

余大新, 吴庆举, 王鹏, 叶庆东, 潘佳铁, 高孟潭. 2016. 蒙古中南部地区基于天然地震的勒夫波相速度层析成像. 地震学报, 38(1): 41–52. doi:10.11939/jass.2016.01.004.

Yu D X, Wu Q J, Wang P, Ye Q D, Pan J T, Gao M T. 2016. Love wave phase velocity tomography in the south-central Mongolia from earthquakes. *Acta Seismologica Sinica*, 38(1): 41–52. doi:10.11939/jass.2016.01.004.

蒙古中南部地区基于天然地震的 勒夫波相速度层析成像^{*}

余大新¹⁾ 吴庆举^{2),†} 王 鹏³⁾ 叶庆东¹⁾
潘佳铁²⁾ 高孟潭²⁾

1) 中国天津 300180 中国地震局第一监测中心

2) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

3) 中国武汉 430011 水利部长江勘测技术研究所

摘要 借助中蒙国际科技合作项目获取的宽频带地震台阵观测数据, 采用小波变换频时分析技术提取了蒙古中南部地区 901 条双台间基阶勒夫波相速度频散曲线. 通过对该曲线进行二维反演, 重构了蒙古中南部地区 12—80 s 周期内横向分辨率约为 50 km 的勒夫波相速度分布图. 结果显示, 蒙古中南部地区相速度分布存在一定的横向不均匀性. 短周期内(12—20 s), 相速度分布受地表地形的控制, 杭爱—肯特山盆表现为高速异常, 乌兰巴托盆地、中戈壁带及南戈壁带均表现为低速异常; 中等周期内(20—40 s), 研究区相速度分布形态与短周期类似, 但横向不均匀性强度减弱; 中长周期内(40—70 s), 南戈壁带和杭爱—肯特山盆为低速异常, 中戈壁带为高速异常, 整个区域表现出南北低速异常夹中部高速异常的形态, 与瑞雷波中长周期速度分布形态显著不同. 结合中戈壁带分布大量新生代火山岩, 推测研究区域内存在较强的径向各向异性.

关键词 蒙古中南部 相速度 面波层析成像 勒夫波

doi:10.11939/jass.2016.01.004 中图分类号: P315.3⁺1 文献标志码: A

Love wave phase velocity tomography in the south-central Mongolia from earthquakes

Yu Daxin¹⁾ Wu Qingju^{2),†} Wang Peng³⁾ Ye Qingdong¹⁾
Pan Jiatie²⁾ Gao Mengtan²⁾

1) First Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration,
Tianjin 300180, China

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

3) The Yangtze Research Institute of Geotechnique and Survey, Ministry of Water Resources,
Wuhan 430011, China

Abstract: This paper utilized the data from broadband seismic arrays of the

^{*} 基金项目 中蒙国际科技合作专项(2011DFB20210), 国家自然科学基金(41274088, 41504073)和中国地震局第一监测中心主任基金(2015014)联合资助.

收稿日期 2015-06-02 收到初稿, 2015-07-14 决定采用修改稿.

[†] 通讯作者 e-mail: wuqj@cea-igp.ac.cn

China-Mongolia cooperative project, and extracted the fundamental mode Love wave phase velocity dispersion curves along the 901 two-station paths in the south-central Mongolia by the wavelet transformation method. These phase velocity dispersion curves were applied to construct the 2-D Love wave phase velocity maps for the period range of 12–80 s with horizontal resolution about 50 km in the area. The distribution of phase velocity show that horizontal heterogeneity exists in the studied area. The phase velocity distributions at shorter periods (12–20 s) are obviously controlled by geologic units, for example, Hangay-Hentiy mountain basin exhibits high velocity anomaly while Ulaanbaatar basin, middle Gobi and southern Gobi desert exhibit low velocity anomaly. In the period range of 20–40 s, the features of phase velocity distribution are similar to those for shorter periods, but the amplitude of horizontal heterogeneity becomes weaker. At longer periods (40–70 s), the southern Gobi and Hangay-Hentiy mountain basin show low velocity anomaly while the middle Gobi shows high velocity anomaly, which is distinctly different from that by Rayleigh wave phase tomography. The whole areas present the shape of low velocity anomaly in north and south and high velocity anomaly in middle. Therefore, combined with broad distribution of Cenozoic volcanic rocks in the middle Gobi, it is deduced that the stronger radial anisotropy exists in the studied area.

Key words: south-central Mongolia; phase velocity; surface wave tomography; Love wave

引言

蒙古地区作为理解内陆增生动力学机制的核心研究区域(Badarch *et al*, 2002; Petit *et al*, 2002; Calais *et al*, 2003; Xiao *et al*, 2003; Petit, Fournier, 2005; Zorin *et al*, 2006; Tiberi *et al*, 2008; 张建利等, 2012), 其位于广阔而复杂的中亚造山带中心部位, 主要由一系列古生代向南凸出的弧形地块拼接而成, 其间被几条近 EW 向的弧形大断裂以及一些近 NW 或 NE 向的小型断裂切割(Kozakov *et al*, 2001; Badarch *et al*, 2002). 该地区地形高, 地质年龄相对年轻(Cunningham, 2001), 目前处于中等变形阶段, 该变形很可能与印度—欧亚板块的碰撞有关(Tapponnier, Molnar, 1979; Cunningham *et al*, 1996; Calais *et al*, 2003). 蒙古西部以高原山脉地形(阿尔泰山脉、杭爱高原)为主, 东部主要为戈壁带. 该地区地震发生频繁, 构造活动强烈, 从晚远古代到新生代各种喷出岩和侵入岩均广泛发育(Zonenshain, Savostin, 1981; Kulakov, 2008). 已有的地质资料(IAVCEI, 1973; Whitford-Stark, 1987; Crosweller *et al*, 2012)表明, 研究区内有多处新生代玄武岩零星出露, 且主要集中在中戈壁带. 由于缺乏大规模的地震观测, 我们对蒙古地区的深入认识一直较为匮乏(Calais *et al*, 2003; 熊熊等, 2010).

