

文章编号: 0253-3782(2002)03-0252-08

中国大陆及其邻域的瑞利波群速度 分布图象与地壳上地幔速度结构^{*}

何正勤 丁志峰 叶太兰 孙为国 张乃铃

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 利用中国数字化地震台网(CDSN)11 个台站和周边地区的 11 个 IRIS 数字化地震台站记录的长周期面波资料,用多重滤波方法测定了在 647 条不同路径上周期从 10~92 s 的基阶瑞利波群速度频散曲线.采用 Dimtar-Yanovskaya 方法,反演得到北纬 18°~54°、东经 70°~140°范围内,25 个中心周期的群速度分布图象.结果表明:在 10~15.9 s 周期范围内,群速度分布存在着明显的横向不均匀性,其分区分块特征与大地构造单元有着密切的对应关系,两个明显的低速区域分别位于塔里木盆地和东海及北部邻域;从 21~33 s 逐渐显示出深部构造块体的格局;在 36.6~40 s 周期附近的群速度分布图象中,十分清晰地显示出中国大陆岩石圈结构的分区特征,南北地震带、青藏高原、华北、华南块体及东北地块的边界非常明显.本文给出了沿 30°N、38°N 纬线和沿 90°E、120°E 经线剖面的群速度随周期分布图象.在这些剖面上,较明显地展示出中国大陆及其邻域地壳上地幔速度结构的基本特征.各构造块体的深部速度结构差异较大,在青藏高原东部地区的地壳中部存在局部低速区域;塔里木盆地、扬子地台的上地幔速度较高,显示出稳定地台特征;华北平原上地幔低速层的埋深浅、厚度大;东海及日本海的上地幔速度较低,这可能与菲律宾板块下插产生的摩擦热与喜山期以来受强烈拉张有密切的关系.

关键词 瑞利面波 群速度分布 地壳上地幔 速度结构

中图分类号: P315.3⁺1 **文献标识码:** A

引言

利用天然地震面波频散资料研究中国大陆的地壳上地幔速度结构,在我国已取得了大量的研究成果.地震记录仪器发展的类型可以分为 3 类:基式模拟记录仪、763 长周期模拟记录地震仪和现代宽频带数字地震仪.冯锐等(1981)用中国 15 个基准台的基式仪记录的 19 次地震的面波资料,得到 28 条路径上的群速度和相速度频散曲线,将中国大陆分成 5 个块体,反演得到了各个块体的平均地壳速度模型.姚振兴等(1981)、朱培定等(1982)、何正勤等(1990)则分别用面波群速度研究了青藏高原、塔里木盆地和中国南北地震带的地壳速度结构.

^{*} 国家科委攀登预选题目“东亚大陆动力学研究”和地震科学联合基金(9507413)共同资助.中国地震局地球物理研究所论著 02AC1001.
2001-07-13 收到初稿,2001-11-21 收到修改稿并决定采用.

随着我国基准台 763 地震仪记录资料的积累,宋仲和等(1993)、周兵等(1991)、陈国英等(1991)、庄真等(1992)、安昌强等(1993)分别用 763 长周期地震仪和周边的 WWSSN 台站资料,研究了中国大陆及各大构造块体的三维速度结构.徐果明等(2000)用 763 长周期地震仪记录资料的相速度频散,研究了中国大陆东部的地壳上地幔三维速度结构.以上文献中对中国大陆及邻区各构造单元的地壳结构及壳内低速层和上地幔软流层的埋深都有程度不同的研究和讨论.

近 10 年来,数字化地震台网的正式投入运行,已经积累了十分丰富的数字化地震资料.这些资料具有频带宽、动态范围大、仪器频率特性稳定可靠等优点.利用数字地震仪记录的宽频带面波资料研究各地区大范围的群速度分布图象与地壳上地幔速度结构的成果也相继出现.Wu 和 Levshin(1994)以及 Wu 等(1997)用瑞利波层析成像法,反演得到了亚洲东部地区周期从 30~70 s 的群速度分布图象;Ritzwoller 和 Levshin(1998)测定了欧亚大陆的瑞利波群速度分布图象;郑月军等(2000)研究了中国东部海域的群速度分布,并对其构造差异进行了讨论.本文将全部利用数字化长周期面波资料,研究中国大陆及其邻域的群速度分布与各构造块体地壳上地幔的结构特征.

