

潘佳铁, 吴庆举, 李永华等. 华北地区瑞雷面波相速度层析成像. 地球物理学报, 2011, **54**(1): 67~76, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.008

Pan J T, Wu Q J, Li Y H, et al. Rayleigh wave tomography of the phase velocity in North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(1): 67~76, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.008

华北地区瑞雷面波相速度层析成像

潘佳铁, 吴庆举, 李永华, 张风雪, 张广成

中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘 要 利用华北科学探测台阵 190 个宽频带台站和 8 个甚宽带台站 2006 年 10 月至 2009 年 5 月记录的远震垂直向资料, 用小波变换频时分析方法测定了 1587 条独立路径的基阶瑞雷波相速度频散曲线, 并使用 Ditmar & Yanovskaya 方法反演得到 $111^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$, $37^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 区域内、周期 10~60 s 的高分辨率相速度分布图像. 本文的研究结果表明, 华北地区的地壳上地幔横波速度结构存在横向非均匀性. 短周期(如 10 s)的相速度分布与地表地质构造具有明显的相关性, 随着周期的增大(如 15 s), 地形的控制作用相对减弱. 中周期(如 30 s)的相速度分布差异暗示华北克拉通中、东部地区下地壳具有不同的物质组成, 图中相速度梯度带与太行山重力梯度带位置十分相近, 说明该重力梯度带两侧的地壳速度结构差异较大. 与短周期相比, 研究区内长周期(如 60 s)相速度分布的横向非均匀性明显减弱, 表明研究区上地幔顶部速度结构差异较地壳的小. 与全球典型大陆克拉通相比, 华北克拉通 10~60 s 的相速度频散明显偏低, 其频散特征与全球典型裂谷地区相类似, 这暗示华北克拉通已经遭受了明显的侵蚀与破坏.

关键词 瑞雷面波, 相速度, 层析成像, 双台法, 华北克拉通

DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.008

中图分类号 P315

收稿日期 2010-05-19, 2011-01-04 收修定稿

Rayleigh wave tomography of the phase velocity in North China

PAN Jia-Tie, WU Qing-Ju, LI Yong-Hua, ZHANG Feng-Xue, ZHANG Guang-Cheng

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

Abstract Using the teleseismic data recorded by 190 broadband stations and 8 very broadband stations of the portable seismic array in North China during Oct. 2006 to May. 2009, short period (10~60 s) inter-station phase dispersions of fundamental Rayleigh waves are obtained by the method of frequency and time analysis of wavelet transformation. A total of 1587 independent dispersion curves were then arranged into a tomographic inversion scheme to obtain the pure-path phase velocity dispersion at 0.5° by 0.5° grids in this region. It shows that the S-wave structure of the crust and upper mantle beneath North China is heterogeneous. The phase velocity distribution at period of 10 s is related with the geologic units on the surface, but the effect of topography becomes weaker in the longer periods(15 s). In the middle period part (30 s), the difference of phase velocity between the eastern NCC and central NCC reveals the difference of composition in the middle-lower crust. At the same time, the gradient zone of phase velocity is very close to the gravity gradient zone of the Taihangshan on the map of period 30 s, and it indicates that there are many differences in the crustal structures on the two sides of the gravity

基金项目 国家自然科学基金(40774039, 90814013)和科技部科技基础性工作专项(2006FY110100)资助.

作者简介 潘佳铁, 男, 1983 年生, 助理研究员, 主要从事地震面波层析成像以及地壳上地幔结构研究.

E-mail: panj151@gmail.com, panjt@cea-igp.ac.cn

gradient zone. Compared with the phase velocity maps of short periods, the lateral heterogeneity of phase velocity becomes much weaker in the longer period (60 s) maps. Compared with that in typical Craton, the phase velocity of NCC is much slower at periods of 10 ~ 60 s, whose dispersion characteristic is very similar with that in the typical rift regions of the world (e. g. Rio Grande Rift). It indicates the NCC has been obviously eroded and breached.

Keywords Rayleigh wave, Phase velocity, Tomography, Two station method, North China

1 引言

华北克拉通是我国大陆最古老的克拉通之一,其中中生代、新生代火成岩的广泛侵入与喷发、大量中强地震的密集发生等地质现象都表明,中生代以来华北克拉通遭受了广泛的破坏作用。研究区($111^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$, $37^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$)位于华北克拉通的中、东部,大量的地质和地球物理资料研究表明,华北克拉通不同块体可能具有明显不同的岩石层/软流层结构,是研究大陆岩石圈形成与演化的一个天然实验室^[1]。研究该地区的壳幔结构对于研究华北克拉通的破坏与地震活动性等都具有重要的科学意义。

用地震成像方法研究地壳上地幔结构,目前主要有地震体波和面波方法。一般来说,体波成像^[2~6]具有较高的横向分辨率,但垂向分辨率低。与体波相比,面波成像尽管横向分辨率低,但具有较高的垂向分辨率,并且依托台站密集的区域台阵资料也能保证较好的横向分辨率。利用面波层析成像技术能得到大面积范围内地壳上地幔横波速度的三维分布情况。近年来,利用背景噪声进行面波层析成像(Ambient Noise Tomography)的研究也开始成为热点,得到越来越多的应用^[7~10],但利用噪声能够提取的频散曲线的最大可靠周期较短,一般小于 40 s,着重于研究浅部结构,难以获得更深的上地幔结构信息。目前使用 Rayleigh 面波群速度频散研究中国大陆及其邻近区域的速度结构已取得了大量成果^[11~25],而利用 Rayleigh 面波相速度频散资料的研究则相对较少。曾融生等^[22]最早开始利用 Rayleigh 波相速度频散研究我国的地壳结构,并且认为在研究不同地区地壳结构的相对变化时相速度方法比群速度方法更准确^[24]。徐果明等^[23]和易桂喜等^[24]利用宽频带区域数字地震台网的资料,使用双台法得到了中国大陆及邻区的地壳上地幔瑞雷波相速度分布,受资料限制,其分辨率相对较低($>2^{\circ}$),难以分辨华北克拉通中、东部的壳幔速度结构差异。