利用面波频散特性反演地球内部结构, 是目前探测地球深部结构的有效手段之一. 面波主要分为勒夫波和瑞雷波, 与瑞雷波相比, 勒夫波能量集中在较浅的部位, 有利于改善浅部的分辨率(彭艳菊等, 2002). 此外, 由于目前尚缺乏基于各向异性理论进行反演的有效方法, 我们仍需利用提取到的瑞雷波和勒夫波频散曲线, 分别进行各向同性反演以获取

地下介质 SV 波和 SH 波的速度结构. 通过比较两种剪切波的速度差异, 从而以定性的方式来研究壳幔介质中可能存在的径向各向异性, 这对于研究壳幔变形及其耦合机制是非常重要的(庄真, 邓大量, 1988; Gaherty, 2004; 彭艳菊等, 2007; 房立华等, 2013).

随着全球范围内数字地震观测技术的发展, 借助国际合作而开展的大规模数字地震台阵观测计划, 我们获得了宝贵的地震观测资料, 为揭示蒙古乃至中亚造山带的增生和变形机制打开了通道. 在前期已经完成的瑞雷波相速度层析成像(余大新等, 2015)的基础上, 本文利用中蒙国际合作得到的地震台阵观测数据, 使用基于小波变换的频时分析技术(Wu *et al*, 2009), 提取了勒夫波相速度频散曲线. 将研究区域划分为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的网格, 利用面波层析成像法得到了 12—80 s 周期的勒夫波相速度分布图像, 并对该结果进行了探讨, 以为蒙古地区深部结构的分布特征和内陆增生机制的研究提供更全面的约束和参考.

1 数据与频散测定

1.1 数据

在中国地震局地球物理研究所与蒙古科学院的项目合作中, 我们在蒙古中南部地区开展了宽频带地震观测实验. 2011 年 8 月架设了 60 套宽频带地震仪, 2012 年 8 月调整了其中 9 个台站的位置, 进行了两年左右的观测后于 2013 年 7 月撤回. 相邻台站间平均距离约为 40 km. 所有地震台站统一采用 CMG-3ESPC 地震计和 REFTEK-130 数据采集器, 且数据采集器统一由配备的 GPS 自动授时, 保证了波形记录时间参数的准确性. 采集器波形记录频率为 50 Hz. 由于蒙古地区人口稀少, 人类活动干扰相对较弱, 且台站架设过程中地震计埋设较深, 故获取了 69 个台站的良好地震记录. 台站位置分布及研究区构造背景如图 1 所示. 图中火山岩出露位置参考了 IAVCEI(1973)和 Whitford-Stark(1987)文章,

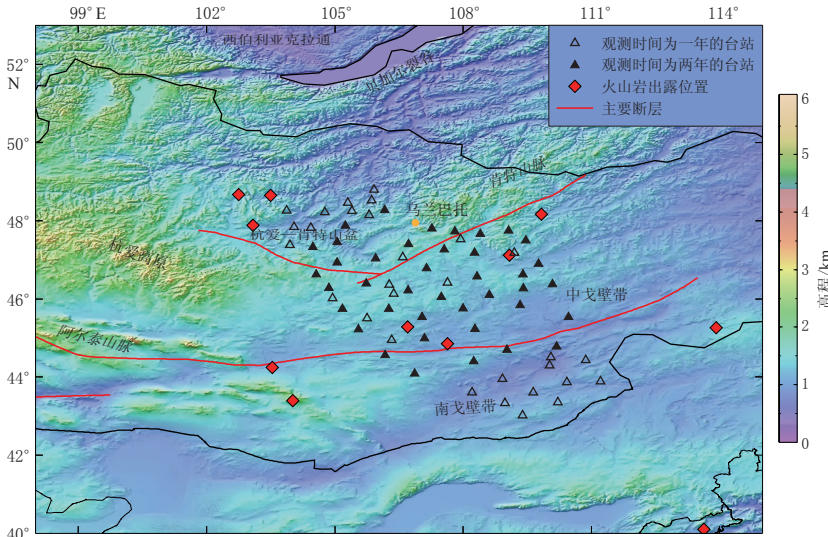


图 1 蒙古及周边地区的构造背景(修改自 Badarch *et al*, 2002)及台站分布

Fig.1 Tectonic settings (revised from Badarch *et al*, 2002) and stations distribution in Mongolia and its surrounding areas

Open and solid triangles represent the stations with one- and two-year observation, respectively.

Red diamonds represent the outcropping volcanos (IAVCEI, 1973; Whitford-Stark, 1987).

Red lines represent the main faults (Badarch *et al*, 2002)

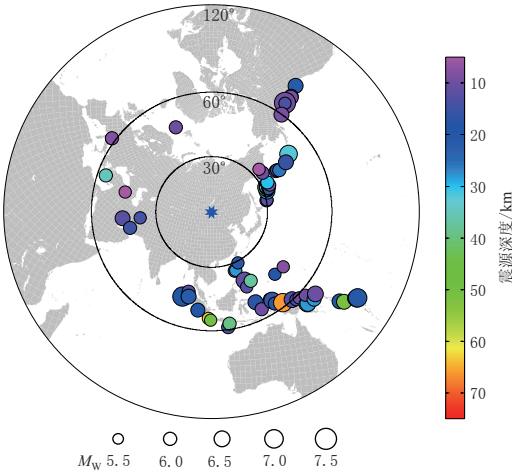


图 2 本文所用的地震事件分布
Fig. 2 Distribution of the earthquake events used in this study

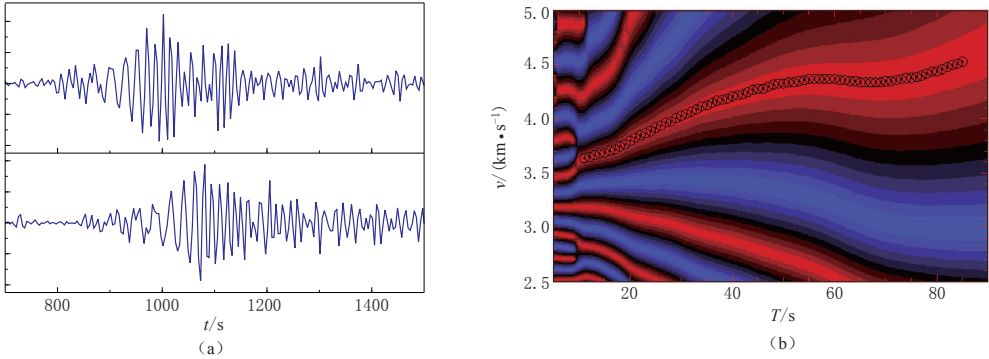


图 3 勒夫波波形(a)和相速度频散曲线提取示意图(b)
Fig. 3 Love wave waveforms (a) and schematic diagram of phase velocity dispersion measurement (b)