1 群速度频散的测定与反演

从中国数字地震台网(CDSN)11 个台站及周边 11 个 IRIS 数字地震台站(何正勤等, 2001;图 1),1987~1998 年记录的 130 次震级大于 5.5 的浅源地震资料中,挑选出噪音小、面波波形清晰、频散特征明显的长周期垂直分量记录 1 200 余条,用多重滤波频时分析方法(Dziewonski *et al.*, 1969)测定出 647 条不同大圆路径的群速度频散曲线.这些路径对中国大陆及其邻区形成了较均匀、稠密的覆盖(图 1).大圆路径的平均长度(震中距)为 2 810 km,可以兼顾资料中各种频率成分的信息含量.在群速度测量中,首先用传递函数方法进行仪器频率特性校正,以消除仪器群延迟对群速度测量的影响(Wu *et al.*, 1997).在多重滤波频时分析中使用了均等显示滤波器,从而使长周期部分的群速度值更加可靠.

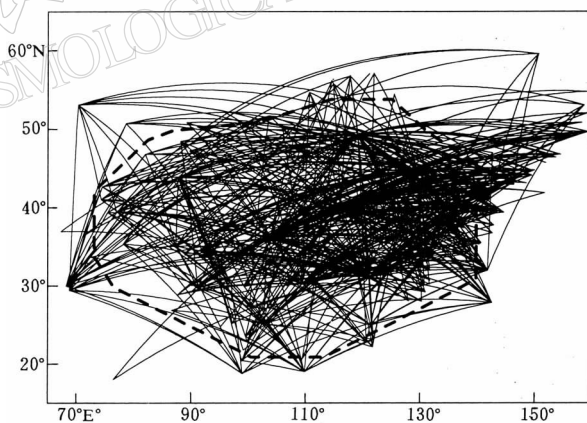


图 1 面波大圆路径分布图

(图中粗虚线所围的范围即本文的研究区域)

本文采用 Ditmar 和 Yanovskaya(1987)以及 Yanovskaya 和 Ditmar(1990)提出的面波层析成像反演方法,对 10~92 s 范围、25 个中心周期分别反演得到各个周期的群速度分布图象.该方法是 Backus-Gilbert 反演方法在面波 2D 反演情况下的推广,是近期的面波频散反演中广泛应用的方法.输入沿 L 条路径、周期为 T_m 的群速度值,经反演得到该周期的群速度分布 $U(\varphi, \lambda)$ 和空间分辨 $R(\varphi, \lambda)$ 的图象.其中, φ 和 λ 分别是纬度和经度.反演的实施是分别对每个周期单独进行的.

2 典型构造块体的群速度频散特征

通过群速度频散特征的分析,可以直观地展示出深部速度结构的差异,用相同周期不同地区的群速度分布来探讨不同地区在某一深度范围的横向变化;而由某一地区不同周期的群速度变化可用来研究深部速度结构的纵向变化.群速度频散曲线的形态主要由传播路径中介质的各层厚度与横波层速度所决定,一定周期范围的群速度频散曲线特征对应着相应深度范围的横波速度结构.图 2 给出了几个典型构造块体中的具有代表意义的纯路径群

