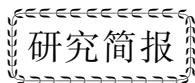


杨凤琴, 刘斌, 倪四道, 曾祥方, 戴志阳, 吕彦. 2008. 西伯利亚下地幔底部的剪切波各向异性. 地震学报, 30(2): 209-213.

Yang Fengqin, Liu Bin, Ni Sida, Zeng Xiangfang, Dai Zhiyang, Lü Yan. 2008. Shear velocity anisotropy of the lowermost mantle beneath the Siberia. *Acta Seismologica Sinica*, 30(2): 209-213.



西伯利亚下地幔底部的剪切波各向异性^{*}

杨凤琴^{*} 刘斌 倪四道 曾祥方 戴志阳 吕彦

(中国合肥 230026 中国科学技术大学地球与空间科学学院)

关键词 各向异性 剪切波分裂 D''区 地幔底部 西伯利亚

文章编号: 0253-3782(2008)02-0209-05 中图分类号: P315.3⁺¹ 文献标识码: A

Shear velocity anisotropy of the lowermost mantle beneath the Siberia

Yang Fengqin^{*} Liu Bin Ni Sida Zeng Xiangfang Dai Zhiyang Lü Yan

(Department of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Key words: anisotropy; shear wave splitting; D'' region; lowermost mantle; Siberia

D''层在地球动力学演化过程中起着重要的作用. 地震学研究已表明, D''区存在着显著的大尺度区域的地震波各向异性, 但由于地震震源与接收台站分布的地理局限性, D''区各向异性的研究主要局限于北太平洋、加勒比海、阿拉斯加、中太平洋等地区(Wookey *et al*, 2005; Garnero, Lay, 2003; Matzel, 1996; Pulliam, Sen, 1998), 对西伯利亚下地幔底部的各向异性研究目前尚未见到. 探测D''层地震波速度各向异性的方法, 一般是利用体波震相(如 S, ScS, Sdiff 等)中的剪切波分裂(Fouch *et al*, 2001; Garnero, Lay, 1997; Karato, 1998), 而剪切波分裂的分析过程中最大困难在于震源和台站附近各向异性对分裂的影响. 对于震源一侧一般不考虑选取深震(Thomas *et al*, 2002), 而对于台站一侧则通常利用 SKS 震相剪切波分裂方法得到的台站下方的上地幔各向异性参数对 ScS 波进行校正. 基于此, 本文选取两个射线路径相近的震相 ScS-S, 利用其相对走时消除震源及台站处的各向异性. 日本地区地震丰富, 德国台站所记录到的数据质量较高, 因此本研究基于 GRSN(Germany Regional Seismological Network)台站记录到的日本地区的地震数据, 利用 ScS-S 相对走时分析方法研究西伯利亚下地幔底部的剪切波各向异性.

1 数据

本研究数据取自于由 GRSN 的 16 个台站记录到的日本地区的 5 次地震(地震参数见表 1), 其射线路径、震源及台站分布如图 1a 所示. 所有 ScS 波射线在 CMB(core-mantle boundary)的反射点纬度范围为 60°N—71°N, 经度范围为 75°E—86°E.

* 基金项目 国家自然科学基金(40537033, 40425005)资助.

收稿日期 2007-11-12 收到初稿, 2008-01-21 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: yfq@mail.ustc.edu.cn

为避免一些复杂波形的引入误差,本文选用波形主要依据以下几个原则:① 波形相对比较简单;② SH 辐射样式比较稳定;③ 信噪比高;④ SH 和 SV 波峰明显。同时为避免 D'' 区以外结构各向异性的影响及 SKS 波的干扰,所选地震记录的震中距范围限定在 70° — 83° 。当震中距小于 70° 时, S 波的射线最低点远在 CMB 之上, S 和 ScS 的路径显著不同;而震中距大于 83° 时, ScS-S 震相极有可能受到 SKS 震相的干扰(图 1b)。因为 ScS 和 S 震相在地幔中绝大部分区域的传播路径相似,只是在 D'' 层附近路径不同,所以 ScS-S 对 D'' 层横波速度变化非常敏感。基于此,对原始数据进行了如下处理:① 去除仪器响应;② 应用地震处理软件 SAC(seismic analysis code)对水平分量进行旋转,分离径向(SV)和横向(SH)波形分量;③ 将波形积分到位移分量;④ 对波形进行周期为 5—100 s 的带通滤波以提高数据的信噪比(图 2)。

表 1 本文所使用的日本地区地震的震源参数

Table 1 Source parameters of the earthquakes of Japan used in this study

日期	发震时刻(UTC)	震中位置		震源深度	震级
年-月-日	时:分:秒	$\varphi_N/^\circ$	$\lambda_E/^\circ$	/km	
2000-08-19	17:26:27.94	43.82	147.17	62	6.0(m_b)
2002-06-28	17:19:30.27	43.75	130.67	566	7.3(M_w)
2003-08-31	23:08:00.26	43.39	132.27	481	6.2(M_w)
2006-06-11	20:01:26.31	33.13	131.14	139	6.3(M_w)
2007-03-09	03:22:42.76	43.22	133.53	441	6.1(m_b)