中国地震局地球物理研究所 2006 年底在华北

布设了由 250 套地震计组成的地震流动观测台阵。台站分布如此密集在台阵为利用高分辨率的区域面波层析成像研究华北克拉通中、东部速度结构差异创造了契机。事实上,前人曾利用华北地震台阵的资料开展过地震面波成像/ANT 研究。如何正勤等^[25]利用华北台阵前半年记录的 10 个远震事件,提取了 435 条 Rayleigh 波相速度频散曲线,获得了华北东北部的面波相速度分布。房立华等^[26]基于 2007 年 1 月~2008 年 2 月间的背景噪声资料,用 ANT 方法获得了华北地区的瑞雷波群速度分布,然而他们关于中下地壳的速度分布特征却并不一致。本文搜集了华北台阵 2006 年 10 月~2009 年 5 月间的远震记录,采用面波层析成像方法,得到了研究区域内周期 10~60 s 的高分辨率瑞雷波相速度分布,并结合已有地质与地球物理研究成果,对其速度分布、横向变化及其可能的地质含义进行了探讨。

2 观测资料

2006 年 10 月份开始,中国地震局地球物理研究所在华北地区布设了 250 套地震观测仪器,其中 190 套为宽频带地震计,10 套为甚宽带地震计,50 套为短周期地震计。本文选取了 190 个宽频带台站和 8 个甚宽带台站(图 1)2006 年 10 月~2009 年 4 月的垂直向记录。宽频带地震计频带范围是 0.02~60 s,甚宽带地震计频带范围是 0.02~120 s,地震计均采用 GPS 授时。

选资料时需满足以下条件:(1)如图 2 所示,要求两个台站与震中大致在同一条大圆弧上,事件到近台的方位角与近台到远台的方位角之差 β 小于 3° ;(2)为了避免近源效应和高阶面波干涉造成的不利影响,要求震中距大于 20° ,最后震中距选定的范围是 $20^{\circ}\sim 70^{\circ}$;(3)两个台站的距离大于 80 km,台站间距过小,该路径上短周期部分的测量误差会很大;(4)为保证挑选到高信噪比且面波发育的远震波形事件,我们选取了震级介于 5.5 和 7.0 之间、震源深度小于 50 km 的浅源地震。

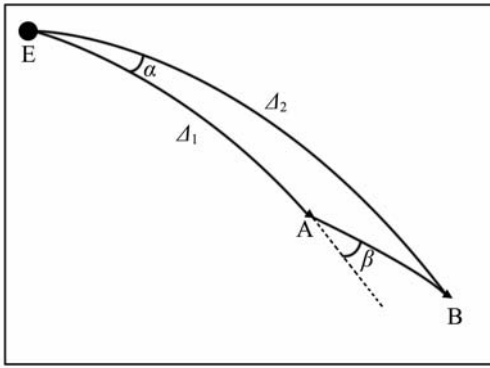


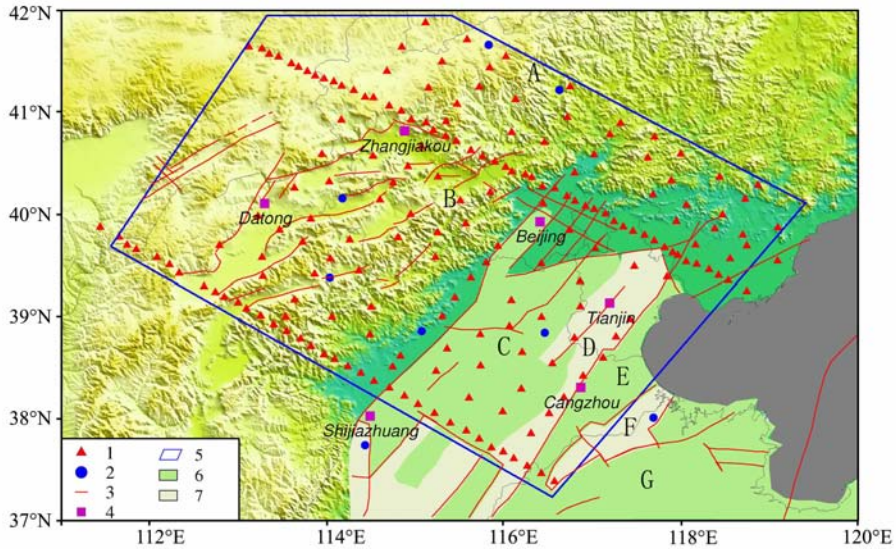
图 2 双台法大圆路径示意图

3 频散曲线的测量

3.1 相速度测量方法

为了使反演的结果更加可靠,准确测量相速度频散曲线是一项十分重要的工作.我们知道,单台法存在诸多限制因素:(1)震中定位的不准确性;(2)发震时刻计算的误差;(3)地震发震时断层破裂过程的影响.这三种误差被称为“源项误差”,因为他们都是由震源问题所引起的.双台法则无需考虑震源因素,仅要求有足够远的地震,两个接收台站间距远小于

Fig. 2 Great circle path for the two-station method



1. 宽频带台站, 2. 甚宽频带台站, 3. 主要活动断裂, 4. 城市, 5. 有效研究区域, 6. 盆地拗陷, 7. 盆地隆起, A. 燕山褶皱带, B. 太行山褶皱带, C. 冀中拗陷, D. 沧县隆起, E. 黄骅拗陷, F. 埕宁隆起, G. 济阳拗陷, 1. Broadband stations; 2. Very broadband stations; 3. Major active faults; 4. Cities; 5. The study region; 6. Depression in basins; 7. Uplift in basins; A. Yanshan fold zone; B. Taihangshan fold zone; C. Jizhong depression; D. Cangxian uplift; E. Huanghua depression; F. Chengning uplift; G. Jiyang depression.