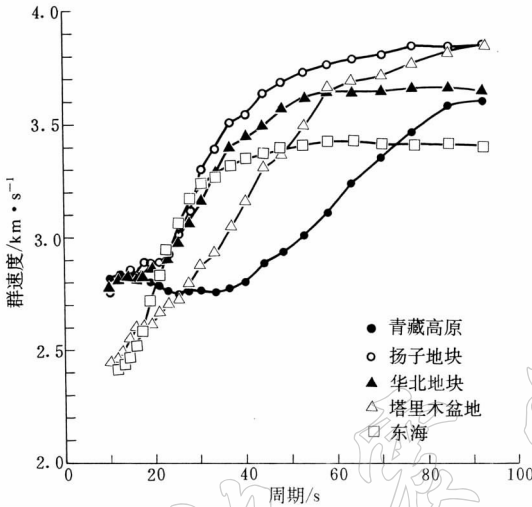


图 2 不同地区的瑞利波群速度频散曲线

速度频散曲线.可以看出,其频散曲线的形态存在着明显的差异:青藏高原的地壳厚度大,S波速度低,在10~40 s范围存在着强烈的速度逆转.表明在地壳中下部存在低速层,上地幔没有明显的低速层显示;东海与塔里木盆地在小于20 s周期范围,群速度明显偏低,小于2.7 km/s,说明地壳中上部平均速度低,可能是这两个区域内沉积层较厚的原因.塔里木盆地与扬子地台在长周期(大于60 s)部分群速度较高,在本文所研究的频带范围,没有下降的趋势,表明上地幔顶部速度较高,没有明显的低速层存在,具有稳定地台的特征.而华北平原与东海在长周期部分(大于50 s)的频散曲线有下降趋势,这是

上地幔存在低速带的反映.

3 不同周期的群速度分布与速度结构的横向变化

群速度分布图象是根据混合路径频散曲线直接反演得到的结果,不同周期的群速度图象反映的是不同深度范围内深部介质的横向变化情况.它所呈现的速度结构的横向不均匀性和纵向变化特征,对于大的构造块体边界和整体构造特征的研究有着十分重要的参考价值.

本研究中,根据所有混合路径上的瑞利波群速度频散结果,选用10~92 s范围的25个中心周期,用上述反演方法,反演得到每个中心周期在研究区域内的瑞利波群速度分布图象.通过对25个周期的群速度分布图象的研究表明,中国大陆及邻区地壳上地幔速度结构在纵向和横向都存在着明显的非均匀性质.本文将对几个具有代表意义周期的群速度图象进行分析与讨论.为描述方便,将10~92 s周期范围分为短周期、中周期、中长周期和长周期4个周期段来讨论.

1) 短周期段(10.0~15.9 s).在10.0, 11.0, 12.0, 13.2, 14.5和15.9 s 6个周期的群速度分布图象中,基本上反映了相似特征.图3a是周期12 s的群速度分布图象.两个明显的高速区域,一个位于青藏高原东部到扬子地台一带,另一个位于蒙古褶皱带到祁连褶

皱带区域. 塔里木盆地和东部海域(冲绳海槽、黄海及胶东半岛)是两个明显的低速异常区域. 这个周期段的瑞利波平均群速度为 2.75 km/s 左右, 其群速度分布主要受到地壳浅部沉积层厚度的显著影响. 出现低速异常的区域, 如塔里木盆地和东部海域, 都具有巨厚的沉积层, 这是导致低速异常的主要原因, 而高速异常区域则主要出现在高原、山脉等基岩出露或沉积层较薄的地区. 华北平原与东北平原具有正常的群速度值(2.8 km/s 左右).

2) 中周期段($17 \sim 27 \text{ s}$). 该周期段反映的是地壳中下部到 Moho 界面深度的结构特征, 其群速度分布图象主要受到地壳厚度、壳内低速层的影响. 在图 3b 中给出了周期 23.0 s 的群速度分布图象, 该周期的平均群速度为 3.1 km/s . 从图 3b 可以看出, 沿海拉尔—北京—西安有一条北东向群速度梯度带, 该梯度带的东西两侧边界分别与大兴安岭—太行山—武陵山重力梯度带和贺兰山—龙门山—武陵山重力梯度带重合. 其西部呈现出一个大范围的低群速度带, 其中拉萨、兰州、二连浩特和海拉尔附近是几个局部的低速异常区域. 在这个周期段, 以拉萨为中心的青藏高原与塔里木盆地是明显的低速区域. 所有低速异常区域都位于西部, 而 23 s 周期的瑞利波穿透的深度约为 35 km , 因此, 在这条群速度梯度带以西区域的莫霍界面深度可能都大于 35 km . 这与过去在这些地区开展人工地震测深的结果基本一致. 东部海域的群速度与华北地区相近, 而日本海盆和太平洋西北缘是十分明显的高速异常区域. 说明这些地区的上地幔具有较高的地震波速度. 郑月军等(2000)在对东部海域的面波研究中也得到同样的结果.