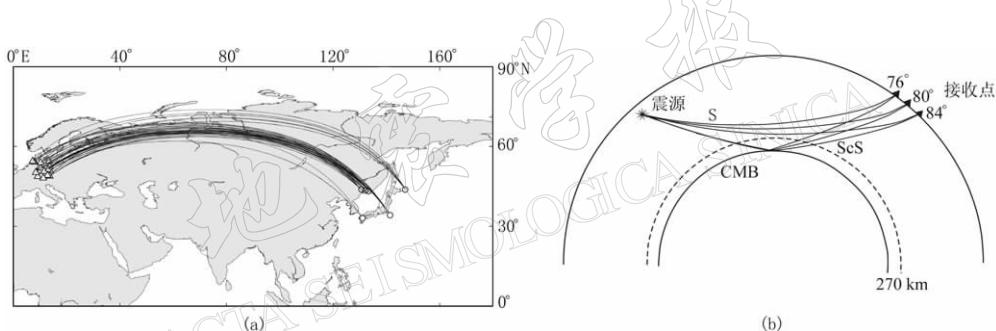


图 1 震源、台站和射线路径的分布(a)以及 S 和 ScS 射线路径(b)

圆圈表示日本地区发生的地震,三角形表示德国的地震台站

Fig. 1 Distribution of the earthquakes, seismic stations, and the great circle paths geometry (a) and ray paths geometry of S and ScS (b)

Open circles denote the earthquakes occurred in Japan, triangles denote the seismic stations of Germany

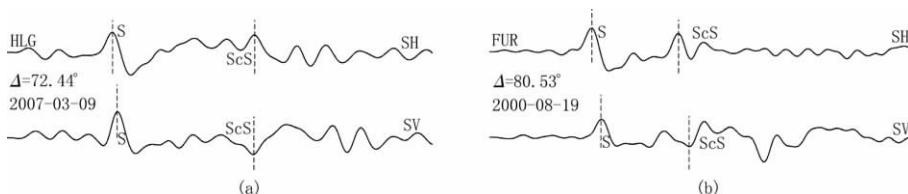


图 2 处理后的波形图

图中 Δ 为震中距;上方波形为横向分量,下方波形为径向分量;(a) HLG 台站记录到的

2007 年 3 月 9 日地震波形;(b) FUR 台站记录到的 2000 年 8 月 19 日地震波形

Fig. 2 Two waveforms after being processed

Δ stands for epicentral distance; the upper waveforms are tangential components, and the lowers are radial ones; (a) The seismic waveform on March 9, 2007 recorded by the station HLG;

(b) The seismic waveform on August 19, 2000 recorded by the station FUR

2 剪切波分裂的计算方法及结果

相对走时分析法和互相关分析法是剪切波分裂研究的两种主要方法。当某地震发生后, 所记录到的 ScS 波一般会受到震源一侧、D'' 区以及台站一侧的各向异性的影响。戴志阳等(2007)具体分析了两种方法的优缺点及相对走时方法的计算过程, 提出了 ScS 波在 D'' 区内的分裂时间计算公式

$$\delta t = \Delta t_{ScSV-SV} - \Delta t_{ScSH-SH} - 0.2 \quad (1)$$

2.1 分裂时间

利用上述相对走时分析法, 本文共获取了 31 个剪切波分裂结果, 分裂值从 -1.67 s 到 0.35 s, 平均值为 -0.62 s, 部分分裂时间集中在 0 到 -1 s, 其中正值的分裂结果有 2 个(图 3)。这说明 ScS 波的横向分量落后于径向分量, 即 $V_{SV} > V_{SH}$ 。

2.2 各向异性强度

对各向异性强度的分析同样可以为地幔底部各向异性的研究提供重要的观测约束。因为 ScS 波的分裂效应是在 D'' 区内整个射线路径上的综合, 我们利用公式 $\alpha = \delta t / t$ 计算其各向异性强度。其中, δt 为观测得到的分裂时间值, t 为理论计算得到的 ScS 波通过 D'' 区所用时间值。假设 D'' 区深度范围在地表以下 $2\,641$ — $2\,891$ km, 在每条射线的 D'' 区内, 地震波各向异性均匀分布, 据 PREM (preliminary reference earth model) 模型(Dziewonski, Anderson, 1981)计算 D'' 区范围内 ScS 波的理论走时 t 。这样得到的各向异性强度 α 是一个无量纲的值, 用百分数表示。