在提取勒夫波频散曲线之前，需要对选取的地震记录进行重采样(1 Hz)、去均值、去倾斜和带通滤波等预处理。由于所有台站均采用同一类型的地震计和采集器，所以对于本文采用的双台法可以不用进行去仪器响应的操作。双台法基于大圆弧理论，要求台站对和地震事件尽可能在同一个大圆弧上，而实际满足该要求的台站对甚少，这里我们限定远台站(相对地震事件)到近台站的方位角与远台站到地震事件的方位角之间的偏差小于 5° 。经过上述处理后，采用小波变换频时分析技术(Wu *et al*, 2009)

主要断层参考 Badarch 等(2002)文章。

1.2 频散测定

为保证勒夫波波形记录的质量，本文首先统计出有效测定了瑞雷波相速度频散的垂直分量，然后将该垂直分量对应的两个水平分量旋转至径向和切向分量上，最后提取出包含勒夫波信息的切向分量。由于在进行瑞雷波相速度提取时已经完成了地震事件的选取，所以切向分量地震记录满足：① 震中距为 15° — 100° (避免近场效应和高阶面波干扰)；② 震源深度小于70 km，震级为 $M_w5.5$ — 7.5 (保证面波发育且有较高信噪比)。最终有效的地震事件为208个，其位置分布如图2所示。可以看出，地震事件分布较为均匀。

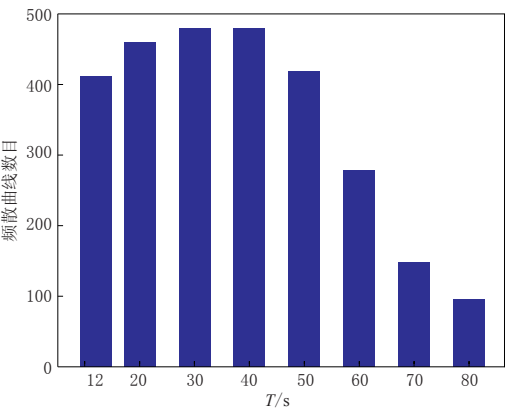


图 4 不同周期 T 下的频散曲线数目
Fig. 4 Numbers of dispersion curves for different periods T

测量了双台间基阶勒夫波 10—80 s 周期内的相速度频散曲线, 如图 3 所示. 对于所获得的相速度频散曲线, 通过手动逐一检查其光滑性和可靠性, 最终筛选出 901 条频散曲线. 对相同台站对的频散曲线进行算术平均, 最终得到的各周期频散曲线数目如图 4 所示. 图 5 给出了周期为 12 s, 30 s, 60 s 和 80 s 时, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格下相速度射线路径的分布. 可以看出, 除了周期为 80 s 时, 研究区绝大部分地区射线路径分布密集, 且具有较好的方位覆盖, 为我们有效地进行相速度二维反演提供了基本保证. 由于勒夫波同时要求地震仪器记录到的两个水平分量均有良好的波形记录, 而一般情况下, 水平分量更容易受到区域性干扰源的影响, 其信噪比较垂直分量要差, 因此勒夫波的频散测量要比瑞雷波困难得多, 其最终频散路径条数比瑞雷波要少一半左右.

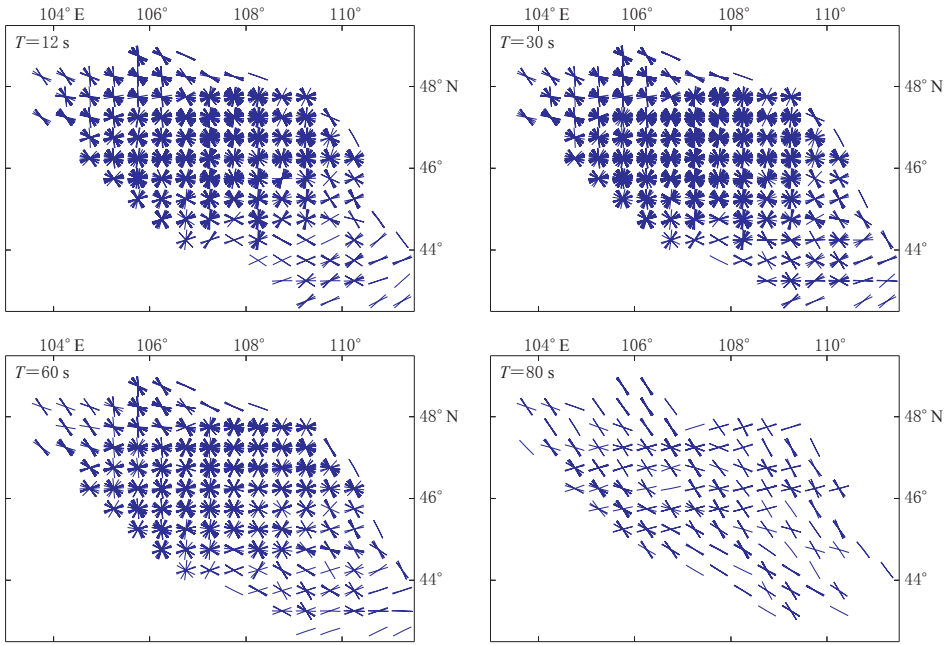


图 5 不同周期 T 时各网格点内的射线路径方位分布

Fig. 5 Azimuth distribution of rays in each grid for different periods T

2 相速度层析成像

2.1 成像方法

经上述处理后, 我们得到勒夫波频散曲线共计 901 条. 基于该频散曲线所对应的射线分布, 将研究区域划分为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格, 采用 Ditmar 和 Yanovskaya (1987) 及 Yanovskaya 和 Ditmar (1990) 提出的面波层析成像法反演相速度分布. 该方法是 Backus-Gilbert (1968) 法在二维情形下的推广, 在面波层析成像中被广泛采用 (房立华等, 2009; 何正勤等, 2009; 潘佳铁等, 2011; Li *et al.*, 2013). 面波层析成像法主要通过最小化罚函数来获得每个周期的相速度分布, 该罚函数为

$$\sum_{i=1}^N [w_i(t_i^{\text{obs}} - t_i^{\text{pre}})]^2 + \lambda \int |\nabla C(\theta, \phi)|^2 d\mathbf{A}, \quad (1)$$

