2001. Numerical modelling of wave velocity structure of subduction zones[J]. *Chinese J Geophys*, **44**(2): 187~195
- Ning Jieyuan, Zang Shaoxian. 1999. On the generation of deep focus earthquakes in subduction zones[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **12**(5): 573~583
- Paulssen H. 1988. Evidence for a sharp 670 km discontinuity as inferred from P-to-S converted waves[J]. *J Geoph Res*, **93**: 10 489~10 500
- Ruan Aiguo, Wang Chunyong. 2002. The upper mantle anisotropy in Yunnan area, China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **15**(3): 276~284
- Shi Yaolin, Fan Taoyuan. 2001. Maximum scale of continental crust sliver driven by subducting oceanic slab: south island of New Zealand and ultra pressure metamorphism at Dabie, China[J]. *Chinese J Geophys*, **44**(6): 741~747
- Sun Xunying, Zhang Huai, Liang Guoping. 2002. Mantle flow beneath the Asian continent and its force to the crust[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **15**(3): 241~246
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Hu Jiafu, *et al.* 2001. Rayleigh wave dispersion and three-dimensional velocity structure in the continent and its margin of Southeastern China[J]. *Chinese J Geophys*, **44**(5): 650~665
- Vinnik L P. 1977. Detection of waves converted from P to SV in the mantle[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **15**: 39~45
- Wang Miaoyue, Di Qingyun. 2000. Method of probing anelasticity parameters of earth medium[J]. *Chinese J Geophys*, **43**(3): 348~357
- Wei Dongping, Zhou Huilan, Wang Zhiqiu. 2000. Low velocity zone of upper mantle and its effect on PdSwr phase related to 670 km discontinuity[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **13**(1): 67~74
- Wu Jianping, Ming Yuehong, Wang Chunyong. 2001. S wave velocity structure beneath digital seismic stations of Yun-