图 1 研究区域主要构造单元和台站分布图(根据文献[27]修改)

Fig. 1 The tectonic sketch map of study region and the distribution of stations(Modified from Ref. [27])

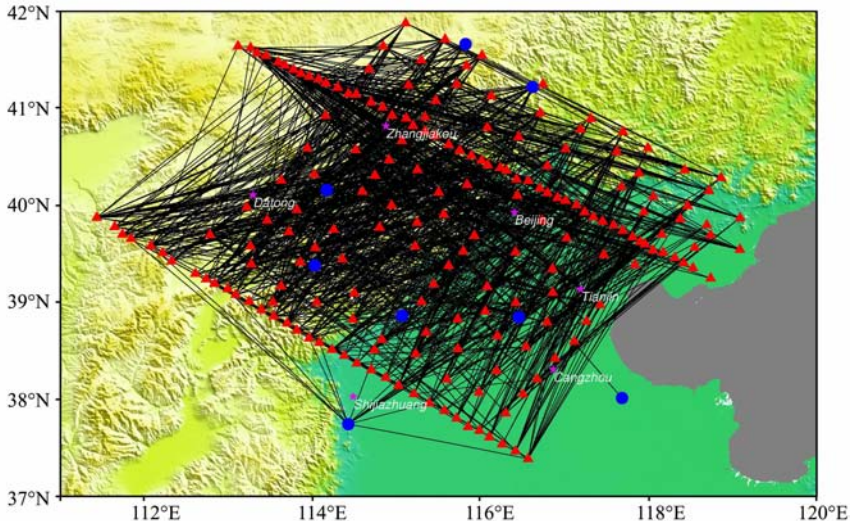


图 3 面波路径分布图(三角和圆点符号说明同图 1)

Fig. 3 Distribution of paths

震中距且与震源大致位于同一条大圆弧上,测得的频散能更可靠地反映传播路径下的速度结构,因此我们采用双台法。

窄带通滤波是用来测定双台相速度的一种常用方法.其主要思想是,对两个台的波形数据进行窄带通数字滤波,其滤波的中心频率是各周期对应的群延迟时间,然后在去除时间延迟后做互相关计算,在其等值线图上相关系数最大值的轨迹即是待测定的相速度频散曲线.然而在上述过程中不同的周期滤波器系数大小不一样,它的选择要依靠经验,缺乏自适应性,而连续小波变换频时分析方法,滤波器系数的选择是自适应的,并且与傅里叶变换相比,小波变换既能保留谱随延迟时间的变化信息,又能在时间和频率域得到同样好的分辨.该方法的主要思想是利用格林函数的相位谱测量双台间的相速度频散曲线^[28]:

$$c(f) = \frac{f\Delta}{ft_0 + [\varphi(f) \pm N]}, \quad (1)$$

其中 c 是相速度, f 是频率, Δ 是双台间的距离, t_0 是格林函数的第一个时间点, φ 是格林函数的相位, N 是一个整数。

本研究使用的是 Morlet 小波,母函数是一个受高斯函数调制的简谐波:

$$g(t) = \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(\frac{i2\pi t}{T_0}\right), \quad (2)$$

其中 σ 是高斯函数系数, T_0 是中心周期.母函数通过时间延迟扩散生成一系列子小波,

$$g\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) = \exp\left[\frac{-(t-\tau)^2}{2\alpha^2\sigma^2}\right] \exp\left[\frac{i2\pi(t-\tau)}{\alpha T_0}\right], \quad (3)$$

其中 α 为扩散因子, τ 为时间延迟.通过下式进行小波变换:

$$W(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int g^*\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) S(t) dt, \quad (4)$$

其中 $S(t)$ 是时间序列信号, g^* 是子小波的复共轭.变换后得到的是同时具有振幅和相位信息的复信号.此方法的详细介绍可以查阅文献^[28].

3.2 双台相速度频散测量

为了得到可靠的相速度频散曲线,除了要严格筛选波形记录外,还要求参加计算的两个台群频散速度曲线在 10~60 s 范围内光滑连续.对此,我们编制了小波变换频时分析(CWT-FTAN)软件,既能测量单台群速度(基于多重滤波技术,即 MFT),也可以测量双台相速度,拾取频散曲线时采用了基于图像分析的相速度频散曲线提取技术^[29].通过筛

选,我们测量了 2501 条路径的(包含重复路径)相速度频散曲线,将重复路径相速度频散资料进行算术平均处理,最终获得了 1587 条独立路径的相速度频散资料.双台路径分布见图 3,这些路径较好地覆盖了研究区域.图 4a 是各周期对应的路径条数,图 4b 是事件(89 个)分布图,与前人研究^[24,25]相比,本文所使用地震事件的方位分布更为均匀,不同方位地震事件的使用,不仅能使射线的方位分布更均一,也为我们下一步利用 Rayleigh 波相速度开展方位各向异性研究奠定了基础。

4 瑞雷波相速度层析成像

通过面波层析成像反演,我们可以得到研究区内各个周期的二维相速度分布.不同周期的相速度对不同深度范围内的横波速度结构敏感程度存在差异,故将面波相速度和横波速度结构联系在一起时,通常需要给出不同周期的相速度在深度方向上的敏感度核函数,如图 5 所示。

4.1 面波层析成像方法

本文采用 Ditmar & Yanovskaya^[30]和 Yanovskaya & Ditmar^[31]提出的面波层析成像方法,该方法是 Backus Gilbert 一维方法在二维情况下的推广,是面波层析成像中广泛应用的方法之一。

假设相速度的分布用函数 $C_e(\theta, \varphi)$ 表示,通过使下面的目标函数最小获得每个周期的相速度分布,

$$\Psi(C_e) = (d - Gm)^T (d - Gm) + \alpha \iint |\nabla m(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r}, \quad (5)$$