其中,

$$t_i^{\text{pre}} = \int_{P_i} C^{-1}(\theta, \phi) ds,$$

式中: ω_i 为第 i 条路径的权重, 由于本文将同一路径的多条频散曲线进行了算术平均, 故所有路径的权重相同; t_i^{pre} 和 t_i^{obs} 分别为第 i 条路径模型计算得到的走时和观测走时; \mathbf{A} 为位置矢量; s 为参与反演的路径段; P_i 为第 i 条路径; C 为待反演的二维相速度; λ 为正则化参数, 控制着走时残差和反演结果的光滑程度, 本文取 $\lambda=0.2$.

2.2 分辨率分析

在反演相速度分布的同时, 根据射线密度和射线方位分布计算了成像结果的横向分辨率, 周期 12 s 和 60 s 时的分辨率如图 6a 所示. 可以看出, 大部分区域的分辨尺度均为 50 km 左右.

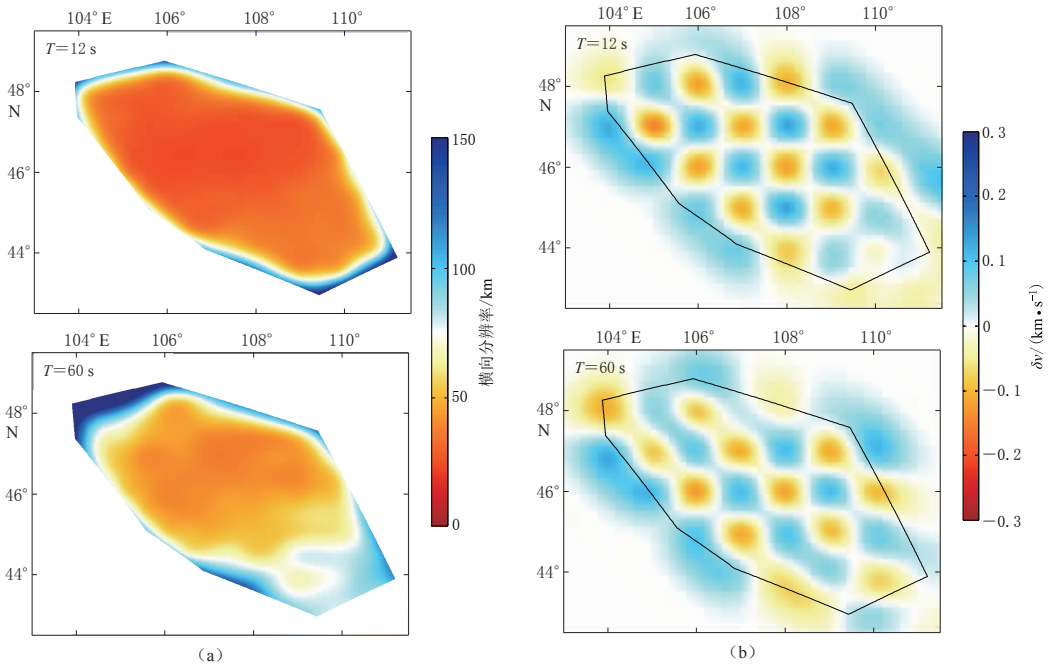


图 6 不同周期 T 的横向分辨率(a)和检测板测试(b)

Fig. 6 Horizontal resolution (a) and checkerboard test (b) for different periods T

2.3 检测板测试

检测板测试是通过预设理论速度模型, 根据实际的射线分布计算其理论走时, 再加上一定的速度扰动量作为观测到时, 然后采用相同的方法和控制参数进行反演, 考查其反演结果能否恢复到预设的理论速度模型. 实验中, 如果划分的网格太大会造成数据的不充分利用, 太小则可能造成反演结果中假异常的引入, 所以检测板测试为设置网格大小提供了重要的参考.

依照检测板测试原理, 将研究区域划分为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格, 初始模型速度值设为 3.3 km/s, 速度扰动量为 ± 0.3 km/s, 同时在理论计算得到的射线旅行时中加入了标准差为 0.15 s 的高斯噪声, 然后采用相同的反演方法和控制参数, 分别对 12 s 和 60 s 两个周期进行了检测板测试, 其结果如图 6b 所示. 可以看出, 在 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格大小下, 除了边缘

地区由于交叉射线少造成模型恢复效果不太理想外, 研究区绝大部分地区均能较好地恢复, 表明射线覆盖对 50 km 左右的异常是可以分辨的。

2.4 结果与分析

为了将不同周期面波与不同深度的地下结构变化联系起来, 本文计算了不同周期勒夫波相速度在深度方向上的敏感核, 如图 7 所示。关于计算敏感核的初始模型, 地壳部分我们采用了 CRUST1.0 (Laske *et al.*, 2013) 在研究区域内的平均模型, 地幔部分采用了 AK135 模型 (Kennett *et al.*, 1995)。通常情况下, 瑞雷波相速度的敏感深度大约为波长的 $1/3-1/2$, 而勒夫波的敏感深度要浅一些, 且随着周期的增大, 纵向分辨率越低 (Bensen *et al.*, 2008)。