- nan province inferred from teleseismic receiver function modeling[J]. *Chinese J Geophys*, **44**(2): 223~232
- Xie Hongsen, Zhou Wenge, Li Yuwen, *et al.* 2000. Elastic characteristics of serpentinite dehydration at high temperature-high pressure and its significance[J]. *Chinese J Geophys*, **43**(6): 851~856
- Xu Peifen, Liu Futian, Wang Qingchen, *et al.* 2000a. Seismic tomography beneath the dabié-sulu collision orogeny—3-D velocity structures of lithosphere[J]. *Chinese J Geophys*, **43**(3): 407~415
- Xu Peifen, Sun Ruomei, Liu Futian, *et al.* 2000b. Seismic tomography showing subduction and slab breakoff of the Yangtze block beneath the Dabie-Sulu orogenic belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, **45**(1): 70~74
- Xu Yi, Liu Futian, Liu Jianhua, *et al.* 2001a. Seismic tomography beneath the orogenic belts and adjacent basins of northwestern China[J]. *Science in China (Series D)*, **44**(5): 468~480
- Xu Yi, Liu Futian, Liu Jianhua, *et al.* 2001b. Deep features of continental collision belts in north-western China and their dynamic significance[J]. *Chinese J Geophys*, **44**(1): 32~40
- Yang Yi, Zhou Huilan. 2001. Application of receiver function method to estimate the buried depths of discontinuities in the upper mantle beneath China and adjacent area[J]. *Chinese J Geophys*, **44**(6): 769~778
- Yang Zhigen, Shum C K. 2001. Secular polar motion and the estimation of mean lower mantle viscosity[J]. *Chinese J Geophys*, **44**(6): 727~733
- Ye Zhengren, Hager B. 2001. The generation and distribution of global heat flow[J]. *Chinese J Geophys*, **44**(2): 168~176
- Zang Shaoxian, Li Chang, Ning Jieyuan, *et al.* 2003. A preliminary model for 3-D rheological structure of the lithosphere in North China[J]. *Science in China (Series D)*, **46**(5): 461~473
- Zang Shaoxian, Ning Jieyuan, Jing Zhicheng. 2001. Study on the rheology of subducting slabs[J]. *Science in China (Series D)*, **44**(12): 1 119~1 127
- Zang Shaoxian, Ning Jieyuan. 2001. Effects of metastable Olivine on negative buoyance in subduction zones and their dynamic significance[J]. *Chinese J Geophys*, **44**(3): 330~339
- Zang Shaoxian, Shi Yaolin, Shi Xingjue. 1999. Structure, dynamics and physical properties in the Earth's interiors[A]. In: Chinese National Committee for International Union of Geodesy and Geophysics ed. *China National Report on Seismology and Physics of the Earth's Interiors for XXIIInd General Assembly of IUGG*[C]. Beijing: China Meteorological Press, 16~28
- Zang Shaoxian, Zhou Yuanze. 2002. The method of N-th root slant stack and its application in study of mantle discontinuities[J]. *Chinese J Geophys*, **45**(3): 420~429
- Zeng Rongsheng, Ding Zhifeng, Wu Qingju, *et al.* 2000. Seismological evidences for the multiple incomplete crustal subductions in Himalaya and southern Tibet[J]. *Chinese J Geophys*, **43**(6): 780~797
- Zhao Y H, Lawlis J D, Lee K H, *et al.* 1999. Deformation of $(\text{Mg}, \text{Ni})_2\text{GeO}_4$: the effects of the Olivine-Spinel transformation. *EOS*, **80**(45): 1 027~1 028
- Zhou Wenge, Xie Hongsen, Zhao Zhidan, *et al.* 1999. The effect of phase transition on the compressional wave velocity for a trachybasalt at high temperature and high pressure[J]. *Chinese Science Bulletin*, **44**(15): 1 415~1 418
- Zhou Yuanze, Jiang Zhiyong, Zang Shaoxian. 2002. Regionalized difference of the 660 km discontinuity beneath Izu-Bonin[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **15**(3): 333~340
- Zhou Yuanze, Zang Shaoxian. 2001. Mantle discontinuities beneath the stations MDJ and HIA and their implications[J]. *Chinese J Geophys*, **44**(6): 748~759
- Zhu Maoxue, Xie Hongsen, Guo Ji, *et al.* 2001. Impedance spectroscopy analysis on electrical properties of serpentine at high pressure and high temperature[J]. *Science in China (Series D)*, **44**(4): 336~345
- Zhu Liangbao, Xu Qing, Chen Xiaofei. 2002. Group velocity Rayleigh wave in Chinese continent and its adjacent seas [J]. *Chinese J Geophys*, **45**(4): 491~501
- Zhu Maoxue, Xie Hongsen, Guo Ji, *et al.* 1999. Electrical conductivity measurement of serpentine at high temperature and pressure[J]. *Chinese Science Bulletin*, **44**(20): 1 903~1 907

STRUCTURE AND PHYSICAL PROPERTIES OF THE EARTH'S INTERIOR

Zang Shaoxian¹⁾ Zhou Huilan²⁾ Wei Rongqiang¹⁾ Zhou Yuanze²⁾

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

2) *Graduate School, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China*

Abstract: The studies on the structure and physical properties of the Earth's interior done by Chinese geophysicists from 1999 to 2002 were reviewed in this paper. It includes several research areas: the structure of the Earth's interiors using seismic tomography, anisotropy of the upper mantle in China and its adjacent areas, quality factor Q_β for S waves, subduction zone, mantle discontinuities, physical properties of Earth's materials and others. The review concerns mainly the contents, the methods and the results of the studies. It can be seen that new progress in the study on the structure and physical properties of the Earth's interior has been made since the last 4 years in China. It is shown on three aspects: advancement made on some preexistent areas; pioneering on some new fields and new methods adopted.

Key words: structure of the Earth's interior; physical property of the Earth's materials; seismic tomography; anisotropy; subduction zone; mantle discontinuity