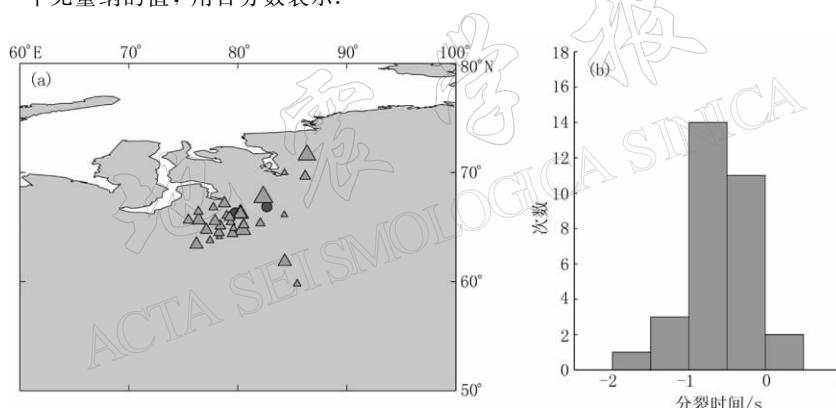


图 3 日本地区地震的 ScS 波分裂时间观测(a)和统计图(b)

三角形表示分裂时间为负值, 圆形表示分裂时间为正值, 每个图形中心为 ScS 波在 CMB 的反射点

Fig. 3 Observations (a) and histogram (b) of ScS wave splitting time in D'' from the earthquakes of Japan

Triangles indicate the negative values of splitting time while the circles indicate the positive ones; the center of mark is the bounce point at CMB

对于日本地区地震的 31 个观测结果, 各向异性强度从 -0.92% 到 0.20% , 大部分值集中在 -0.6 至 0 , 平均值为 0.33% (图 4)。

将地震的分裂时间图与各向异性强度图进行对比后发现, 地震分裂时间和各向异性强度的分布总体趋势一致。因为本研究采用的震中距范围较小(70° — 83°), 各条射线的 t 值相差不大, 加上 $\alpha = \delta t / t$, 所以各向异性强度 α 分布与分裂时间 δt 分布基本一致。

3 西伯利亚下地幔的各向异性机制

前人关于剪切波分裂的研究表明, 地震波的 SH 分量较 SV 分量速度快(Fouch *et al.*, 2001; Wookey *et al.*, 2005; Thomas *et al.*, 2002; 戴志阳等, 2007), 这与垂直横向各向同性(VTI)几何结构的性质相符。

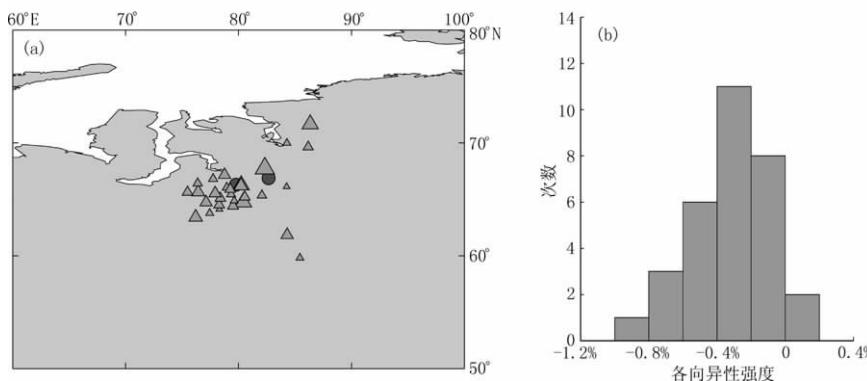


图 4 日本地区地震的 ScS 波 D'' 区各向异性强度观测 (a) 和统计图 (b)
 三角形表示负的分裂时间对应的各向异性强度, 圆形表示正的分裂时间对应的各向异性强度, 每个图形中心为 ScS 波在 CMB 的反射点

Fig. 4 Observations (a) and histogram (b) of anisotropy strength of ScS in D'' from the earthquakes of Japan

Triangles indicate the anisotropy strength corresponding to negative splitting time while the circles indicate that to positive one; the center of the mark is the bounce point at CMB

而在本研究中, SV 分量速度快于 SH 分量, 与水平横向同性 (HTI) 结构性质吻合 (Pulliam, Sen, 1998)。在我们的观测中地震波沿近东西向传播, 结合 HTI 的结构特性可知西伯利亚下方的 HTI 对称轴沿南北向分布。

