

彭艳菊, 黄忠贤, 苏伟等. 中国大陆及邻区海域地壳上地幔各向异性研究. 地球物理学报, 2007, 50(3): 752 ~ 759

Peng Y J, Huang Z X, Su W, et al. Anisotropy in crust and upper mantle beneath China continent and its adjacent seas. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(3): 752 ~ 759

中国大陆及邻区海域地壳上地幔各向异性研究

彭艳菊¹, 黄忠贤¹, 苏伟², 郑月军¹

1 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

2 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘 要 利用分别由 Love 波和 Rayleigh 波得到的 S 波速度结构的差值 ($V_{SH} - V_{SV}$) 对中国大陆及邻区海域 (70°E ~ 145°E, 15°N ~ 55°N) 地壳上地幔中的偏振各向异性进行研究. 初步研究结果表明, 各向异性在空间分布上存在不均匀性: (1) 在小于 150 km 的深度范围内, $V_{SH} > V_{SV}$ 的各向异性体占主导地位, 反映出在地球的浅部岩石圈内的水平应力作用及软流圈顶部物质的水平向流动对各向异性的形成起主导作用. 在大陆地区, 各向异性的强度随深度有显著变化. 上地壳和上地幔盖层中的各向异性普遍较弱, 而在流变性较强的下地壳和软流圈存在较大范围各向异性. 这一现象说明下地壳在岩石圈变形中可能有解耦作用. (2) 在大于 200 km 深度的软流圈下部主要表现为 $V_{SH} < V_{SV}$ 的各向异性, 说明地幔物质垂直运动相对占优势地位. (3) 在中国大陆东部可以看出一个大致趋势: 在构造比较稳定的地区, 岩石圈中 $V_{SH} > V_{SV}$ 的各向异性比较显著, 而软流圈中 $V_{SH} < V_{SV}$ 的各向异性较弱; 在构造活动比较强烈的地区, 软流圈中 $V_{SH} < V_{SV}$ 的各向异性占主导地位. (4) 印度板块低角度向青藏高原下俯冲影响了中国大陆西部地区各向异性的特征. 印度板块向北运动水平挤压中国西部大陆, 使得物质定向重结晶, 从而在岩石圈下部产生显著的 $V_{SH} > V_{SV}$ 各向异性.

关键词 中国大陆及海域, 地壳, 上地幔, 偏振各向异性

文章编号 0001-5733(2007)03-0752-08

中图分类号 P315

收稿日期 2006-01-16, 2007-01-31 收修定稿

Anisotropy in crust and upper mantle beneath China continent and its adjacent seas

PENG Yan-Ju¹, HUANG Zhong-Xian¹, SU Wei², ZHENG Yue-Jun¹

1 Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract Using the difference of S wave velocity structures derived respectively from Love and Rayleigh waves, the polarization anisotropy in crust and upper mantle beneath China continent and adjacent seas is studied. The result indicates that the distribution of anisotropy is spatially uneven. (1) The $V_{SH} > V_{SV}$ anisotropy is dominant in the upper 150 km, which indicates that the horizontal stress in shallower lithosphere and the horizontal mass flow in upper asthenosphere are the leading factors in the formation of polarization anisotropy. In the land area the anisotropy intensity changes markedly with depth. The anisotropy in upper crust and upper mantle lid is generally weak, while the anisotropy is intense in the rheologically weak lower crust and asthenosphere, which indicates that the lower crust may decouple in the lithosphere deformation. (2) $V_{SH} < V_{SV}$ anisotropy is the main characteristic of the lower asthenosphere beneath 200 km, which reflects the vertical movement of the mantle mass. (3) The overall picture in eastern China continent is that in stable blocks $V_{SH} >$

基金项目 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX3-SW-234-2)、地震科学联合基金课题 (102019)、国家自然科学基金 (40274010) 资助.

作者简介 彭艳菊, 女, 1976 年生, 副研究员, 现从事地震面波层析成像以及地震危险性方面的研究. E-mail: pengyj408@126.com

V_{SV} anisotropy is more prominent in lithosphere and $V_{SH} < V_{SV}$ anisotropy is weaker in asthenosphere, in tectonically active areas it is on the contrary. (4) In western China the anisotropy is apparently related to the subduction of India plate beneath Tibet. The conspicuous $V_{SH} > V_{SV}$ anisotropy is the result of the collision and compression between India plate and Eurasian continent which makes the mantle material recrystallize in preferred orientation.