其中,

$$m(\mathbf{r}) = (C_e^{-1}(\mathbf{r}) - C_0^{-1})C_0,$$

$$d_i = t_i - t_{i0},$$

$$(Gm)_i = \iint G_i(\mathbf{r})m(\mathbf{r})d\mathbf{r} = \int_{l_{0i}} m(\mathbf{r})/C_0 ds,$$

$$\iint G_i(\mathbf{r})d\mathbf{r} = \int_{l_{0i}} \frac{ds}{C_0} = t_{i0}.$$

$\mathbf{r} = r(\theta, \varphi)$, 是位置矢量; C_0 是初始模型速度,一般取该周期所有路径上的平均相速度; t_i 是沿第 i 条路径的观测走时; t_{i0} 是根据初始模型计算的走时; l_{0i} 是第 i 条路径的长度; s 是参与反演的路径; α 是正则化参数.正则化参数控制着反演结果的光滑程度, α 越大,反演结果越光滑,分辨率越低; α 越小,反演结果的分辨率越高,但是误差也越大,经常会出现高低速交替出现的情况. α 可以通过几次尝试确定其值,我们在反演时使用的 α 为 0.2,所得的结果

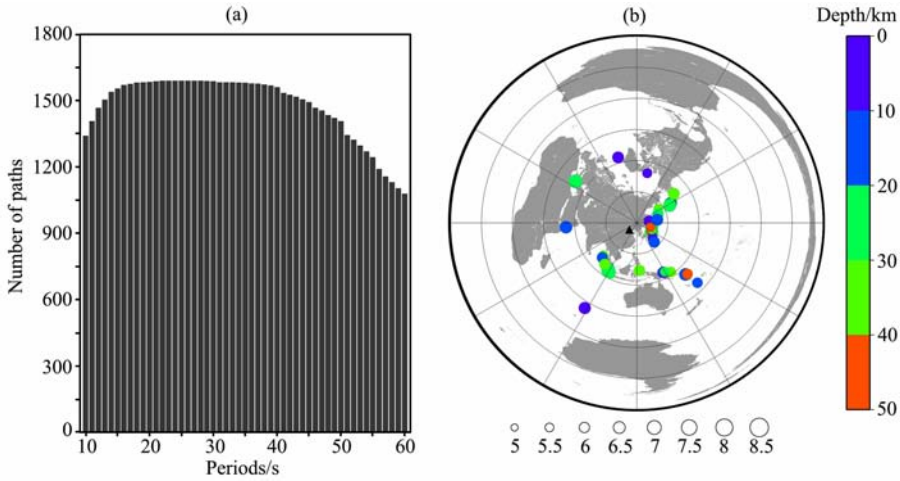


图 4 (a) 各周期的路径数;(b) 事件(89 个)分布图(三角表示华北台阵所处位置)

Fig. 4 (a) Number of paths at each interest period;(b) Distribution of events(89)(Triangle shows station array position)

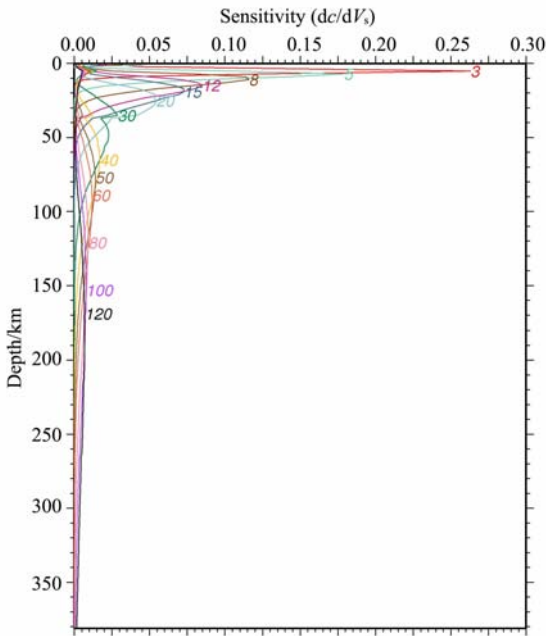


图 5 不同周期基阶瑞雷波相速度(c)对 S 波速度(V_s)

随深度变化的敏感度核函数

Fig. 5 Depth sensitivity kernels to shear wave velocity (V_s) for fundamental Rayleigh wave phase velocities (c) at different periods

比较光滑,且误差较小^[26].

4.2 分辨率估计

为了评估反演的分辨率情况,我们做了检测板测试.如果划分的网格太大则容易造成数据的浪费,如果网格太小则在反演结果中很可能引入人为的虚假异常.我们将研究区划分成 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,初始模型速度为 3.4 km/s ,扰动量为 $\pm 0.3 \text{ km/s}$,分别对周期 10、30 s 和 60 s 的数据做了检测板测试(如图 6).结果显示,研究区内模型的速度值和扰动量均得到

较好的恢复,表明资料的射线路径足够密集、均匀,并且将网格划分为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 是合理的.

4.3 不同周期的相速度分布特征

利用 Yanovskaya-Ditmar 反演方法,我们得到了研究区 10~60 s 的瑞雷波相速度分布图(如图 7),反演是一个个周期单独进行的.更密集的台站、更为丰富的远震资料的使用,使我们能够获取较前人^[19,24,25]更为精细($0.5^\circ \times 0.5^\circ$)的瑞雷波相速度分布.一般来说,基阶 Rayleigh 面波相速度对大约 $1/3$ 波长深度附近介质的 S 波速度结构最为敏感,并且周期越短,面波相速度的最敏感深度范围就越窄(如图 5).周期越长,波长越长,越能反映更大深度的横波速度结构.因此,可以通过对比各周期相速度的分布来讨论不同深度范围内 S 波的横向非均匀性.下面我们将分别讨论 10、15、30 s 和 60 s 四个周期的相速度分布及其与地表地质、壳幔深部结构的相互关系.

图 7a 是瑞雷波 10 s 的相速度分布图像,揭示了华北地区上地壳(大约 10~15 km)S 波速度的变化特征.从整体上看,周期为 10 s 的相速度分布受地形的控制作用很明显:以盆岭地形分界线为界,西部山区的速度明显高于东南部的华北盆地.燕山—太行褶皱带和隆起区(如沧县隆起)的速度相对较高,而凹陷的盆地地区(如,西部的大同盆地、张家口盆地和延怀盆地)速度相对较低.人工地震测深结果^[32]表明,燕山隆起和太行山隆起结晶基底的埋深较浅,约 1~2 km;冀中凹陷、延怀盆地、阳蔚盆地及大同盆地内部由于沉积层较厚,均表现为低速.由此可以看出,短周期高速与低速的区域分布可能与沉积层厚度、结晶基底埋深等区域地质构造有密

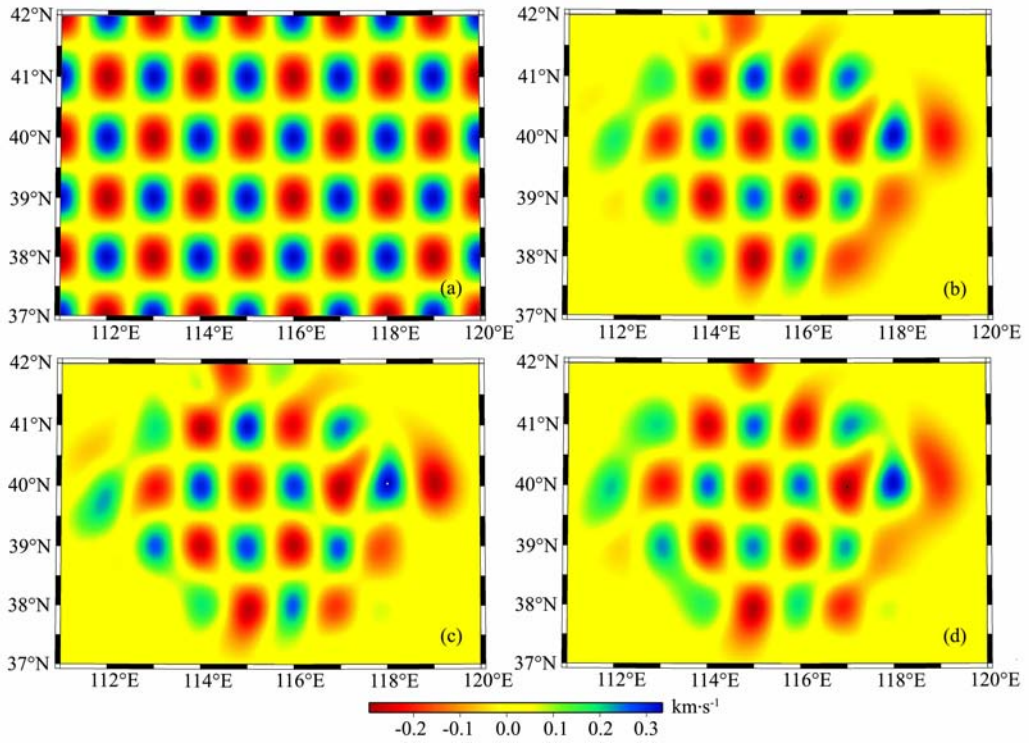


图 6 检测板测试(色标为速度扰动量)

(a)初始模型;(b)10 s;(c)30 s;(d)60 s.

Fig. 6 Check board test

(a)Input model;(b)10 s;(c)30 s;(d)60 s.

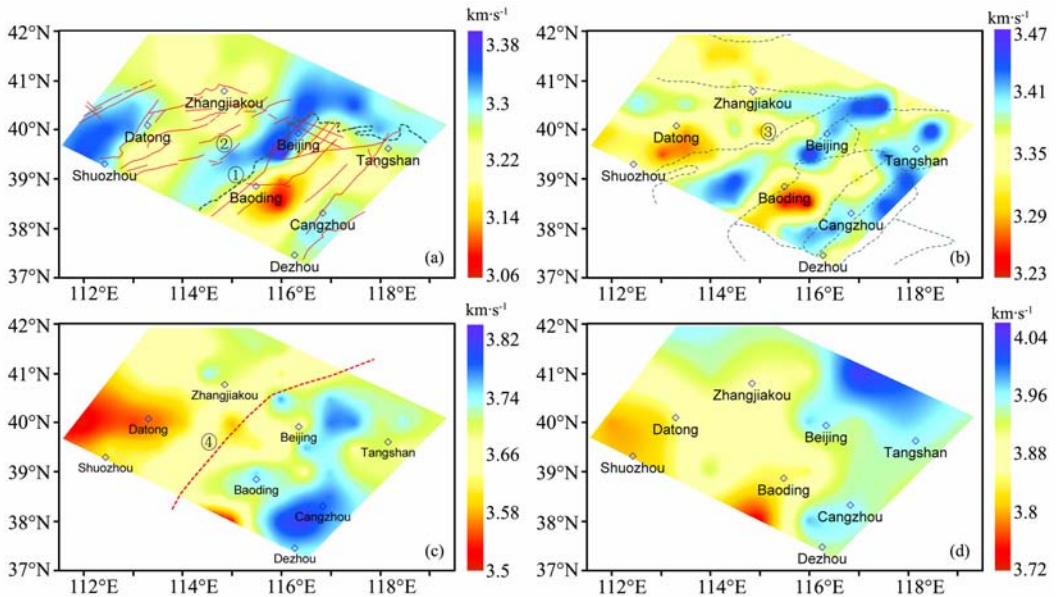


图 7 基阶瑞雷波相速度分布图像

①山区和盆地的地形分界线;②主要活动断裂;③新构造单元界线;④太行山重力梯度带;

(a) 10 s;(b) 15 s;(c) 30 s;(d) 60 s.

Fig. 7 Phase velocity maps of Fundamental Rayleigh wave

①Terrain boundary of mountains and basins in the region;②Major active faults;③New tectonic boundary;

④Taihangshan gravity gradient line;(a) 10 s;(b) 15 s;(c) 30 s;(d) 60 s.

切的关系。另外,区内活动断裂主要分布在低速区以及低速与高速的边界上,表明由于构造活动强烈,地壳较为破碎,从而导致该地区速度较低。

图 7b 是周期为 15 s 的相速度分布图,大致反映了研究区内地壳 15~25 km 深度范围内的 S 波速度分布特征。从整体上看,太行山西北部的山西断陷区呈现大范围的低速,在东南部的华北盆地仍呈低速;与 10 s 的速度分布相似,太行山褶皱带和燕山隆起带附近仍呈现高速,但分布范围又有所缩减,表明相速度的分布仍然受地形控制,不过控制作用已经相对开始减弱。另外,从图上可以看出,我们得到的速度分布与新构造分区^[33]比较一致,比如太行山褶皱带、冀中拗陷,大同一蔚县盆地和沧东隆起等,进一步表明短周期(<15 s)的相速度分布与地表地质构造有较好的对应关系。

已有的研究^[32]表明,华北盆地的地壳厚度在 30~34 km,太行山隆起及其西部的地壳厚度在 35~42 km。图 7c 是周期为 30 s 的相速度分布图像,大致反映的是研究区内下地壳以及壳幔过渡带(30~50 km)深度范围内 S 波速度分布情况。与图 7a、7b 类似,大兴安岭—太行山重力梯度带^[34]两侧,高低速梯度依旧很大,但图 7c 的速度分布又有了很明显的变化:以此重力梯度带为界,东部地区速度高,西部地区速度低,地形的控制作用消失。这符合前人关于地壳厚度变化的研究结果^[32],即地壳越薄,图 7c 上对应位置的相速度就越高。同时也与何正勤等^[25]的研究结果相一致,但不支持房立华^[26]关于华北盆地中下地壳较燕山—太行地区要快的结论。除了地壳厚度的因素外,Li 等^[35]将华北克拉通中、东部块体下地壳的这种 Rayleigh 波速度差异归结为二者下地壳物质组成不同所致,即华北克拉通东部下地壳物质组成较中部块体更为基性。

图 7d 是周期为 60 s 的相速度分布图像,大致反映了上地幔顶部(70~100 km)深度范围内的 S 波速度分布特征。与前面较短周期的图相比,相速度数值的变化范围变小,大部分地区为 3.85~3.95 km/s,仅西部的大同附近呈现低速,区内横向非均匀性大幅减弱,这表明在上地幔顶部,区内速度结构差异没有地壳那么明显。

值得引起注意的是,大同附近地区只有在短周期(10~13 s)时呈现高速,在其他周期(15~60 s)都显示为低速,这一点在前人的面波^[25,26]和体波成像研究^[3]中均有体现,该区晚第三纪火山岩广泛出露,我们推断,大同附近的低速可能与该区新生代的火

山活动有关。此外,周期为 10~60 s 的相速度分布均显示,燕山造山带较周边地区(如华北盆地、太行山地区)更为高速,地震活动性研究显示该区鲜有强震发生,这些都暗示该区的构造破坏作用相对较弱。

4.4 与典型大陆克拉通、裂谷带 Rayleigh 波相速度比较

前人研究^[35~38]表明,华北克拉通中、东部具有不同的壳幔结构。类似地我们以大兴安岭—太行山重力梯度带为界,把研究区域划分为造山带和华北盆地两个部分,亦即西部和东部地区,分属华北克拉通中部和东部块体。通过对同一块体内的不同台站路径间的相速度频散曲线进行平均(横跨两个块体的路径不参加计算,最后得到东部块体有 330 条路径,西部块体有 669 条路径),得到了造山带和华北盆地的平均频散曲线,如图 8 所示。在短周期(10~13 s)段,东、西部地区瑞雷波相速度值很接近,西部要略高;中短周期(20~40 s)东部地区相速度值要稍高出 0.05~0.1;长周期(50~60 s)段,东西部相速度值大致相当。这可能暗示华北克拉通中部块体与东部块体具有明显不同的地壳速度结构,但进入上地幔顶部后,速度结构并无明显差异,本文的层析成像结果与已有研究结果^[35~38]相符合。

与全球大陆平均速度模型 AK135 模型计算的基阶瑞雷波相速度频散曲线相比,短周期段华北地区瑞雷波相速度与其大致相当,中长周期相速度要偏低 0.1~0.2 km/s。与典型大陆克拉通(如加拿大克拉通^[39]和南非 kaapvaal 克拉通^[40])相比,10~60 s 周期内,华北克拉通基阶瑞雷波相速度要明显偏低,最大(60 s 附近)可达 0.3 km/s;与典型大陆裂谷带(如 RioGranderift^[41])相比,周期大于 20 s 后,华

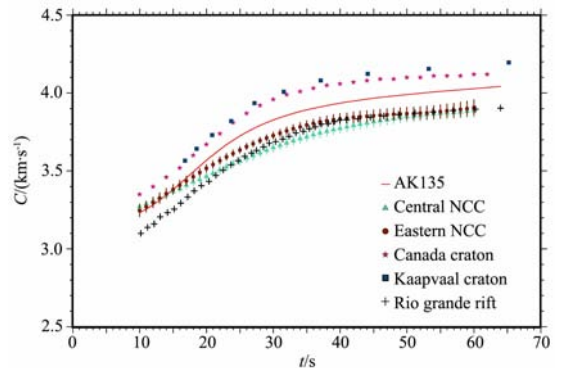


图 8 华北克拉通与典型大陆克拉通基阶 Rayleigh 波相速度频散曲线
Fig. 8 The phase velocity dispersion curves of fundamental Rayleigh wave in the NCC and the other typical continental craton

北克拉通基阶瑞雷波相速度与其大致相当,即大于 20 s 时,华北克拉通频散特征与全球典型裂谷地区相类似,这可能暗示华北克拉通中部、东部地区,高速的古克拉通根已经遭受了侵蚀与破坏.

5 结 论

本文利用中国地震局地球物理研究所和华北地区布设的 190 套宽频带地震计和 8 套甚宽带地震计记录的远震资料,采用连续小波变换频时分析技术提取了双台间的基阶瑞雷波相速度频散,通过层析成像反演得到了华北地区 10~60 s 高分辨率相速度分布图像. 与前人在该区的面波成像研究^[24,25]相比,本文的主要结论如下:

(1)更为丰富的远震资料的应用保证了面波频散路径的均匀和密集覆盖,使我们能够获取高分辨(0.5°×0.5°)的面波相速度分布,并很好地揭示了研究区壳幔相速度分布的不均匀性;

(2)不同周期的基阶 Rayleigh 波相速度分布图较好地反映了不同深度范围的 S 波速度分布特征. 至上地幔顶部(约 100 km 以浅)深度范围内,华北克拉通中、东部地区的 Rayleigh 波相速度分布存在着差异. 短周期(如 10 s)的相速度分布与地表地质构造具有明显的相关性,随着周期的增大(如 15 s),地形控制作用相对减弱. 中周期(如 30 s)的相速度分布暗示华北克拉通中、东部地区中下地壳具有不同的物质组成. 与短周期相比,研究区内长周期(如 60 s)相速度分布的横向非均匀性明显减弱,暗示研究区上地幔顶部速度结构差异没有地壳那么明显;

(3)与全球典型大陆克拉通相比,华北克拉通 10~60 s 的相速度频散明显偏低,当周期大于 20 s 时,其频散特征与全球典型裂谷地区相类似,这暗示华北克拉通中、东部已经遭受了明显的侵蚀与破坏作用.

致 谢 感谢俄罗斯圣彼得堡大学 T. B. Yanovskaya 教授为我们提供了面波层析成像程序,同时也感谢参与华北地震观测台站仪器的勘选、布设、巡台维护和数据预处理的同志. 在本文完成过程中,何正勤研究员给予了无私的帮助和指导,在此向他表示感谢.

参考文献(References)

[1] Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, et al. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower M, Chung S L, Lo C H, Lee T Y eds. Mantle

Dynamics and Plate Interactions in East Asia. *Am. Geophys. Union*, 1998, 107~126

[2] 朱露培,曾融生,刘福田. 京津唐张地区地壳上地幔三维 P 波速度结构. *地球物理学报*, 1990, **30**(3): 267~277
Zhu L P, Zeng R S, Liu F T. Three dimensional P wave velocity structure under the Beijing network area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1990, **30**(3): 267~277

[3] 丁志峰. 近震层析成像的理论及应用[博士论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 1999
Ding Z F. Regional seismic tomography: theory and applications [Ph. D. thesis]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 1999

[4] 于湘伟,陈运泰,王培德. 京津唐地区中上地壳三维 P 波速度结构. *地震学报*, 2003, **25**(1): 1~14
Yu X W, Chen Y T, Wang P D. Three-dimensional P wave velocity structure in Beijing-Tianjin-Tangshan area. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2003, **25**(1): 1~14

[5] Huang J, Zhao D P. Crustal heterogeneity and seismotectonics of the region around Beijing, China. *Tectonics*, 2004, **385**: 159~180

[6] 齐 诚,赵大鹏,陈 颢等. 首都圈地区地壳 P 波和 S 波三维速度结构及其与大地震的关系. *地球物理学报*, 2006, **49**(3): 805~815
Qi C, Zhao D P, Chen Y, et al. 3-D P and S wave velocity structure and their relationship to strong earthquakes in the Chinese capital region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(3): 805~815

[7] Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, et al. High resolution surface wave tomography from ambient noise. *Science*, 2005, **307**: 1615~1618

[8] Yao H, Vander Hilst R D, De Hoop M V. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis — I. Phase velocity maps. *Geophys. J. Int.*, 2006, **166**: 732~744

[9] Yang Y, Ritzwoller M H, Levshin A L, et al. Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe. *Geophys. J. Int.*, 2007, **168**(1): 259~274

[10] Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, et al. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophys. J. Int.*, 2007, **169**: 1239~1260

[11] 朱介寿,曹家敏,蔡学林等. 东亚及西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像. *地球物理学报*, 2002, **45**(5): 646~664
Zhu J S, Cao J M, Cai X L, et al. High resolution surface wave tomography in east Asia and west Pacific Marginal Seas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(5): 646~664

[12] Huang Z, Su W, Peng Y, et al. Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions. *J. Geophys. Res.*, 2003, **103**(B2), ESE4-1: 4~14

[13] Wu F, Levshin A L. Surface wave tomography of East Asia. *Phys. Earth. Planet. Inter.*, 1994, **84**: 59~77