3) 中长周期段($30.3 \sim 48.2 \text{ s}$). 该周期范围的瑞利波穿透的深度主要集中在 Moho 界面上下, 受沉积层厚度的影响较小. 其群速度分布图象的基本特征都较相似, 图 3c 中给出了 36.6 s 周期的群速度分布图象. 从图中可以看出, 本文所研究的区域被清楚地分成东西两大部分: 西部为低速区域, 东部为高速区域, 该周期的平均群速度为 3.3 km/s , 主要集中在昆明—西安—海拉尔一带, 呈北东向条带分布. 这是中国大陆东西两部分的分界线. 西部的典型低速异常区域是青藏高原, 因为青藏高原的地壳厚度均大于 50 km , 36.6 s 周期的瑞利波能穿透的深度在青藏高原还位于地壳之中. 而在东部已达到了地幔顶部. 所以与东部相比, 成为明显的低速区. 而在准噶尔盆地到乌鲁木齐东南一带, 则出现了局部的高速异常区, 说明该区域的地壳厚度小于 50 km , 且在地壳中没有低速层存在. 在东部的大陆区域, 又被张家口—渤海构造带和秦岭大别构造带分成东北、华北和华南 3 大块体. 东部海域沿牡丹江—日本海—东海是一轻度低速带. 该区域可能是陆壳到洋壳的过渡区域, 有待进一步研究.

4) 长周期部分($52.9 \sim 92.0 \text{ s}$). 图 3d 给出了 63.5 s 的群速度分布图象. 这一周期段主要反映的是上地幔深度范围的信息, 地壳的波速和厚度对其影响的程度已大大降低. 低速异常主要是上地幔低速层的贡献. 几个明显的低速异常区域分别位于青藏高原、南北地震带和东部海域.

4 纵剖面上的群速度分布与速度结构特征

根据反演得到的各点的群速度频散资料, 在图 4 中分别给出了沿 30°N 、 38°N 纬线和 90°E 、 120°E 经线剖面的群速度随周期分布图象. 群速度频散曲线上某个周期的群速度值反映的不是某个深度的速度值, 而是该周期的瑞利波所穿透深度范围内的平均速度值. 理论研究表明, 瑞利波的能量主要集中在自由表面附近, 其深度约在半个波长范围内. 因此,