Keywords China continent and adjacent seas, Crust, Upper mantle, Polarization anisotropy

1 引言

组成岩石的晶粒在微观上具有很强的各向异性,当这些晶粒随机无序地排列时,岩石在宏观上表现出各向同性性质.但是在某些构造因素的作用下,地球介质会表现出宏观的各向异性,例如,沉积过程中形成的交互薄层结构会造成一种称为横向各向同性的各向异性;在岩石圈冷却过程中应力的作用以及软流圈或地幔对流中的流动会引起晶格的定向排列,因而造成大规模的各向异性;岩石中由于应力作用而引起的裂隙定向排列也会造成各向异性.地壳及上地幔速度各向异性包含着大量的关于构造运动的信息,可以为判断岩性、应力状态、推断构造演化历史等提供宝贵的资料,因而受到广泛的重视.

自 20 世纪 60 年代以来开展了很多关于各向异性的研究.1964 年, Hess^[1] 首先在太平洋地区发现各向异性,即垂直于洋中脊的 Pn 波传播速度比平行于洋中脊方向上传播速度快;随后 Forsyth^[2] 以及 Michell 和 Yu^[3] 利用 Rayleigh 波和 Love 波频散资料进行独立反演,研究了太平洋地壳上地幔的各向异性;80 年代 Dziewonski 和 Anderson^[4,5] 在建立全球地球模型 PREM 模型时引入各向异性,结果表明在上地幔 220km 深度范围内存在 2%~4% 的偏振各向异性;进入 90 年代,随着资料的积累,各向异性的研究步入了一个崭新的阶段:Nataf et al.^[6,7]、Montagner 和 Tanimoto^[8,9] 利用 Rayleigh 波和 Love 波频散,反演了全球上地幔 S 波各向异性分布;Silver^[10]、Vinnik^[11] 利用 S 波分裂研究了大陆地幔各向异性;Friederich 和 Huang^[12] 利用 Rayleigh 波和 Love 波频散资料研究了德国南部上地幔各向异性;Leveque et al.^[13] 利用 Rayleigh 波和 Love 波进行波形反演研究了印度洋地区上地幔各向异性.

中国地区介质各向异性的研究始于 20 世纪 90 年代.1991 年,宋仲和等^[14] 通过面波研究首先提出在我国西部地区壳幔中存在各向异性,接下来又研究了中国南北带上地幔中的各向异性^[15].李白基^[16]

利用 Pn 波速的方位测量法与 S 波分裂法研究了昆明地区上地幔各向异性;郑斯华等^[17~31] 用 S 波分裂的方法分别研究了中国大陆、青藏高原、云南等地区的上地幔各向异性;Huang^[32] 利用 Rayleigh 波研究了东亚地区的面波方位各向异性.

从上述研究可以看出,S 波分裂和面波速度成像是探测深部各向异性主要手段.S 波分裂方法的横向分辨能力强,但对于各向异性存在的深度范围缺乏分辨能力,对于多层各向异性的情况不易处理,而且不能应用于无法布设地震台站的地区.面波方法的横向分辨能力有限,但在垂向分辨能力上具有一定的优势,而且能对所有地区进行取样.

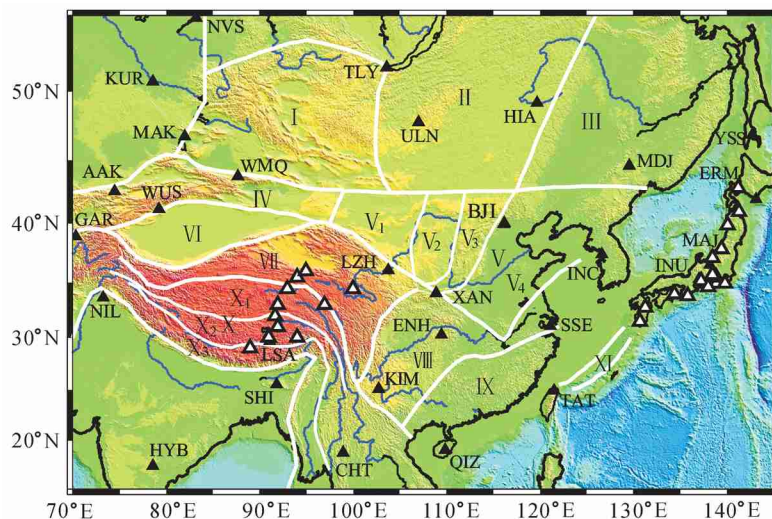
介质各向异性对于面波传播的影响表现在两个方面:一是由 Rayleigh 波和 Love 波所确定的同一段路径上横波速度结构不同,即存在 SV 和 SH 波速度结构的差异,称为偏振各向异性;另一种表现为同一类型的波沿不同方向传播速度不同,称为方位各向异性.假设介质是简单的只有 5 个独立的弹性常数的横向各向同性介质,当对称轴垂直时,只表现出偏振各向异性,当对称轴水平时,同时表现出偏振各向异性和方位各向异性.已有大量观测资料表明,地球介质往往同时表现出方位各向异性和偏振各向异性,由于资料不足以同时考虑这两种各向异性,我们在本研究中不考虑方位各向异性.