- [14] 宋仲和,陈国英,安昌强等. 中国东部及其相邻海域 S 波三维速度结构. 地球物理学报, 1992, **35**(3):316~329
Song Z H, Chen G Y, An G Q, et al. The 3-D shear wave velocity structure beneath the Eastern China and its adjacent seas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1992, **35**(3):316~329
- [15] 何正勤,丁志峰,叶太兰等. 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. 地震学报, 2001, **24**(6):596~603
He Z Q, Ding Z F, Ye T L, et al. Surface wave tomography of the crust and upper mantle of Chinese Mainland. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2001, **24**(6):596~603
- [16] 陈国英,宋仲和,安昌强等. 中国北部及其邻区地壳上地幔三维速度结构. 地球物理学报, 1995, **38**(3):321~327
Chen G Y, Song Z H, An G Q, et al. 3D S-wave velocity structure of crust and upper mantle in the northern China and its adjacent areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1995, **38**(3):321~327
- [17] 滕吉文,张中杰,胡家富等. 中国东南大陆及陆缘地带的瑞利波频散与剪切波三维速度结构. 地球物理学报, 2001, **44**(5):663~677
Teng J W, Zhang Z J, Hu J F, et al. The Rayleigh wave dispersion and three dimensional velocity structure in continent and its margin of southeast China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(5):663~677
- [18] 朱良保,许庆,陈晓非. 中国大陆及其邻近海域的 Rayleigh 波群速度分布. 地球物理学报, 2002, **45**(4):475~482
Zhu L B, Xu Q, Chen X F. Group velocity of Rayleigh wave in Chinese Continent and its adjacent seas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(4):475~482
- [19] Huang Z X, Li H Y, Zheng Y J, et al. The lithosphere of North China Craton from surface wave tomography. *Earth. Planetary. Sci. Letters*, 2009, **288**(1-2):164~173
- [20] An M J, Feng M, Zhao Y. Destruction of lithosphere within the north China craton inferred from surface wave tomography. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2009, **10**, Q08016, doi:10.1029/2009GC002562
- [21] Yao H J, Xu G M, Zhu L P, et al. Mantle structure from interstation Rayleigh wave dispersion and its tectonic implication in western China and neighboring regions. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2005, **148**:39~54
- [22] 曾融生,宋子安. 我国境内瑞利波的相速度. 地球物理学报, 1963, **12**(2):148~165
Zeng R S, Song Z A. Phase velocity of Rayleigh waves in China. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 1963, **12**(2):148~165
- [23] 徐果明,李光品,王善恩等. 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. 地球物理学报, 2000, **43**(3):366~375
Xu G M, Li G P, Wang S E, et al. The 3D structure of shear waves in the crust and mantle of east continental China inverted by Rayleigh wave data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, **43**(3):366~375
- [24] 易桂喜,姚华建,朱介寿等. 中国大陆及邻区 Rayleigh 面波相速度分布特征. 地球物理学报, 2008, **51**(2):402~411
Yi G X, Yao H J, Zhu J S, et al. Rayleigh-wave phase velocity distribution in China continent and its adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(2):402~411
- [25] 何正勤,叶太兰,丁志峰. 华北东北部的面波相速度层析成像研究. 地球物理学报, 2009, **52**(5):1233~1242
He Z Q, Ye T L, Ding Z F. Surface wave tomography for the phase velocity in the northeastern part of North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(5):1233~1242
- [26] 房立华. 华北地区瑞利波噪声层析成像研究[博士论文]. 北京:中国地震局地球物理研究所, 2009
Fang L H. Rayleigh wave tomography in North-China from ambient seismic noise [Ph. D. thesis]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2009
- [27] 汪一鹏,邓起东,朱世龙. 华北地区岩石圈动力学特征. 马杏垣主编. 中国岩石动力学地图集. 北京:中国地图出版社, 1989
Wang Y P, Deng Q D, Zhu S L. Lithospheric dynamics of North China. In: Ma X Y ed. Lithospheric Dynamics Atlas of China (in Chinese). Beijing: China Cartographic Publishing House, 1989
- [28] Wu Q J, Zheng X F, Pan J T, et al. Measurement of interstation phase velocity by wavelet transformation. *Acta Seismologica Sinica*, 2009, **22**(4):425~429
- [29] 姚华建,徐果明,肖翔等. 基于图像分析的双台面波相速度频散曲线快速提取方法. 地震地磁观测与研究, 2004, **25**(1):1~8
Yao H J, Xu G M, Xiao X, et al. A quick tracing method based on image analysis technique for the determination of dual-stations phase velocities dispersion curve of surface wave. *Seismol. Geomagn. Observ. Res.* (in Chinese), 2004, **25**(1):1~8
- [30] Ditmar P G, Yanovskaya T B. Generalization of Backus-Gilbert method for estimation of lateral variations of surface wave velocities. *Phys. Solid Earth. Izvestia. Acad. Sci. U. S. S. R.* 1987, **3**(6):470~477
- [31] Yanovskaya T B, Ditmar P G. Smoothness criteria in surface wave tomography. *Geophys. J. Int.*, 1990, **102**:63~72
- [32] 嘉世旭,张先康. 华北不同构造块体地壳结构及其对比研究. 地球物理学报, 2005, **48**(3):611~620
Jia S X, Zhang X K. Crustal structure and comparison of different tectonic blocks in North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(3):611~620
- [33] 尤惠川. 北京国航训练基地工程场地地震安全性评估报告. 北京:中国地震局地球物理研究所, 2007
You H C. The appraisal report of project field seismic security in the training base of Air China in Beijing. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2007
- [34] 冯锐,郑书真,黄桂芳等. 华北地区重力场与沉积层构造. 地球物理学报, 1989, **32**(4):385~398
Feng R, Zheng S Z, Huang G F, et al. Gravity field and

- structure of the sedimentary layer in North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1989, **32**(4):385~398
- [35] Li Y H, Wu Q J, Zhang R Q, et al. The lithospheric thinning of the North China Craton inferred from Rayleigh waves inversion. *Geophys. J. Int.*, 2009, **177**(3):1334~1342
- [36] 左 愚, 刘立言, 李跃秋. 中国布格重力异常. 见: 马丽芳主编, 中国地质图集. 北京: 地质出版社. 2002. 61~64
Zuo Y, Liu L Y, Li Y Q. Burger gravity abnormal in China. In: Ma L F ed. *Geology Atlas of China* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2002. 61~64
- [37] 邱瑞照, 邓晋福, 周 肃等. 华北地区岩石圈类型: 地质与地球物理证据. *中国科学(D)*, 2004, **34**(8):698~711
Qiu R Z, Deng J F, Zhou S, et al. The lithospheric type in the North China; the evidence of geology and geophysic. *Chinese Sci. (D)*, 2004, **34**(8):698~711
- [38] Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton; lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. *Precamb. Res.*, 2001, **107**:45~73
- [39] Brune J N, Dorman J. Seismic waves and earth structure in the Canadian Shield. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1963, **53**(1):167~210
- [40] Larson A M, Snoke J A, James D E. S-wave velocity structure, mantle xenoliths, and the upper mantle beneath the Kaapvaal Craton. *Geophys. J. Int.*, 2006, **162**:171~186
- [41] Keller G R, Braile L W, Schlue J W. Regional crustal structure of the Rio Grande rift from surface wave dispersion measurements. In: Riecher R E ed. *Rio Grande Rift; Tectonics and Magmatism. Am. Geophys. Union, Spec. Pub.*, 1979, **63**:341~355

(本文编辑 胡素芳)