图 8 给出了不同周期的勒夫波相速度分布图。可以看出, 12—20 s 周期内的勒夫波相速度分布清晰地显示出研究区中、上地壳的速度结构及其横向变化。北部靠近杭爱山脉地区为高速异常, 乌兰巴托盆地为低速异常, 在瑞雷波 12 s 周期的相速度分布图上, 乌兰巴托盆地的低速异常并没有清晰地显示出来 (余大新等, 2015), 这可能与相同周期下勒夫波敏感核深度要浅于瑞雷波有关。存在火山岩出露的中戈壁带、南戈壁带主要为低速异常, 可能与其沉积层及浅层为砂石、碎岩的结构有关。总体来看, 短周期内的相速度分布在整个研究区内表现出强烈的横向不均匀性, 与地表的构造形态相吻合。

根据已有的接收函数结果 (Gao *et al.*, 2003; 何静等, 2014) 可知, 研究区的地壳厚度为 39—46 km, 所以 20—40 s 中等周期的勒夫波相速度分布主要与中下地壳、上地幔顶部的速度结构和横向变化有关。20—40 s 周期内, 杭爱—肯特山盆依然显示为高速异常, 但与短周期相比, 异常幅度开始减小; 中戈壁带低速异常范围不断缩小, 且低速异常开始变得不明显; 南戈壁带依然表现为低速异常。由于勒夫波敏感核在深度上延伸较宽且不同周期的敏感核相互重叠, 所以中等周期的整体速度分布形态与短周期类似, 即整个研究区表现为北部高速异常、中南部低速异常的特征, 但研究区内的横向不均匀性比短周期有所减弱。

40—80 s 周期的勒夫波相速度分布主要与上地幔的速度结构及其横向变化有关。考虑到 80 s 周期时射线分布较少, 可靠性相对较差, 与其它周期的相速度分布图差异较大, 所以我们主要分析 70 s 周期以内的速度分布图。从 50 s 周期开始, 北部的杭爱—肯特山盆由高速异常变为低速异常; 而在中短周期内主要为低速异常的中戈壁带显现为高速异常, 且高速异常范围不断向北部延伸; 南戈壁带仍然主要表现为低速异常, 其异常范围和强度也随着周期的增加而有增大和增强的趋势。

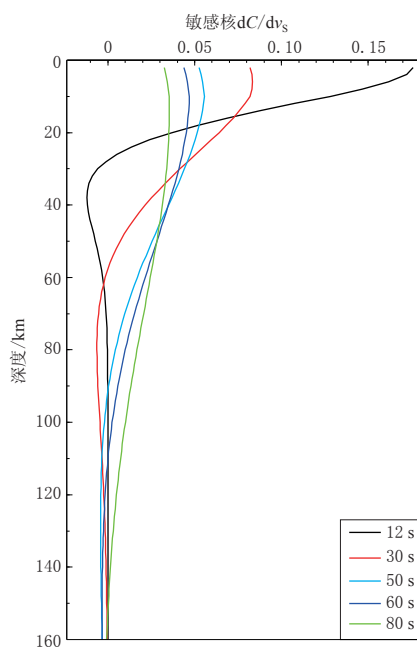


图 7 不同周期下勒夫波相速度对 S 波速度的深度敏感核

Fig. 7 Depth sensitivity kernels of Love wave phase velocity to S-wave velocity for different periods

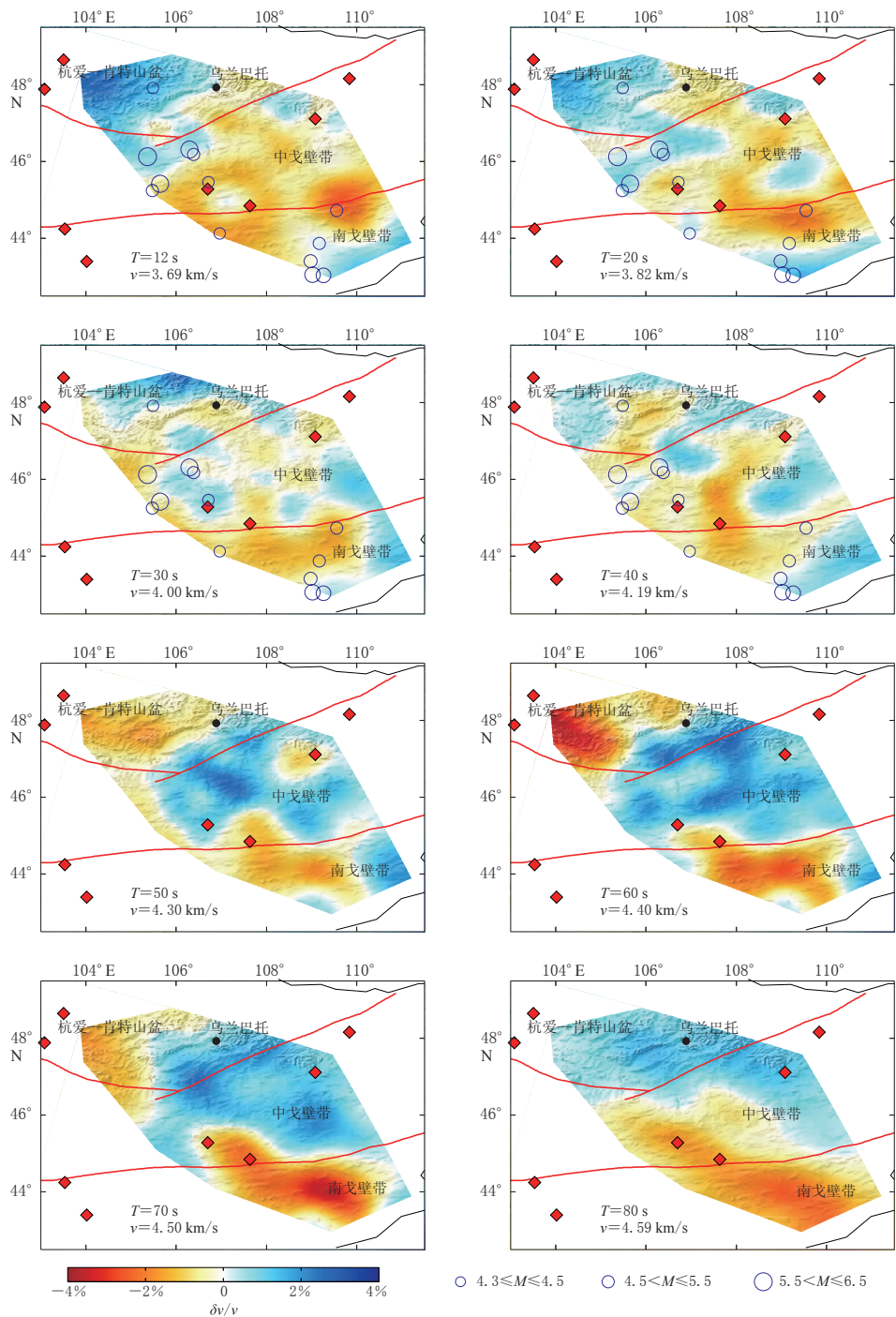


图 8 不同周期 T 的勒夫波相速度分布

蓝色圆圈为近代中强震($M \geq 4.3$)震中位置, 红色菱形为火山岩出露位置, 红色实线为断层位置

Fig. 8 Distribution of Love wave phase velocity for different periods T

Blue circles represent the epicenters of recent moderate-strong earthquakes with $M \geq 4.3$.

Red diamonds and lines represent the volcanoes and the faults, respectively

3 讨论与结论

3.1 径向各向异性存在的可能性

通过本文反演得到的相速度分布图可以看出,在地壳深度内($T \leq 30$ s),北部的杭爱—肯特山盆地区表现为高速异常,中戈壁带和南戈壁带主要表现为低速异常。进入壳幔过渡带和上地幔顶部后,南戈壁带基本上都表现为低速异常,而杭爱—肯特山盆则从高速异常反转为低速异常,同时中戈壁带表现为显著的高速异常,形成南北低速夹中部高速的形态。对比余大新等(2015)在本区域的瑞雷波相速度分布图可以看出:在地壳深度内,瑞雷波与勒夫波相速度分布特征具有很好的一致性;而进入上地幔顶部后,瑞雷波相速度图显示中戈壁带仍为低速异常,整体呈南北高速夹中部低速的形态,与勒夫波相速度分布形态不一致,可能意味着本研究区下方介质具有较强的径向各向异性。图 9 给出了中戈壁带内一点(108.5°E , 45.5°N)基于相同初始模型(地壳部分采用 CRUST1.0 模型,地幔部分采用 AK135 模型),分别由勒夫波和瑞雷波频散反演得到的 SH 波和 SV 波速度结构模型。可以看出,从中下地壳到上地幔,SH 波与 SV 波速度的差异显著,这可能与研究区北部贝加尔裂谷的伸展构造作用有关(杨巍然等, 2003)。此外,在中戈壁带数处出露的火山岩(IAVCEI, 1973; Whitford-Stark, 1987),也从侧面说明了研究区下方径向各向异性介质的存在。

3.2 中强震分布与速度分布关系

从 USGS 网站上收集的本研究区域内 1950 年以来发生的有确切记录的中强震信息($M \geq 4.3$),发现所有地震均发生在地壳内。由图 8 可以看出,大多数地震均发生在高速体与低速体的过渡带上,且偏向于高速异常体一侧。速度变化强烈的区域也正是应力最为集中活跃的地方,容易积累较强的应变能从而发生破裂引发大地震(房立华等, 2009)。吴建平等(2009)关于汶川地震余震的分布和三维速度结构的研究也显示地震集中发生在高速异常与低速异常过渡带的高速异常体内。此外,芦山地震(李大虎等, 2015)、玉树地震(王长在等, 2013)和日本中越地震(Kato *et al*, 2005)的震源也位于高、低速异常交界附近且偏向高速异常体一侧。这些相似的速度结构特征,对于深入研究孕震环境具有重要意义。

通过中国地震局地球物理研究所与蒙古科学院合作在蒙古中南部地区获得的地震观测资料,我们提取了勒夫波相速度频散曲线,并进行了二维相速度反演。结果表明,蒙古中南部地区相速度分布存在横向不均匀性。短周期内(12—20 s),相速度分布受地表地形的控制,其中杭爱—肯特山盆表现为高速异常,乌兰巴托盆地、中戈壁带以及南戈壁带均表现为低速异常;中等周期内(20—40 s),研究区相速度分布形态与短周期类似,但横向不

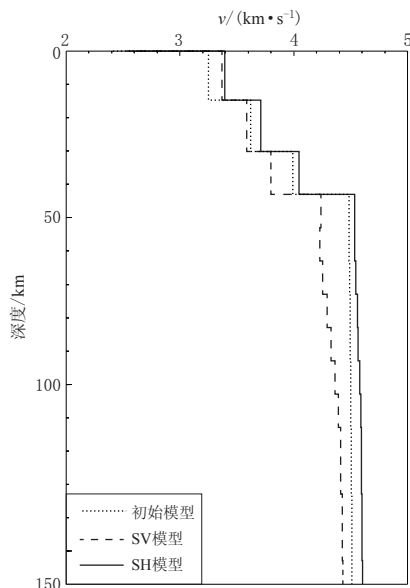


图 9 相同初始模型下反演得到的 SH 波(实线)和 SV 波(虚线)速度结构
Fig. 9 SH (solid line) and SV (dashed line) velocity structure from the inversion based on the same initial model

均匀性强度减弱,且随着周期增大,中戈壁带出现高速异常;中长周期内(40—70 s),整个区域表现出南北低速异常夹中部高速异常的形态,这与瑞雷波中长周期相速度分布形态显著不同,结合中戈壁带分布大量火山岩的地质背景,推测研究区域内存在较强的径向各向异性.此外,相速度分布图与中强地震震中分布关系的对比分析,显示多数地震均发生在高速体与低速体的过渡区域,这对探讨地震发生机制和地震危险区划分具有重要的参考意义.

需要指出的是,由于本文仅讨论了相速度分布,并未反演和分析不同深度的 S 波速度结构.下一步尚需进一步利用纯路径频散反演该地区的三维 S 波速度结构及径向各向异性,从而更加直观深入地探讨有关问题.

参 考 文 献

- 房立华, 吴建平, 吕作勇. 2009. 华北地区基于噪声的瑞利面波群速度层析成像[J]. 地球物理学报, **52**(3): 663–671.
- Fang L H, Wu J P, Lü Z Y. 2009. Rayleigh wave group velocity tomography from ambient seismic noise in North China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(3): 663–671 (in Chinese).
- 房立华, 吴建平, 王未来, 王长在, 杨婷. 2013. 华北地区勒夫波噪声层析成像研究[J]. 地球物理学报, **56**(7): 2268–2279.
- Fang L H, Wu J P, Wang W L, Wang C Z, Yang T. 2013. Love wave tomography from ambient seismic noise in North China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(7): 2268–2279 (in Chinese).
- 何静, 吴庆举, 高孟潭, 张瑞青, 余大新, Ulziibat M, Demberel S. 2014. 利用接收函数方法研究蒙古中南部地区地壳结构[J]. 地球物理学报, **57**(7): 2386–2394.
- He J, Wu Q J, Gao M T, Zhang R Q, Yu D X, Ulziibat M, Demberel S. 2014. Crustal structure and Poisson ratio beneath the central and southern Mongolia derived from receiver functions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(7): 2386–2394 (in Chinese).
- 何正勤, 叶太兰, 丁志峰. 2009. 华北东北部的面波相速度层析成像研究[J]. 地球物理学报, **52**(5): 1233–1242.
- He Z Q, Ye T L, Ding Z F. 2009. Surface wave tomography for the phase velocity in the northeastern part of North China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(5): 1233–1242 (in Chinese).
- 李大虎, 吴萍萍, 丁志峰. 2015. 四川芦山 $M_s 7.0$ 地震震源区及其周边区域 P 波三维速度结构研究[J]. 地震学报, **37**(3): 371–385.
- Li D H, Wu P P, Ding Z F. 2015. Tomography of the three dimensional P-wave velocity structure in the source region of the $M_s 7.0$ Lushan, Sichuan, earthquake and its surrounding areas[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **37**(3): 371–385 (in Chinese).
- 潘佳铁, 吴庆举, 李永华, 张风雪, 张广成. 2011. 华北地区瑞雷面波相速度层析成像[J]. 地球物理学报, **54**(1): 67–76.
- Pan J T, Wu Q J, Li Y H, Zhang F X, Zhang G C. 2011. Rayleigh wave tomography of the phase velocity in North China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(1): 67–76 (in Chinese).
- 彭艳菊, 苏伟, 郑月军, 黄忠贤. 2002. 中国大陆及海域 Love 波层析成像[J]. 地球物理学报, **45**(6): 792–801.
- Peng Y J, Su W, Zheng Y J, Huang Z X. 2002. Love wave seismic tomography of China and vicinal sea areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **45**(6): 792–801 (in Chinese).
- 彭艳菊, 黄忠贤, 苏伟, 郑月军. 2007. 中国大陆及邻区海域地壳上地幔各向异性研究[J]. 地球物理学报, **50**(3): 752–759.
- Peng Y J, Huang Z X, Su W, Zheng Y J. 2007. Anisotropy in crust and upper mantle beneath China continent and its adjacent seas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **50**(3): 752–759 (in Chinese).
- 王长在, 吴建平, 房立华, 王未来. 2013. 玉树地震震源区速度结构与余震分布的关系[J]. 地球物理学报, **56**(12): 4072–4083.

- Wang C Z, Wu J P, Fang L H, Wang W L. 2013. The relationship between wave velocity structure around Yushu earthquake source region and the distribution of aftershocks[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(12): 4072–4083 (in Chinese).
- 吴建平, 黄媛, 张天中, 明跃红, 房立华. 2009. 汶川 $M_s 8.0$ 级地震余震分布及周边区域 P 波三维速度结构研究[J]. *地球物理学报*, **52**(2): 320–328.
- Wu J P, Huang Y, Zhang T Z, Ming Y H, Fang L H. 2009. Aftershock distribution of the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake and three dimensional P-wave velocity structure in and around source region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(2): 320–328 (in Chinese).
- 熊熊, 单斌, 王继业, 郑勇. 2010. 蒙古-贝加尔地区上地幔小尺度对流及地球动力学意义[J]. *地球物理学报*, **53**(7): 1594–1604.
- Xiong X, Shan B, Wang J Y, Zheng Y. 2010. Small-scale upper mantle convection beneath the Mongolia-Baikal rift zone and its geodynamic significance[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(4): 529–541.
- 杨巍然, 隋志龙, Mats V D. 2003. 俄罗斯贝加尔湖区伸展构造及与中国东部伸展构造对比[J]. *地球科学进展*, **18**(1): 45–49.
- Yang W R, Sui Z L, Mats V D. 2003. Extensional tectonics of Baikal Lake district, Russia: Contrast with east China[J]. *Advance in Earth Sciences*, **18**(1): 45–49 (in Chinese).
- 余大新, 吴庆举, 李永华, 潘佳铁, 张风雪, 何静, 高孟潭, Ulziiat M, Demberel S. 2015. 蒙古中南部地区面波相速度层析成像[J]. *地球物理学报*, **58**(1): 134–142.
- Yu D X, Wu Q J, Li Y H, Pan J T, Zhang F X, He J, Gao M T, Ulziiat M, Demberel S. 2015. Rayleigh wave tomography of the phase velocity in the central and southern Mongolia[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(1): 134–142 (in Chinese).
- 张建功, 田小波, 张洪双, 司少坤, 张中杰, 滕吉文. 2012. 贝加尔裂谷区地壳上地幔复杂的各向异性及其动力学意义[J]. *地球物理学报*, **55**(8): 2523–2538.
- Zhang J L, Tian X B, Zhang H S, Si S K, Zhang Z J, Teng J W. 2012. The crust and upper mantle anisotropy in Baikal rift zone and its dynamic significance[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(8): 2523–2538 (in Chinese).
- 庄真, 邓大量. 1988. 太平洋盆地勒夫波与瑞利波不一致性的研究[J]. *地球物理学报*, **31**(2): 156–164.
- Zhuang Z, Teng T L. 1988. Study on the Love wave/Rayleigh wave incompatibility in the Pacific Ocean basin[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **31**(2): 156–164 (in Chinese).
- Backus G, Gilbert F. 1968. The resolving power of gross Earth data[J]. *Geophys J R astr Soc*, **16**(2): 169–205.
- Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. 2002. A new terrane subdivision for Mongolia: Implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia[J]. *J Asian Earth Sci*, **21**(1): 87–110.
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Shapiro N M. 2008. Broadband ambient noise surface wave tomography across the United States[J]. *J Geophys Res*, **113**(B5): B05306. doi:10.1029/2007JB005248.
- Calais E, Vergnolle M, San'kov V, Lukhnev A, Miroshnichenko A, Amarjargal S, Déverchère J. 2003. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002): Implications for current kinematics of Asia[J]. *J Geophys Res*, **108**(B10): 2501. doi:10.1029/2002JB002373.
- Croweller H S, Arora B, Brown S K, Cottrell E, Deligne N I, Guerrero N O, Hobbs L, Kiyosugi K, Loughlin S C, Lowndes J, Nayembil M, Siebert L, Sparks R S J, Takarada S, Venzke E. 2012. Global database on large magnitude explosive volcanic eruptions (LaMEVE)[J]. *J Appl Volcanol*, **1**(1): 4. doi:10.1186/2191-5040-1-4.
- Cunningham W D, Windley B F, Dorjnamjaa D, Badamgarov G, Saandar M. 1996. A structural transect across the Mongolian western Altai: Active transpressional mountain building in central Asia[J]. *Tectonics*, **15**(1): 142–156.
- Cunningham W D. 2001. Cenozoic normal faulting and regional doming in the southern Hangay region, Central Mongolia: Implications for the origin of the Baikal rift province[J]. *Tectonophysics*, **331**(4): 389–411.
- Ditmar P G, Yanovskaya T B. 1987. A generalization of the Backus-Gilbert method for estimation of lateral variations of surface wave velocity[J]. *Izv Phys Solid Earth*, **23**(6): 470–477.
- Gaherty J B. 2004. A surface wave analysis of seismic anisotropy beneath eastern North America[J]. *Geophys J Int*,