我们利用 Rayleigh 和 Love 波资料分别反演得到了两套中国大陆及邻近海域的地壳上地幔 S 波速度结构^[33,34],本文根据二者的差异讨论地壳上地幔偏振各向异性,给出研究区域内偏振各向异性的垂直分布图像,分析不同深度范围内各主要构造块体各向异性的特征,并对其与构造运动的关系给出初步解释.

2 资料与方法

2.1 研究区域与资料

本文的研究范围为 70°E~145°E,15°N~55°N.主要收集了中国及周边地区 CDSN、IRIS 以及



西蒙古地块 West Mongolia, 东蒙古地块 East Mongolia, 阿穆尔地块 Amuria, 天山褶皱系 Tianshan fold belt, 华北地台 North China platform: V₁ 阿拉善 Alxa, V₂ 鄂尔多斯 Ordos, V₃ 山西地堑 Shanxi graben, 4 华北平原 North China plain, 塔里木盆地 Tarim basin, 松潘 - 甘孜褶皱系 Songpan Garze fold belt, 扬子地台 Yangtze platform, 华南褶皱系 South China fold belt, 青藏高原 Tibetan Plateau: X₁ 羌塘地块 Qiangtang block, X₂ 拉萨地块 Lhasa block, X₃ 喜马拉雅地块 Himalaya block, 冲绳海槽 Okinawa Trough. ▲ Station of CDSN, IRIS and GEOSCOPE, Station of PASSCAL and FREESIA network.

图 1 研究区域台站分布及构造分区图^[35]

Fig. 1 Station distribution and tectonic map in the study area^[35]

GEOSCOPE 台网地震台的数字记录, 另外还包括日本 FREESIA 台网以及 1991 ~ 1992 年中美合作在西藏布设的 11 个流动观测台的记录. 研究区域及台站分布情况如图 1 所示.

首先利用频时分析方法提取了从 7.3 ~ 184s 共 43 个周期的 Love 波和 Rayleigh 波的群速度频散曲线, 然后对路径相近的事件进行合并, 并经过初步反演去掉残差太大的路径, 最终参与反演的 Love 和 Rayleigh 波的路径数最多分别为 3886 条和 3785 条. 关于资料和反演方法的详细情况请参见文献 [32 ~ 34, 36 ~ 39].

2.2 方法

采用两步反演法. 首先分别提取出所有路径上 Love 波和 Rayleigh 波的群速度频散, 采用 Occam 反演方法^[37], 将研究区域划分成 $1^\circ \times 1^\circ$ 的网格, 取网格结点上的速度作为离散的模型参数, 利用双线性内插法计算出各结点之间的速度, 并对速度结构的光滑度加以约束, 分别反演出不同周期 Love 波和 Rayleigh 波群速度的空间分布, 从而得到空间各点的纯路径频散. Occam 反演方法引入光滑度约束, 基本上消除了网格划分过程中人为因素的影响, 而且对研究区域边界以及路径覆盖较差区域的结果起到了明显的改善作用. 根据纯路径频散, 采用 St. Louis 大

学的反演程序反演每个结点的 S 波速度结构. 对 Rayleigh 和 Love 波采用相同的分层结构模型, 分别反演得到了 V_{SV} 和 V_{SH} 两套速度结构模型. 用 checkerboard 方法做分辨率检验^[33, 34], 结果表明在中国大陆及东部海域分辨效果较好, 在研究区域边界上分辨能力较差, 在 $20^\circ\text{N} \sim 40^\circ\text{N}$ 之间中国境内及东

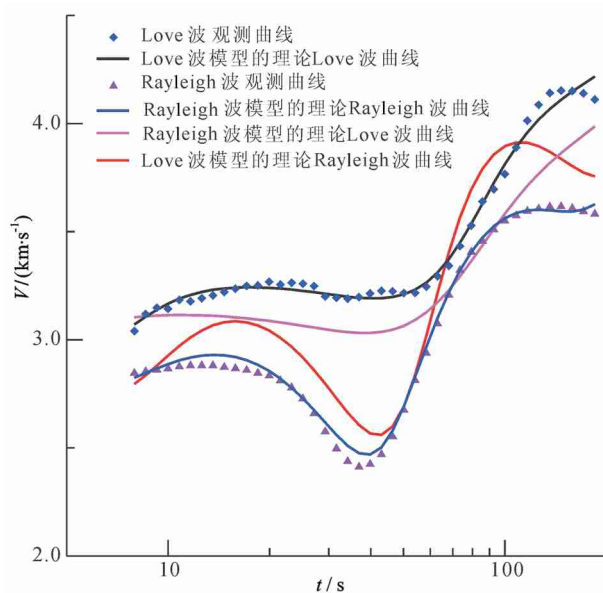


图 2 Love 和 Rayleigh 波观测曲线与理论曲线

Fig. 2 Observed and calculated dispersion from different models

部海域,浅部横向分辨大约为 3° ,到 200km 深处约 5° 。

图 2 所给实例的坐标点为 (33.0°N , 90.0°E)。分别用由 Love 和 Rayleigh 波反演得到的模型计算各自的理论群速度频散,结果与实际观测频散基本吻合。采用 Love 波和 Rayleigh 波所得到的模型分别计算 Rayleigh 波和 Love 波的理论频散,所得结果与实际观测频散存在一定的差异。Dziewonski 和 Anderson^[5]也发现,引入各向异性介质模型后,可以消除 Love 波和 Rayleigh 波分别处理时频散性质上的不一致,并减小了岩石层的厚度、增大了低速层的速度,证明由以上两种波得到的不一致的结果是由介质的各向异性引起的。

比较 Love 波和 Rayleigh 波的结构反演结果可以发现^[33,34]:S 波速度结构在整体上高低速分布是一致的,但速度值存在差异。考虑到采用两步反演法,在第一步得到的纯路径频散存在一定的误差,同时由于进行深度反演时解的不惟一性,因此由 Love 波和 Rayleigh 波给出的速度结构都包含误差。一般情况下速度误差小于 0.05 km/s ,因此当二者速度差值大于 0.1 km/s 时可以认为是有意义的,当达到 0.2 km/s 时可认为是可靠地反映了偏振各向异性特征。

3 各向异性分布及初步解释

图 3 给出有代表性的不同深度偏振各向异性 ($V_{\text{SH}} - V_{\text{SV}}$) 分布图,用于分析不同构造单元地壳和上地幔内各向异性分布特征。蓝色表示 $V_{\text{SH}} > V_{\text{SV}}$,红色表示 $V_{\text{SH}} < V_{\text{SV}}$ 。

3.1 上地壳内的偏振各向异性

由地表向下到 10 km ,大陆地区这一深度一般为上地壳,图 3a 显示该深度大部分地区各向异性不显著。垂直偏振速度大于水平偏振速度的地区主要有:塔里木、孟加拉湾、日本-小笠原岛弧;水平偏振速度大的地区主要有:青藏东部、阿穆尔地块、朝鲜半岛、我国东南沿海、东南亚、日本海北部以及西菲律宾海盆。

该深度在大陆地区相当于上地壳部分。塔里木、孟加拉湾 $V_{\text{SH}} < V_{\text{SV}}$ 较明显,可能是因为这两个地区的沉积层较厚,在水平压力作用下垂直裂隙发生闭合和张开,使得垂直偏振的剪切传播速度大于水平偏振的剪切波速;而在阿穆尔地块、朝鲜半岛-中国东南沿海表现出来的 $V_{\text{SH}} > V_{\text{SV}}$ 可能是构造运动遗

留在地壳内的化石各向异性;青藏东部以及东南亚地区的 $V_{\text{SH}} > V_{\text{SV}}$ 可能与现今构造运动有关,印度板块向欧亚大陆下俯冲,造成地壳物质围绕喜马拉雅东构造结发生旋转引起剪切变形。

在岛弧地区 $V_{\text{SH}} < V_{\text{SV}}$ 的各向异性可能与板片俯冲造成的热物质上升运动有关。而在海盆地区, $V_{\text{SH}} > V_{\text{SV}}$ 的各向异性是在海盆形成时期水平向的扩张运动然后冷却固结在洋壳内造成,如古老的菲律宾海盆地区,是这一深度内各向异性最强的地区,最高达 0.5 km/s ,日本海南部有较多陆壳残留,各向异性不明显,北部为洋壳结构,各向异性强度达到 0.3 km/s 。

3.2 中、下地壳内的偏振各向异性

由 15 km 向下到 35 km ,大陆地区这一深度一般为下地壳,青藏高原为中地壳。图 3b 的各向异性图像显示出大面积的蓝色区域,包括大华北地区、青藏和东南亚地区等现今构造运动强烈的地区,以及塔里木、阿拉善等构造稳定地区。

该深度的各向异性图像与 50 km 深度(图 3c)的相比有较大不同,说明在华北、青藏等现今构造运动强烈的地区,上地壳与上地幔盖层的运动(或变形)是不完全一致的,流变性强的下地壳起着解耦的作用;在塔里木、阿拉善等构造稳定地块也呈现显著的蓝色,可能说明这些地块的上地壳作整体转动或平移,与上地幔变形不一致,差异运动导致了下地壳中产生各向异性。

在海洋地区,这一深度相当于上地幔盖层,日本海、菲律宾海、南中国海都表现为蓝色,反映出海洋岩石圈形成时固结遗留下来的各向异性。由于海洋地区软流圈较浅,岩石圈下部由于温度升高而使各向异性不再保留。从各向异性随深度的变化可看出这几个边缘海盆之间的差异:西菲律宾海盆各向异性最显著并维持到较深的深度,日本海盆和南海海盆形成比菲律宾海晚,日本海现今还处于太平洋板块俯冲的影响之下,因此从 30 km 开始就不再显示出各向异性,而南海现今构造运动不强烈,在 30 km 深度仍有较显著的各向异性。

东海-东南沿海地区的下地壳到上地幔顶部表现为 $V_{\text{SH}} > V_{\text{SV}}$,向下到 50 km 左右为 $V_{\text{SH}} < V_{\text{SV}}$ 占优势,深度大于 100 km 后没有显著的各向异性,反映出由于菲律宾海板块的俯冲,在弧后俯冲板片的上方产生小规模地幔对流,在浅部以水平向流动为主,在中等深度垂直向流动占优势。

状态或运动方式是不同的.如青藏高原及周边地区,包括天山造山带等,主要是在印度板块向北推挤的作用下,岩石圈下部发生侧向伸展,而西菲律宾海盆软流圈顶部的各向异性可能是由于岩石圈板块对软流圈拖曳作用,或软流圈对板块的驱动作用,造成岩石圈与软流圈之间存在较大的运动梯度,从而引起各向异性.

3.5 软流圈内的偏振各向异性

自 200 km 开始,偏振各向异性的图像变成以红色为主,表现为 $V_{SH} < V_{SV}$,到 250 km 深处,红色成为主导,说明软流圈内部物质的垂直运动是产生偏振各向异性的主要原因.从图 3e 中可以看出,可分出 4 个红色区域,分别与 4 个不同的构造作用域相联系.(1) 印度 - 欧亚板块碰撞带,引起各向异性的原因可能有 2 种:发生在软流圈顶部和岩石圈底部(约 100 ~ 180 km)的、驱动印度板块的地幔流动,到达喜马拉雅弧附近时转而向下运动;或者是在缅甸弧后存在板块俯冲引起的地幔上升流;(2) 贝加尔湖及周边地区,在 50 ~ 120 km 深度内为蓝色,大于 200 km 为红色,表明贝加尔 - 蒙古高原之下存在地幔上升流,到地幔顶部转变为以水平流动为主,有研究者认为西蒙古高原的隆升及贝加尔湖形成的主要因素来自于地幔物质上涌^[40],我们的结果与这种机制相符合;(3) 华北 - 冲绳海槽地区,由于菲律宾板块俯冲,引起弧后的地幔对流,但这种作用不大可能远及华北地区,华北的地幔上升流动可能是早期构造运动(如扬子地块俯冲、库拉 - 太平洋板块俯冲)的残存作用与现今菲律宾板块俯冲等作用叠加在一起的结果;(4) 鄂霍茨克海 - 日本海地区,偏振各向异性与太平洋板块俯冲有关.

4 讨论与结论

综观图 3 可以看出,各向异性的分布在垂向和横向上都存在不均匀性,垂向上表现为上地壳、中下地壳、岩石圈、软流圈的差异,横向上表现为大陆和海洋以及中国大陆东西部的差别.

垂直方向上大约以 150 km 深度为界,150 km 以浅处代表 $V_{SH} > V_{SV}$ 的蓝色占主导地位,150 km 以深处代表 $V_{SH} < V_{SV}$ 的红色占主导地位.

大陆地区 150 km 以浅各向异性特征反映了上地壳、下地壳、上地幔盖层和岩石圈底部、软流圈顶部各向异性强度的变化.上地壳和上地幔盖层各向异性强度较弱,普遍小于 0.1 km/s,而下地壳和岩石

圈底部的各向异性强度一般高于 0.1 km/s.

在大于 200 km 的深度软流圈下部主要表现为 $V_{SH} < V_{SV}$ 的各向异性,说明地幔物质的垂直运动相对占优势地位.研究区内呈现出 4 个强度较大的各向异性体,与大陆及边缘海地区的 4 个不同的构造作用域有较好的对应关系.

中国大陆东部及海域的各向异性情况比较复杂,受太平洋板块、菲律宾板块与欧亚板块碰撞等多种因素影响,总体表现为:在构造比较稳定的地区,岩石圈中 $V_{SH} > V_{SV}$ 的各向异性比较显著,软流圈中 $V_{SH} < V_{SV}$ 的各向异性较弱;在构造活动比较强烈的地区,软流圈中 $V_{SH} < V_{SV}$ 的各向异性占主导地位.