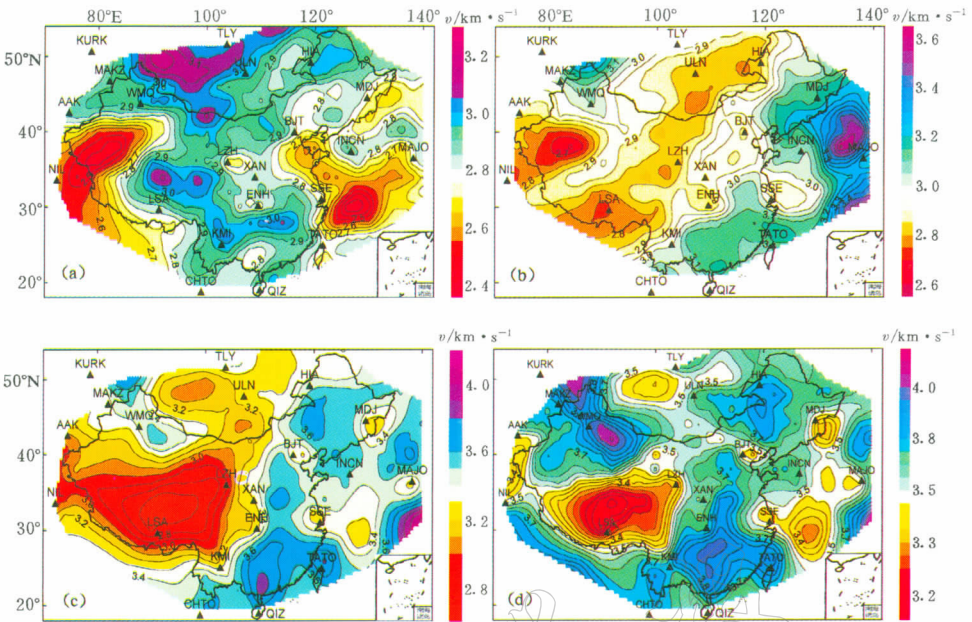


图 3 中国大陆及其邻域的瑞利波群速度分布图象
(a) $T=12.0\text{ s}$; (b) $T=23.0\text{ s}$; (c) $T=36.6\text{ s}$; (d) $T=63.5\text{ s}$

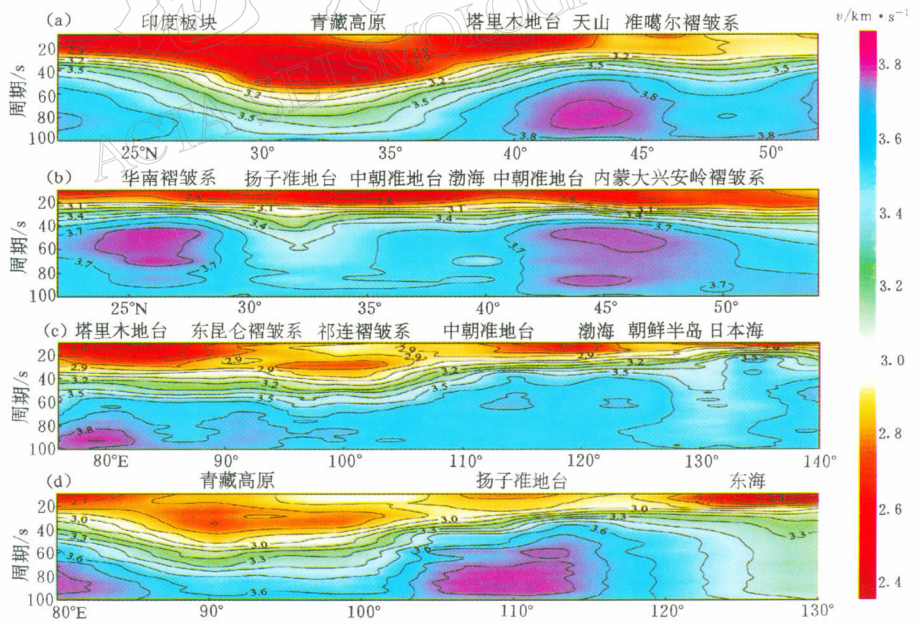


图 4 群速度频散剖面图
(a) 沿 90°E 剖面; (b) 沿 120°E 剖面; (c) 沿 38°N 剖面; (d) 沿 30°N 剖面

我们可以近似地认为, 某周期的群速度是其半个波长范围内的横波速度值(实际上群速度值略小于横波速度值), 群速度随周期从短到长的变化反映的是地球介质从浅到深速度结构的变化趋势, 比较相邻地区的群速度频散曲线就能反映出深部结构的横向变化特征. 本研究中, 我们将一条剖面各节点的群速度频散曲线排列在对应的位置上, 用周期作为纵坐标构成群速度随周期与空间位置变化的纵剖面图. 由于群速度频散曲线是一次反演的结果, 在该剖面图上能够更加直接客观地反映出速度结构在纵向和横向的变化轮廓.