158(3): 1053–1066.

- Gao S S, Liu K H, Davis P M, Slack P D, Zorin Y A, Mordvinova V V, Kozhevnikov V M. 2003. Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal rift zone[J]. *J Geophys Res*, **108**(B4): 2194.
- IAVCEI. 1973. *Post-Miocene Volcanoes of the World. IAVCEI Data Sheets*[R]. Rome: Internatl Assoc Volc Chemistry Earth's Interior.
- Kato A, Kurashimo E, Hirata N, Sakai S, Iwasaki T, Kanazawa T. 2005. Imaging the source region of the 2004 mid-Niigata prefecture earthquake and the evolution of a seismogenic thrust-related fold[J]. *Geophys Res Lett*, **32**(7): L07307.
- Kennett B L N, Engdahl E R, Buland R. 1995. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes[J]. *Geophys J Int*, **122**(1): 108–124.
- Kozakov I K, Kotov A B, Salnikova E B, Kovach V P, Natman A, Bibikova E V. 2001. Timing of the structural evolution of metamorphic rocks in the Tuva-Mongolian massif[J]. *Geotectonics*, **35**(3): 165–184.
- Kulakov I Y. 2008. Upper mantle structure beneath southern Siberia and Mongolia, from regional seismic tomography[J]. *Russian Geol Geophys*, **49**(3): 187–196. doi:10.1016/j.rgg.2007.06.016.
- Laske G, Masters G, Ma Z T, Pasyanos M. 2013. Update on CRUST1.0: A 1-degree global model of Earth's crust[C]// *Geophysical Research Abstracts*, 15, Abstract EGU2013-2658. Vienna, Austria: EGU: 317.
- Li Y H, Wu Q J, Pan J T, Zhang F X, Yu D X. 2013. An upper-mantle S-wave velocity model for East Asia from Rayleigh wave tomography[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **377**(5): 367–377.
- Petit C, Déverchère J, Calais E, San'kov V, Fairhead D. 2002. Deep structure and mechanical behavior of the lithosphere in the Hangai-Hövsööl region, Mongolia: New constraints from gravity modeling[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **197**(3/4): 133–149.
- Petit C, Fournier M. 2005. Present-day velocity and stress fields of the Amurian Plate from thin-shell finite element modeling[J]. *Geophys J Int*, **160**(1): 357–369.
- Tapponnier P, Molnar P. 1979. Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia, and Baykal region[J]. *J Geophys Res*, **84**(B7): 3425–3455.
- Tiberi C, Deschamps A, Déverchère J, Petit C, Perrot J, Appriou D, Mordvinova V, Dugaarma T, Ulzibaat M, Artemiev A A. 2008. Asthenospheric imprints on the lithosphere in Central Mongolia and Southern Siberia from a joint inversion of gravity and seismology (MOBAL experiment)[J]. *Geophys J Int*, **175**(3): 1283–1297.
- Whitford-Stark J L. 1987. A survey of Cenozoic volcanism on mainland Asia[J]. *Geol Soc Amer Spec Pap*, **213**(1): 1–74.
- Wu Q J, Zheng X F, Pan J T, Zhang F X, Zhang G C. 2009. Measurement of interstation phase velocity by wavelet transformation[J]. *Earthquake Science*, **22**(4): 425–429.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, **22**(6): 1069.
- Yanovskaya T B, Ditmar P G. 1990. Smoothness criteria in surface wave tomography[J]. *Geophys J Int*, **102**(1): 63–72.
- Zonenshain L P, Savostin L A. 1981. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia[J]. *Tectonophysics*, **76**(1/2): 1–45.
- Zorin Y A, Turutano E K, Kozhevnikov V M, Rasskazov S V, Ivanov A V. 2006. Cenozoic upper mantle plumes in east Siberia and central Mongolia and subduction of the Pacific Plate[J]. *Dokl Earth Sci*, **409**(1): 723–726.