大陆西部的各向异性体现了印度板块向青藏高原和缅甸弧下俯冲的影响.青藏高原地区的偏振各向异性与由 SKS 波分裂^[19~23,25,41]和面波^[32]得到的方位各向异性所体现的机制相吻合.塔里木盆地内 70 ~ 120 km 深度内出现 $V_{SH} < V_{SV}$ 的各向异性(图 3d)与宋仲和等的结果^[14]不一致,后者认为盆地主体内没有明显的各向异性,直到 120 km 深度才出现较小的约 - 0.10 ~ - 0.15 km/s ($V_{SV} - V_{SH}$) 的各向异性.但面波研究表明,自地壳至岩石圈下部存在比较明显的方位各向异性^[27],快波方向由地壳内的近 NS 转为岩石圈下部的 NE - SW 向.这种差异还需要进一步的研究.

本文利用分别由 Love 波和 Rayleigh 波得到的剪切波速度结构的差异分析了中国大陆及邻区海域地壳上地幔偏振各向异性的分布.结果表明偏振各向异性在垂向和横向上均存在差异,体现了与构造块体的变形和运动的关系.具体表现为:(1) 在小于 150 km 的深度范围内, $V_{SH} > V_{SV}$ 的各向异性体占主导地位,反映出在地球的浅部岩石圈内的水平应力作用及软流圈顶部物质的水平向流动对各向异性的形成起主导作用.在大陆地区各向异性的强度随深度有显著变化.上地壳和上地幔盖层中的各向异性普遍较弱,而在流变性较强的下地壳和软流圈存在较大范围的各向异性.这一现象说明下地壳在岩石圈变形中可能有解耦作用.(2) 在大于 200 km 深度的软流圈下部主要表现为 $V_{SH} < V_{SV}$ 的各向异性,说明地幔物质垂直运动相对占优势地位.(3) 在中国大陆东部可以看出一个大致趋势:在构造比较稳定的地区,岩石圈中 $V_{SH} > V_{SV}$ 的各向异性比较显著而软流圈中 $V_{SH} < V_{SV}$ 的各向异性较弱;在构造活动比较强烈的地区,软流圈中 $V_{SH} < V_{SV}$ 的各向异性占

主导地位。(4) 中国大陆西部,印度板块低角度向青藏高原下俯冲,影响了整个西部地区各向异性的特征。印度板块向北运动水平挤压中国西部大陆,使得物质定向重结晶,从而在岩石圈下部产生显著的 $V_{SH} > V_{SV}$ 各向异性。

本研究呈现的各向异性的主要特征都可以找到较合理的解释,但有些尚无法解释,如塔里木盆地上地幔中 $V_{SH} < V_{SV}$ 的各向异性、朝鲜半岛软流圈中显著的 $V_{SH} > V_{SV}$ 各向异性,受方法和资料的限制,各向异性结构的可靠性,特别是一些较次要的特征,留待今后进一步的深入研究。

致谢 作者感谢中国地震局地球物理研究所 CDSN 资料中心、美国华盛顿大学 IRIS 资料中心、法国 GEOSCOPE 资料中心及日本 FREESIA 台网中心为研究提供的数字地震资料。

参考文献 (References)

- [1] Hess H H. Seismic anisotropy of the upper mantle under oceans. *Nature*, 1964, **204**: 629 ~ 631
- [2] Forsyth D W. The early structural evolution and anisotropy of the oceanic upper mantle. *Geophys. J. Res. Astr. Soc.*, 1975, **43**: 103 ~ 162
- [3] Mitchell B J, Yu G K. Surface wave dispersion, regionalized velocity models, and anisotropy of the Pacific crust and upper mantle. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1980, **63**: 497 ~ 514
- [4] Dziewonski A M, Anderson D L. Preliminary reference earth model. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1981, **25**: 297 ~ 356
- [5] Dziewonski A M, Anderson D L. Seismic tomography of the Earth's interior. *America Scientist*, 1984, **72**: 483 ~ 494
- [6] Nataf H C, Nakanish I, Anderson D L. Anisotropy and shear-velocity heterogeneities in the upper mantle. *Geophys. Res. Lett.*, 1984, **11**: 109 ~ 112
- [7] Nataf H C, Nakanish I, Anderson D L. Measurements of mantle wave velocities and inversion for lateral heterogeneities and anisotropy. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**: 7261 ~ 7307
- [8] Montagner J P, Tanimoto T. Global anisotropy in the upper mantle inferred from the regionalization of phase velocities. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**: 4797 ~ 4819
- [9] Montagner J P, Tanimoto T. Global upper mantle tomography of seismic velocities and anisotropies. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**: 20337 ~ 20351
- [10] Silver P G, Winston Chan. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation. *J. Geophys. R.*, 1991, **96**: 16429 ~ 16454
- [11] Vinnik L P, Makeyeva L I, Milev A, et al. Global patterns of azimuthal and deformations in the continental mantle. *Geophys. J. Int.*, 1992, **111**: 433 ~ 447
- [12] Friederich W, Huang Z X. Evidence for upper mantle anisotropy beneath southern Germany from Love and Rayleigh wave dispersion. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**(10): 1135 ~ 1138
- [13] Leveque J J, Debayle E, Maupin V. Anisotropy in the Indian Ocean upper mantle from Rayleigh and Love-waveform inversion. *Geophys. J. Int.*, 1998, **133**: 529 ~ 540
- [14] 宋仲和, 安昌强, 陈国英等. 中国西部三维速度结构及其各向异性. *地球物理学报*, 1991, **34**(6): 694 ~ 707
Song Z H, An C Q, Chen G Y, et al. Study on 3D velocity structure and anisotropy beneath the west China from the Love wave dispersion. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1991, **34**(6): 694 ~ 707
- [15] 陈立华, 宋仲和, 安昌强等. 中国南北带地壳上地幔三维面波速度结构和各向异性. *地球物理学报*, 1992, **35**(5): 574 ~ 583
Chen L H, Song Z H, An C Q, et al. Three dimensional shear wave velocity and anisotropy of crust and upper mantle in the China North-South earthquake belt. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1992, **35**(5): 574 ~ 583
- [16] 李白基. 昆明地区上地幔地震方位各向异性. 见: 中国固体地球物理学进展. 北京: 海洋出版社, 1994. 330 ~ 338
Li B J. Azimuthal anisotropy in upper mantle in Kunming area, China. In: Development of Solid Geophysics in China (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 1994. 330 ~ 338
- [17] 郑斯华, 高原. 中国大陆岩石层的方位各向异性. *地震学报*, 1994, **16**(1): 131 ~ 140
Zheng S H, Gao Y. Azimuthal anisotropy in lithosphere beneath Chinese land. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1994, **16**(1): 131 ~ 140
- [18] 姚陈, 王培德, 陈运泰. 卢龙地区 S 波偏振与上地壳裂隙各向异性. *地球物理学报*, 1992, **35**(2): 305 ~ 315
Yao C, Wang P D, Chen Y T. Shear-wave polarization and crack induced anisotropy of upper crust in Lulong, North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1992, **35**(2): 305 ~ 315
- [19] 丁志峰, 曾融生. 青藏高原 SKS 波各向异性的研究. 见: 中国固体地球物理学进展. 北京: 海洋出版社, 1994. 162 ~ 168
Ding Z F, Zeng R S. Anisotropy of SKS wave in Tibetan Plateau. In: Development of Solid Geophysics in China (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 1994. 162 ~ 168
- [20] McNamara D E, Thomas J O, Silver P G, et al. Shear wave anisotropy beneath the Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(B7): 13655 ~ 13665
- [21] 丁志峰, 曾融生. 青藏高原横波分裂的观测研究. *地球物理学报*, 1996, **39**(2): 211 ~ 220
Ding Z F, Zeng R S. Observation and study of shear wave anisotropy in Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, **39**(2): 211 ~ 220
- [22] 常利军, 王椿镛, 丁志峰. 云南地区 SKS 波分裂研究. *地球物理学报*, 2006, **49**(1): 197 ~ 204
Chang L J, Wang C Y, Ding Z F. A study on SKS splitting beneath the Yunnan region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(1): 197 ~ 204
- [23] 吕庆田, 马开义, 姜枚. 青藏高原南部下的横波各向异性. *地震学报*, 1996, **18**(2): 215 ~ 223
Lü Q T, Ma K Y, Jiang M. Shear wave anisotropy in south Tibetan

- Plateau. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1996, **18** (2): 215 ~ 223
- [24] 刘希强, 周蕙兰, 李 红等. 中国大陆及邻区上地幔各向异性研究. *地震学报*, 2001, **23** (4): 337 ~ 348
Liu X Q, Zhou H L, Li H, et al. Anisotropy of the upper mantle in Chinese mainland and its vicinity. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2001, **23** (4): 337 ~ 348
- [25] 姜 枚, 许志琴, A. Hirn 等. 青藏高原及其部分邻区地震各向异性和上地幔特征. *地球学报*, 2001, **22** (2): 111 ~ 116
Jiang M, Xu Z Q, Hirn A, et al. Teleseismic anisotropy and corresponding features of the upper mantle in Tibet Plateau and its neighbouring areas. *Acta Geoscientia Sinica* (in Chinese), 2001, **22** (2): 111 ~ 116
- [26] 阮爱国, 王椿镛. 上地幔各向异性研究综述及在川滇地区的研究思路. *国际地震动态*, 2001, **10**: 1 ~ 7
Ruan A G, Wang C Y. Overview of research on anisotropy in the upper mantle and the train of thoughts of researchers in the Sichuan and Yunnan regions. *Recent Developments in World Seismology* (in Chinese), 2001, **10**: 1 ~ 7
- [27] 阮爱国, 王椿镛. 云南地区上地幔各向异性研究. *地震学报*, 2002, **21** (3): 260 ~ 267
Ruan A G, Wang C Y. The upper mantle anisotropy in Yunnan area, China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2002, **21** (3): 260 ~ 267
- [28] 罗 艳, 黄忠贤, 彭艳菊等. 中国大陆及邻区 SKS 波分裂研究. *地球物理学报*, 2004, **47** (5): 812 ~ 821
Luo Y, Huang Z H, Peng Y J, et al. A study on SKS wave splitting beneath the China mainland and adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47** (5): 812 ~ 821
- [29] 刘 , 张中杰, 胡家富等. 中国陆区 S 波分裂的频带相关性及其意义. *中国科学(D 辑)*, 2001, **31** (2): 155 ~ 161
Liu K, Zhang Z J, Hu J F, et al. Frequency band-dependence of S-wave splitting in China mainland and its implication. *Science in China (Series D)*, 2001, **44** (7): 659 ~ 665
- [30] 刘 , 张中杰, 胡家富等. 中国陆区 S 波分裂与上地幔地震各向异性. *地球物理学进展*, 2001, **16** (2): 81 ~ 87
Liu K, Zhang Z J, Hu J F, et al. S-wave splitting and seismic anisotropy of upper-mantle in China mainland. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2001, **16** (2): 81 ~ 87
- [31] 高 原, 郑斯华, 周蕙兰. 唐山地区快剪切波偏振图像及其变化. *地球物理学报*, 1999, **42** (2): 228 ~ 232
Gao Y, Zheng S H, Zhou H L. Polarization patterns of fast shear wave in Tangshan region and their variations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, **42** (2): 228 ~ 232
- [32] Huang Z X, Peng Y J, Luo Y, Zheng Y J, et al. Azimuthal anisotropy of Rayleigh waves in East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**, L15617, doi: 10.1029/2004GL020399
- [33] Huang Z X, Su W, Peng Y J, et al. Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (B2), 2073, doi: 10.1029/2001JB001696
- [34] 彭艳菊, 苏 伟, 黄忠贤等. 中国大陆及海域 Love 波层析成像. *地球物理学报*, 2002, **45** (6): 792 ~ 801
Peng Y J, Su W, Huang Z X, et al. Love wave seismic tomography of China and vicinal sea areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45** (6): 792 ~ 801
- [35] 任纪舜, 姜春发, 张正坤等. 中国大地构造及其演化. 见: 中国及邻区大地构造论文集. 北京: 地质出版社, 1981. 138 ~ 147
Ren J S, Jiang C F, Zhang Z K, et al. The tectonic evolution of China. In: *Collected Papers on Tectonics of China and Adjacent Regions* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1981. 138 ~ 147
- [36] 李红谊, 刘福田, 黄忠贤等. 中国大陆东部及海域地壳 - 上地幔结构研究. *地震学报*, 2001, **23** (5): 471 ~ 479
Li H Y, Liu F T, Huang Z X, et al. A study on the crustal and upper mantle structure in east China and sea areas. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2001, **23** (5): 471 ~ 479
- [37] 黄忠贤, 郑月军. 面波速度的 Occam 反演. 见: 刘光鼎院士工作 50 周年学术论文集. 北京: 科学出版社, 1998. 692 ~ 702
Huang Z X, Zheng Y J. Occam's inversion for surface wave velocities. In: *Collected Papers for Celebrating 50 Years' Work of Academician Liu Guang-ding* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1998. 692 ~ 702
- [38] 苏 伟, 彭艳菊, 黄忠贤等. 青藏高原及其邻区地壳上地幔 S 波速度结构. *地球学报*, 2002, **23** (3): 193 ~ 200
Su W, Peng Y J, Huang Z X, et al. Crust and upper mantle shear velocity structure beneath the Tibetan Plateau and adjacent areas. *Acta Geoscientia Sinica* (in Chinese), 2002, **23** (3): 193 ~ 200
- [39] 郑月军, 黄忠贤, 刘建华等. 青藏高原东部 Love 波偏振研究. *地球物理学报*, 2006, **49** (4): 1068 ~ 1073
Zheng Y J, Huang Z X, Liu J H, et al. Off-great circle propagation of Love waves in eastern Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49** (4): 1068 ~ 1073
- [40] Zorin Y A, Kozhevnikov V M, Novoselova M R, et al. Thickness of the lithosphere beneath the Baikal rift zone and adjacent regions. *Tectonophysics*, 1989, **168**: 327 ~ 337
- [41] Sandvol E, Ni J, Kind R, et al. Seismic anisotropy beneath the southern Himalayas-Tibet collision zone. *J. Geophys Res.*, 1997, **102** (B8): 17813 ~ 17823

(本文编辑 胡素芳)