沿 90°E (图 4a)剖面, 短周期(小于 20 s)的低速异常位于塔里木盆地与印度板块北缘(孟加拉湾北部)和准噶尔盆地一带. 在 20~40 s 周期范围, 青藏高原是低速异常区域. 这是青藏高原东部地区存在地壳中部低速层的证据. 由于受青藏高原巨厚地壳的影响, 整个青藏高原在中长周期部分的群速度明显低于南北两侧, 印度板块和塔里木盆地北部地区的上地幔速度较高, 横向变化不大.

120°E (图 4b)剖面在短周期部分的低速异常区位于华南褶皱系、华北平原和蒙古褶皱系一带. 20~30 s 周期的群速度相对稳定, 变化不大. 长周期的两个高速区域分别位于华南褶皱系和内蒙大兴安岭褶皱系. 在扬子地台东部(杭州湾附近), 中长周期的群速度明显低于南北两侧. 该位置与 30°N 剖面的低速异常区域基本一致.

在 38°N 剖面(图 4c)上, 短周期段(小于 20 s)的低速异常区分别位于塔里木盆地、渤海邻域和日本海域. 仍然是这些地区地壳浅部较厚沉积层的影响. 周期 30 s 附近的低速异常区位于祁连山褶皱带. 该周期的穿透深度约为 40 km, 可以推断, 该区域在地壳下部可能存在明显的低速带. 长周期部分除朝鲜半岛与日本海一带为低速异常外, 其它地区的速度变化不大. 总体看来以 100°E 为界, 西部的速度略高于东部.

30°N 剖面从 80°E ~ 130°E (图 4d), 自西向东穿越印度板块、青藏高原、川滇构造带、扬子地台和东海大陆架 5 个大的构造单元. 从该剖面的群速度分布图象可以看出, 在周期小于 20 s 部分, 有 3 个低速异常区域分别位于青藏高原西南缘、扬子地台和东海海域. 该频段反映的是地壳中上部的结构特征. 这些地区的较厚沉积层是导致低速异常的主要原因, 而青藏高原西南缘的喜马拉雅褶皱带的上地壳低速区, 可能与该区构造活动及物质破碎有关. 在 20~30 s 周期范围, 青藏高原东部及三江褶皱系一带有一明显的低速异常区, 这表明该区域在地壳中下部(深度 30~50 km)可能存在着范围较大的低速层. 在长周期部分(大于 40 s 周期), 印度板块和扬子地台是一个十分明显的高速区域, 该区域的岩石圈呈高速分布. 而东海一带直到长周期都一直是明显的低速区域, 上地幔速度可能较低.

本研究的群速度反演使用了 T. B. Yanovskaya 提供的计算程序, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- 安昌强, 宋仲和, 陈国英, 等. 1993. 中国西北地区剪切波三维速度结构[J]. 地球物理学报, **36**(3): 317~325
- 陈国英, 何正勤, 陈光英. 1991. 用数字台网的面波资料研究中国大陆的地壳上地幔结构[J]. 地震研究, **14**(3): 239~245
- 冯锐, 朱介寿, 丁韞玉, 等. 1981. 利用地震面波研究中国地壳结构[J]. 地震学报, **3**(4): 335~349
- 何正勤, 丁志峰, 叶太兰, 等. 2001. 中国大陆及其邻域地壳上地幔速度结构的面波层析成像研究[J]. 地震学报, **23**(6): 596~603
- 何正勤, 曾融生, 陈国英. 1990. 南北地震带的瑞利波群速度与地壳结构[J]. 西北地震学报, **12**(3): 19~22