形成以上几何结构的机制有两种可能: 一是各向异性晶体的晶格优选方向 (LPO); 二是具有较大波速异常的物质的形状优选方向 (SPO) (Pulliam, Sen, 1998)。由形状优选方向造成的水平横向同性结构能够很好地解释西伯利亚下地幔底部的观测结果。边界层中强大的垂直剪切流可以将化学的或部分熔融不均匀物质定向排列成垂直组织, 从而形成形状优选方向, 其结果则表现为水平横向同性结构 (HTI)。这些不均匀物质可能是核幔边界反应产物或者是核幔边界附近产生的部分熔融漂浮物质 (Pulliam, Sen, 1998)。全球的层析成像研究表明, 中国及其北部邻区的 D'' 层中地震波速度较全球平均值偏高 (Ritsema *et al*, 1999), 其地球动力学成因有可能是古老板块俯冲到核幔边界产生的异常, 这些较冷的物质还处于流动的状态, 因此产生了相应的各向异性。

下地幔物质的晶格优选方向所造成的水平横向同性结构也是一种可能的解释。形成这一机制的物质可能是 $[Mg, Fe]O$, 它是下地幔的主要矿物之一。由于该矿物是立方晶体, 其各向异性随方位角变化较明显, 并且在下地幔可以产生 $V_{SV} > V_{SH}$ 的效果 (Maupin *et al*, 2005)。此外, 形成这一机制的物质还可能是 $MgSiO_3$ 后钙钛矿 (张虎等, 2007)。在三轴应力场中, $MgSiO_3$ 后钙钛矿具有很强的横波各向异性, 在 D'' 层垂直上升区, 当 $[010]$ 成水平取向时 $V_{SV} > V_{SH}$ (Karato, 1998)。我们的观测数据与上述作者的结果一致。

4 结论

利用相对走时分析方法研究了西伯利亚下地幔底部的剪切波各向异性。ScS 波通过研究区 D'' 时, 普遍呈现出横向分量走时大于径向分量走时的模式。对于日本地区的地震波, ScS 波分裂时间从 -1.67 s 到 0.35 s, 平均值为 -0.62 s, 各向异性强度最大值为 -0.92% , 平均值为 -0.33% , 并且分裂时间与各向异性强度的分布总体趋势一致。

观测结果和分析表明, 西伯利亚下 D'' 区的各向异性结构主要是水平横向同性结构 (HTI)。形成这种

结构有两种可能性: 其一是下地幔物质的晶格优选方向; 其二可能是西伯利亚下D''区内的物质流动以竖直向为主, 形成了其内部物质的形状优选方向。

参 考 文 献

- 戴志阳, 刘斌, 王宵翔, 查显杰, 张虎, 杨凤琴. 2007. 西太平洋下D''区的剪切波各向异性[J]. 地震学报, **29**(5): 459-466.
- 张虎, 刘斌, 杨莉, 祖小涛, 戴志阳, 杨凤琴, 吕彦. 2007. $MgSiO_3$ 后钙钛矿在三轴应力场中的第一原理模拟及地球物理应用[J]. 中国科学技术大学学报, **37**(8): 922-926.
- Dziewonski A M, Anderson D L. 1981. Preliminary reference Earth model[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **101**: 297-356.
- Fouch M J, Fischer K M, Wysession M E. 2001. Lowermost mantle anisotropy beneath the Pacific: Imaging the source of the Hawaiian plume[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **190**: 167-180.
- Garnero E J, Lay T. 1997. Lateral variations in lowermost mantle shear wave anisotropy beneath the north Pacific and Alaska[J]. *J Geophys Res*, **102**: 8 121-8 135.
- Garnero E J, Lay T. 2003. D'' shear velocity heterogeneity, anisotropy and discontinuity structure beneath the Caribbean and Central America[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **140**: 219-242.
- Karato S. 1998. Some remarks on the origin of seismic anisotropy in the D'' layer[J]. *Earth Planets Space*, **50**: 1 019-1 028.
- Matzel E. 1996. Evidence for anisotropy in the deep mantle beneath Alaska[J]. *Geophys Res Lett*, **23**(18): 2 417-2 420.
- Maupin V, Garnero E J, Lay T, Fouch M J. 2005. Azimuthal anisotropy in the D'' layer beneath the Caribbean[J]. *J Geophys Res*, **110**: B08301, doi:10.1029/2004JB003506.
- Pulliam J, Sen M K. 1998. Seismic anisotropy in the core-mantle transition zone[J]. *Geophys J Int*, **135**: 113-128.
- Ritsema J, van Heijst H J, Woodhouse J H. 1999. Complex shear wave velocity structure imaged beneath Africa and Iceland[J]. *Science*, **286**: 1 925-1 928.
- Thomas C, Heesom T, Kendall J M. 2002. Investigating the heterogeneity of the D'' region beneath the northern Pacific using a seismic array[J]. *J Geophys Res*, **107**(B1): 2274, doi: 10.1029/2000JB000021.
- Wookey J, Kendall J M, Rümpker G. 2005. Lowermost mantle anisotropy beneath the north Pacific from differential S-ScS splitting[J]. *Geophys J Int*, **161**: 829-838.