- 宋仲和, 陈国英, 安昌强, 等. 1993. 中国大陆及其海域地壳上地幔三维速度结构[J]. 中国科学, B 辑, **23**(2): 180~188
- 徐果明, 李光品, 王善恩, 等. 2000. 用瑞利面波资料反演中国大陆东部地壳上地幔横波速度的三维构造[J]. 地球物理学报, **43**(3): 366~375
- 姚振兴, 李白基, 梁尚鸿, 等. 1981. 青藏高原地区瑞利波群速度和地壳构造[J]. 地球物理学报, **24**(3): 287~295
- 郑月军, 黄忠贤, 刘福田, 等. 2000. 中国东部海域地壳-上地幔瑞利波速度结构研究[J]. 地球物理学报, **43**(4): 480~487
- 周兵, 朱介寿, 秦建业. 1991. 青藏高原及邻近区域的 S 波三维速度结构[J]. 地球物理学报, **34**(4): 426~441
- 朱培定, 梁尚鸿, 李白基, 等. 1982. 用瑞利波研究新疆塔里木盆地地壳分层结构及 Q_R 值[J]. 地球物理学报, **25**(4): 324~332
- 庄真, 傅竹武, 吕梓龄, 等. 1992. 青藏高原及邻近地区地壳与上地幔剪切波三维速度结构[J]. 地球物理学报, **35**(6): 694~708
- Ditmar P G, Yanovskaya T B. 1987. An extension of the Backus-Gilbert technique for estimating lateral variations of surface wave velocities[J]. *Izv Akad Nauk SSSR, Fiz Zemli*, (6): 30~60 (in Russian)
- Dziewonski A, Bloch S, Landisman M. 1969. A technique for the analysis of transient seismic signals[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **59**: 427~444
- Ritzwoller M H, Levshin A. 1998. Eurasian surface wave tomography, group velocities[J]. *J Geophys Res*, **103**(B3): 4 839~4 878
- Wu F T, Levshin A. 1994. Surface-wave group velocity, tomography of East Asia[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **84**: 59~77
- Wu F T, Levshin A, Kozhevnikov V M. 1997. Rayleigh wave group velocity tomography of Siberia, China and the vicinity[J]. *Pure Appl Geophys*, **149**: 447~473
- Yanovskaya T B, Ditmar P G. 1990. Smoothness criteria in surface wave tomography[J]. *Geophys J Int*, **102**: 63~72

THE GROUP VELOCITY DISTRIBUTION OF RAYLEIGH WAVES AND CRUSTAL AND UPPER MANTLE VELOCITY STRUCTURE OF THE CHINESE MAIN-LAND AND ITS VICINITY

He Zhengqin Ding Zhifeng Ye Tailan Sun Weiguo Zhang Nailing

(Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the long period digital surface wave data recorded by 11 CDSN stations and 11 IRIS stations, the dispersion curve of the group velocities of fundamental mode Rayleigh waves along 647 paths, with the periods from 10 to 92 s, were measured by multi-filter. Their distribution at 25 periods, within the region of ($18^{\circ}\sim 54^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$), was obtained by Dimtar-Yanovskaya method. Within the period from 10 to 15.9 s, the group velocity distribution is lateral inhomogeneous and is strongly related to geotectonic units, with two low velocity zones respectively located in the Tarim Basin and the East Sea with its north regions. From 21 s to 33 s, the framework of tectonic blocks is revealed. From 36.6 to 40 s, the lithospheric subdivision of the China Mainland is obviously

uncovered, with distinct boundaries among the South-North Earthquake Belt, the Tibet Plateau, the North China, the South China and the Northeast China. Four cross-sections of group velocity distribution with period along 30°N , 38°N , 90°E and 120°E , are discussed respectively, which displays the basic features of the crust and upper mantle of the Chinese Mainland and its vicinity. There are distinguished velocity differences among various tectonic blocks. There are Low-Velocity-Zone(LVZ) in the middle crust of the eastern Tibet Plateau, high velocity featured as stable platform in the Tarim Basin and the Yangtze Platform, shallow and thick low-velocity-zone in upper mantle of the North China. The upper mantle LVZ in the East Sea and the Japan Sea is related to the frictional heat from subduction of the Philippine slab and the strong extension since the Himalayan orogenic period.

Key words: Rayleigh wave; group velocity distribution; crust and upper mantle; velocity structure

地震学报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA