

# 中国大陆 Rayleigh 面波衰减特征研究

程先琼 朱介寿 蔡学林

(成都理工大学地球物理学院, 四川 成都 610059)

**提要:**搜集中国大陆 58 个数字地震台站 6312 个长周期波形记录,从中挑选出符合条件的 442 对经过中国大陆的双台路径记录,采用相匹配滤波和频率域维纳滤波相结合的方法,计算出双台之间的混合路径衰减系数。对中国大陆进行网格划分,通过网格化反演得到中国大陆每个网格单元的纯路径衰减系数。结果显示:短周期 Rayleigh 面波总体表现为东部(中国东北、华北、华南) Rayleigh 面波衰减小,西北部(以青藏高原为中心) Rayleigh 面波衰减大,反映了该深度东部地区已进入上地幔,西部仍处于下地壳; Rayleigh 面波在中周期衰减特征是呈 SN 向展布,将中国大陆分成以鄂尔多斯—四川盆地为中部的三分图像,衰减小的中西部岩石圈稳定区、衰减大的青藏高原岩石圈汇聚增厚区和东部岩石圈拉张减薄区;在长周期 Rayleigh 面波衰减特征是中国大陆中西部衰减较小,为印度大陆俯冲到该深度所致,而在东部衰减较大,为西太平洋边缘弧后盆地的地幔浅部上升热流,构成上地幔中的热室而使东部面波衰减较大。Rayleigh 面波衰减与地壳上地幔温度关系显示:中国大陆 Rayleigh 波衰减与大地热流分布有一定相关性——研究区域内热流值较高的青藏地块及邻区表现为 Rayleigh 波衰减大,热流值较低的中国东部表现为 Rayleigh 波整体衰减小;中国大陆地震波衰减特性与强震分布关系密切,在大约以 107°E 为界的中国大陆西部地震明显强于中国东部,与此关系密切的是,在约 107°E 为界大陆西部(以青藏高原为中心)地震波衰减大,以东的大陆地区衰减明显减小。

**关键词:** Rayleigh 面波; 衰减系数; 中国大陆; 双台法

**中图分类号:** P631.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2011)02-0251-12

## 1 引言

大陆是记录地球 45 亿年动力学历史的博物馆。近代大陆岩石圈流变学、地震反射剖面及大陆科学钻探的成果揭示,大陆岩石圈与简单的大洋刚性块体不同,是一个不均一、不连续、具多层结构和复杂流变学性质的复合体,因此大陆的流变学结构和演化过程比大洋的更加复杂<sup>[1]</sup>。中国大陆位于欧亚板块、印度—澳大利亚板块、太平洋板块和菲律宾板块的交汇地带,受特提斯、古亚洲和太平洋构造体系的制约,具有复杂的地体构架和特殊的岩石圈结构<sup>[1-13]</sup>。

地震波不仅可以提供地球内部构造信息,而且还能够提供地球内部物质的成分、晶体结构和物态、温度、物质流动等重要信息,因此成为研究地球内部

结构及其动力系统最重要的手段之一<sup>[14-16]</sup>。在对中国及邻近区域的地壳上地幔三维结构研究中,人们比较注重地壳上地幔三维速度结构的研究<sup>[17-24]</sup>。这是因为:一方面用速度结构可以解释地球内部三维结构某些方面的特征;另一方面对计算速度参数而言,它牵涉的因素相对比较少。然而,速度参数只是利用了地震波的运动学信息,而忽略了地震波动力学的特征信息<sup>[26-28]</sup>。因此,只用三维速度分布解释地球内部结构是不全面的。

地震波的衰减比弹性波速对地球结构和组成的变化更敏感,相对弹性波速而言,衰减对温度非常敏感,地震波的衰减对于温度的横向变化是一个更好的指示器,至少在地幔的某些区域,可以利用地震波衰减把化学成分均匀性同热能区分出来。在上地幔

收稿日期:2010-09-20;改回日期:2010-12-10

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40839969)、国家自然科学基金项目(41074062、40474032、40974024)、地球探测与信息技术教育部重点实验室联合资助。

作者简介:程先琼,女,1974年生,副教授,从事地震波层析成像、地球动力学等方面的研究与教学工作;E-mail:chxq@cdu.edu.cn。

中,地震波速度的横向变化不过百分之几,而地震波衰减的横向变化可能达到 50%~100%,甚至更大<sup>[16]</sup>。因此衰减系数是反映地震波在传播过程中能量的衰减,是传播介质的非弹性性质反映,是温度和相变所致晶体结构变化的一个敏感指标,在了解地球内部介质的非弹性性质和推断其热力学状态上均有重要的应用价值<sup>[29-40]</sup>。

利用面波的频散和衰减信息是研究地球内部结构和构造的有效方法,用面波来测定衰减比较有利,因为面波受地壳局部的非均匀性的影响较小,一定能量束可以沿着地表射线路径采样,几何扩散系数可以更准确地估算<sup>[16]</sup>。研究地壳上地幔中地震波衰减结构的纵横向变化,将有助于对地球内部构造、动力学特征、壳幔界面及热结构和粘滞结构等的进一步认识<sup>[16,29,35,40]</sup>。本文利用 Rayleigh 面波资料,采用改进的双台法来研究中国大陆区域地壳上地幔 Rayleigh 面波衰减系数的分布。该方法的优点是扣除了确定地震震中、发射时刻和震源辐射的影响,避免了计算震源参数的困难,提高计算精度。

## 2 资料收集及处理

本文面波频散和衰减计算所采用的地震记录主

要来自中国数字地震台网(CDSN)、全球数字地震台网(GDSN)、全球数字标准地震台网(DWSSN),由 IRIS 和国内收集的记录组成。笔者收集了 1982—2007 年间 20°E~180°E、20°N~80°N 范围的 8200 多个地震事件,这些地震事件震级绝大部分都在 5.0~7.0,震源深度小于 100 km。并收集了约 13000 条 Rayleigh 波记录,从 8200 多个地震事件中挑选了 560 个地震事件 6312 个 Rayleigh 波记录,进行群速度频散分析,建立中国大陆地区群速度频散结构。同时测定的每个面波记录的群速度数据也将为衰减测定的数据去噪预处理奠定基础。从 6312 个 Rayleigh 面波频散测定的原始记录中进行双台法地震记录挑选,条件是对于一次地震,两个台站位于同一大圆路径上,射线方位角偏差不超过 4°。据地震记录的质量和方位角偏差严格缩小的要求,以及仪器参数的配套情况剔除记录,对最后剩下 442 对记录(图 1)进行最后的衰减分析的数据预处理过程。从图双台路径分布来看,中国大陆中东部的射线分布密集,比西部好。因此可以推断,中国大陆中东部分辨率高。另外,分辨率必定也会受到反演方法的影响。

实际观测到的面波记录是系列振型叠加的结果。当震中距较小时,各种振型叠加在一起,不易辨

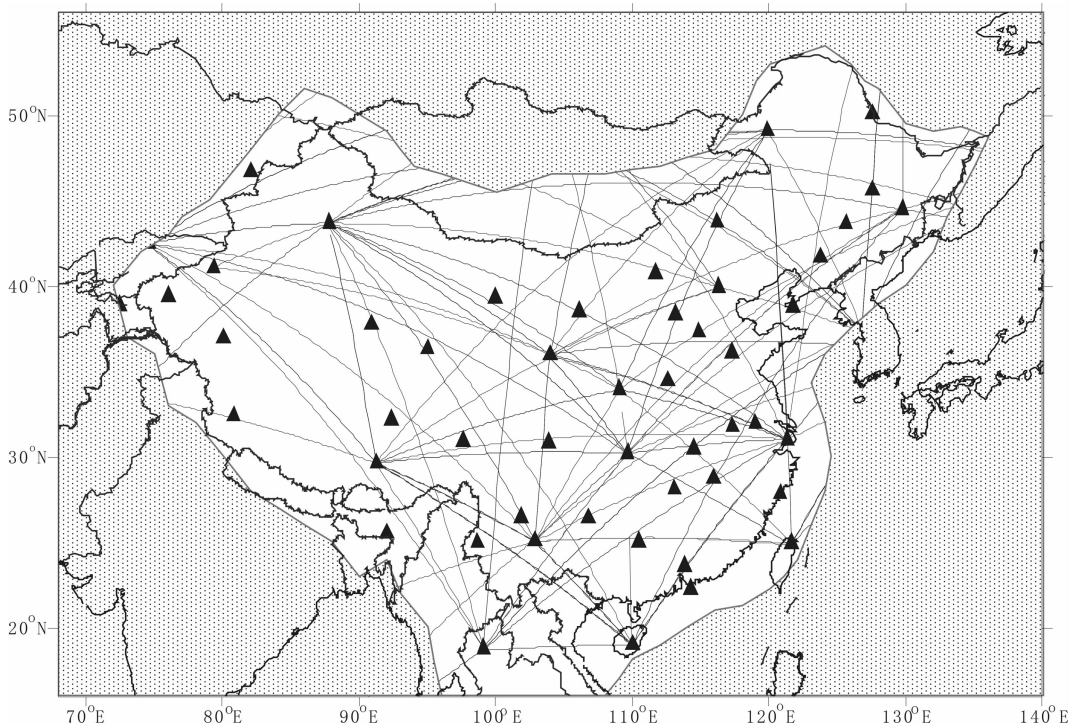


图 1 双台路径分布图

Fig.1 Distribution of two-station path

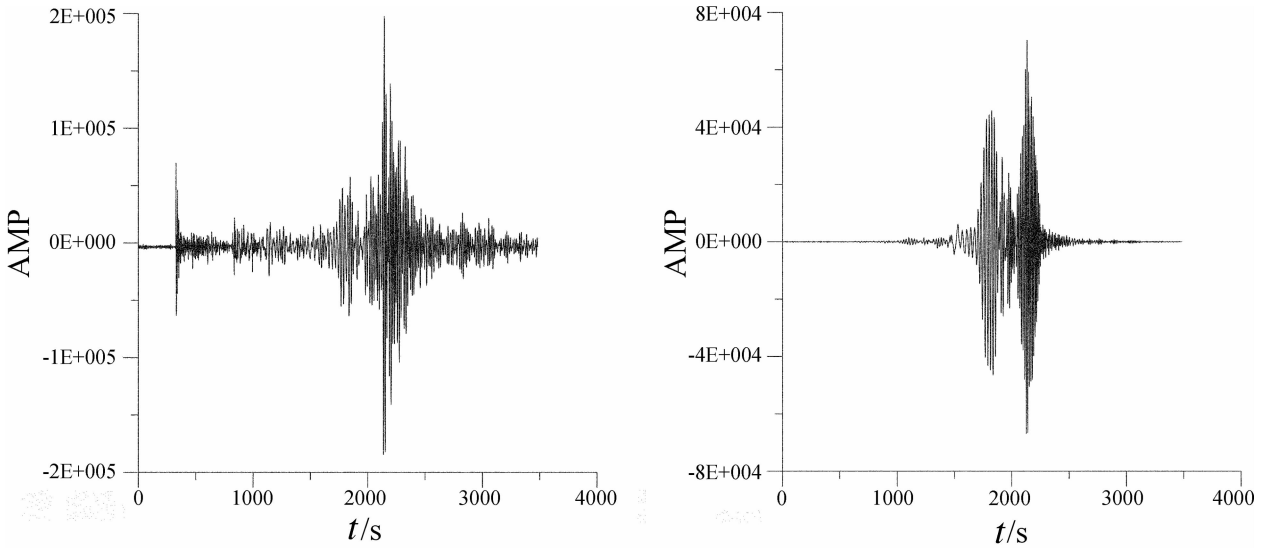


图 2 yss 台的原始地震记录与相匹配滤波后的地震记录比较  
Fig.2 Comparison between initial seismograms and phase-matched seismograms for yss

认;只有当震中距足够大时,各种振型之间的速度差可使得基阶振型与高阶振型信号在时间域内分离开。相匹配滤波<sup>[6,30]</sup>通过消除所要分离的振型信号的相位,在时间域内,压缩所感兴趣的特定振型,产生能量关于零延迟对称的零相位信号。例如,图 2 所示为对 2005 年 6 月 12 日 yss 台站记录的原始地震面波记录进行相匹配滤波后的波形图,经过相匹配滤波以后,分离出地震记录基阶信号。从处理的结果来看,高阶面波已经被滤掉了,比较完整地分离出了基阶面波振型信号。

### 3 Rayleigh 面波衰减系数计算及反演

首先利用多重滤波技术(MFT)计算出每条射线的混合路径群速度,图 3 所示为 yss 台实测面波频散图。运用相匹配滤波方法<sup>[34]</sup>分离出面波信号中的基阶面波,对双台基阶面波信号用改进的双台法—频率域维纳滤波的方法<sup>[31]</sup>计算出两台站之间的衰减系数,然后再通过网格化反演,得到每个单元格的衰减系数。

#### 3.1 Rayleigh 面波衰减系数的计算

双台法面波衰减系数计算中,台间衰减系数的计算方法如下:

$$\gamma = \ln \left( \frac{A_2}{A_1} \sqrt{\frac{\sin \Delta_2}{\sin \Delta_1}} \right) / (\Delta_2 - \Delta_1) \quad (1)$$

其中  $A_1$  和  $A_2$  是 2 个台站接收信号的傅氏谱,

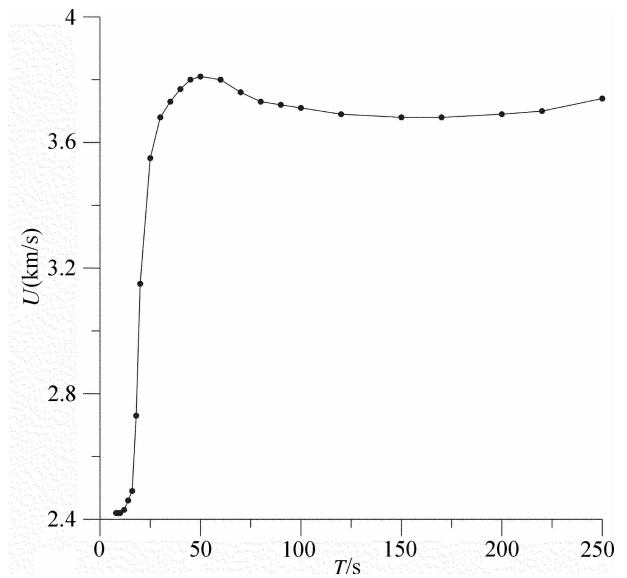


图 3 MFT 法测得的 yss 台群速度  
Fig.3 Group velocity attained by MFT for yss

$\Delta_1$  和  $\Delta_2$  是震中距。直接用双台谱比法,会出现很多负的、难以解释的衰减系数,本文采用频率域维纳滤波的方法<sup>[28]</sup>解决这一问题。

双台法中,台间格林函数谱  $H(f)$  表示为:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} e^{i(\Phi_x - \Phi_y)} \quad (2)$$

式中,  $X(f)$  和  $Y(f)$  是 2 个台站接受基阶面波信号的傅氏谱,  $\Phi_x$  和  $\Phi_y$  分别是  $X(f)$  和  $Y(f)$  的相位谱。在



时间域维纳滤波中,公式(2)以自相关函数和互相关函数的形式表示,在时间域完成反褶积。如果公式(2)被转化到频率域,反褶积就变得相当简单。在时间域反褶积,对自相关和互相关函数只考虑  $m$  个点,它相当于对两个完全相关函数( $n+m$  个点)加延迟为  $m$  的矩形窗,因为在时间域加窗导致在频率域的光滑, $m$  个点长度的相关函数的谱是光滑的谱,代替了原来的  $n+m$  个点长度的相关函数傅里叶变换的谱,因此,公式(2)傅氏变换为:

$$\overline{G}(f) = \overline{H}(f)\overline{R}(f)$$

$\overline{G}(f)$ 、 $\overline{H}(f)$ 、 $\overline{R}(f)$  分别是长度为  $m$  个点的  $g_t$ 、 $h_t$  和  $r_t$  的傅氏谱。则反褶积直接为:

$$\overline{H}(f) = \frac{\overline{G}(f)}{\overline{R}(f)} \tag{3}$$

因此,频率域的格林函数实际就是光滑的互相关谱与自相关谱的比率。它避免了不稳定和在时间域维纳滤波必需阻尼校正的处理。图4所示为计算的 sse 与 lzh 台的台间面波衰减系数,可以看出在短周期 Rayleigh 面波衰减较大,变化剧烈,而 Rayleigh 面波在中长周期衰减减小,变化趋缓。

### 3.2 Rayleigh 面波衰减系数的反演<sup>[16]</sup>

用双台法计算台间衰减系数的射线路径可以看作由第一个接收台站到第二个接收台站的大圆路径。位于真震源最近的台站位置假定是震源位置,则第二个接收台站的位置就是假定的接收台站位置。然后按下述步骤进行计算,得到研究区域各块的纯路径衰减数据。

采用网格化纯路径衰减的反演方法得到各网格的纯衰减(频率域)数据。基于“纯路径”衰减数据,根据“射线路径”分布覆盖情况,首先对反演区域进行  $n^\circ \times n^\circ$  网格划分,把研究区域划分成  $N$  个网格单元;然后求取台间的大圆路径;对某个周期  $T$ ,根据第  $j$  个网格所假定的纯路径衰减  $\Gamma_j(T)$ ,计算出第  $i$  条“射线路径”(  $i=1, 2, \dots, m$ ,  $m$  为反演区域内的总的“射线路径”条数)理论衰减数据  $\gamma_i(T)$ 。即:

$$\gamma_i(T) = \sum_{j=1}^m \frac{d_{ij}}{D_i} \gamma_j(T)$$

式中,  $D_i$  是第  $i$  条路径的总长度,  $d_{ij}$  是第  $i$  条“射线路径”在地  $j$  个网格单元内的长度。这里要求网格

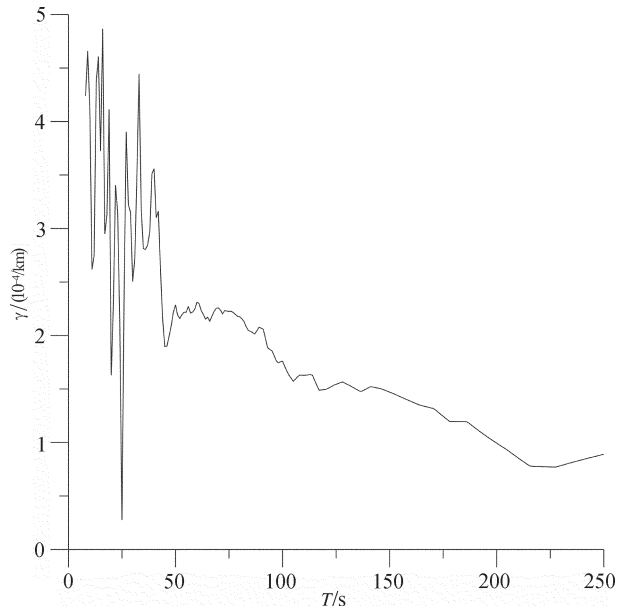


图4 sse 台与 lzh 台台间衰减系数

Fig.4 Attenuation coefficients of Rayleigh wave between station sse and station lzh

单元内的平均衰减系数  $\Gamma_i(T)$ ,而  $\Gamma_j(T)$  与实际测出的衰减系数  $\gamma_i(T)$  的关系与上式中  $\gamma_j(T)$  与  $\gamma_i(T)$  的关系相同。则第  $i$  条“射线”路径衰减系数校正项为:

$$\Gamma_j(T) - \gamma_i(T) = \sum_{j=1}^m \frac{d_{ij}}{D_i} (\Gamma_j(T) - \gamma_i(T))$$

写成矩阵形式如下:

$$[Y]_{m \times 1} = [A]_{m \times n} \cdot [X]_{n \times 1}$$

因此在双台法地震面波衰减层析成像中方程就建立起来了。由于采用 LSQR 进行反演,而该方法可以不需要初始模型,所以,上述矩阵方程中  $A_{m \times n}$  是每条衰减射线穿过每个单元的长度矩阵;  $X_n$  是每个单元格的衰减系数均值矩阵;  $Y_m$  是观测衰减系数矩阵。

## 4 结果与讨论

虽然产生地震波衰减横向变化显著的机制还需进一步探讨,观测结果表明在裂隙比较发育和介质比较破碎的构造活跃区地震波衰减明显偏高<sup>[40]</sup>,因此,一般认为介质裂隙和充填流体的程度与其密切相关。近年来有关地震波衰减的物理机制的初步研究表明:对于地壳介质,造成地震波衰减的主要原因是地壳内存在大量裂隙,裂纹中饱含水或部分含水,地震波传播时引起裂隙中的流体运动,从而造成地

震波的衰减;对于上地幔,扩散控制的位错阻尼机制可能是造成地幔地震波衰减的一个重要原因,而上地幔软流层部分熔融的存在也是造成地震波衰减不可忽视的原因<sup>[45]</sup>。

#### 4.1 中国大陆地区 Rayleigh 面波衰减平面分布特征

本次研究反演计算了中国大陆地区 Rayleigh 波 8~250 s 共 24 个周期的衰减系数分布,几个主要的周期衰减系数分布图像见图 5。不同周期的衰减系数图像反映的是不同深度范围内面波衰减的横向变化情况。反演结果显示,中国大陆西部(大约 104°E 以西)地区的面波衰减特征不同于中国大陆东部,这与速度研究的结果大体一致,但局部地方有差异。本文研究结果与刘光鼎<sup>[46]</sup>通过地球物理观测资料对中国大陆研究的结果相似,即中国大陆在不同深度上的动力学作用以现代磁方位为准,基本上呈南北向趋势,中国布格重力异常图和重力水平梯度图则明确显示出贺兰山—龙门山、大兴安岭—太行山—武陵山两条重力梯度带,它们呈 SN 向展布,将中国大陆分成以鄂尔多斯—四川为中部的三分图像。

较短周期(20~35 s)的 Rayleigh 面波衰减主要对 20~50 km 深度范围内的介质特性最为敏感,反映地壳(青藏高原)及地壳和上地幔顶部(青藏高原以外区域)的介质衰减分布特征。其分布图受裂隙发育和介质破碎程度的构造活跃性影响。总体表现为东部(中国东北、华北、华南) Rayleigh 面波衰减小,西北部(以青藏高原为中心) Rayleigh 面波衰减大,这与用 Rayleigh 面波相速度反演该区域速度结构的结果一致<sup>[24]</sup>,反映在该深度东部地区已进入上地幔,西部仍处于下地壳。以  $T=35$  s 周期的图像为例(图 5-a),可以看出,西北部地区以大面积高衰减为特征,由拉萨地块和羌塘地块组成的青藏地块及其东缘的松潘—甘孜地块与塔里木盆地、准噶尔盆地南部形成一个巨大的高衰减区域,该高衰减甚至向东延伸至扬子地块的西部边缘地带。

中国东部(除了东海附近) Rayleigh 面波衰减明显低于西部,低衰减区呈北北东向分布,其中,华南地块及相邻海域低衰减异常最为突出,四川盆地、扬子地块、渤海湾至松辽盆地以及邻区的日本海、蒙古东部低衰减特征明显;东海及边邻地区呈高衰减趋势,且随周期增大,该高衰减区域范围扩大;而内蒙中西部包括鄂尔多斯盆地的西北部分呈现高衰减异常,但随着周期的增大,该高衰减面积缩小,鄂尔多

斯盆地逐渐转变为低衰减区,这些特点与 Yang X, et al.<sup>[48]</sup>研究结果一致。

40~50 s 周期的 Rayleigh 面波衰减主要对 40~80 km 深度范围内介质性质最为敏感,在该周期范围内研究区内最突出的高衰减异常仍然在中国大陆西北部和东南沿海。至 50 s 周期(图 5-b),青藏块体高衰减异常区已收缩至块体的西北地区;其东缘的松潘—甘孜地块的高衰减异常区也已向该块体的西北部收缩;塔里木块体西部、天山山系仍然是高衰减。东部的 2 个特征明显的低衰减区域:一是以四川盆地为核心的上扬子地块、松潘—甘孜地块东南、秦岭—大别山系、鄂尔多斯盆地低衰减区域;一是日本海—渤海湾的低衰减区域。

55~75 s 周期的 Rayleigh 面波衰减受上地幔顶部(约至 120 km)物质的结构影响较大。在该周期范围内研究区内最突出的高衰减异常仍然在中国大陆西北部,印支地块北部及相邻海域、东海、东北吉林等地区开始出现明显的局部高衰减异常体,表明这些地质单元的岩石圈根部已深入上地幔软流圈。而低衰减异常区仅存于包括四川盆地在内的扬子地块、鄂尔多斯盆地、华南地块部分地区。安美建等<sup>[38]</sup>研究认为中国大陆在 100 km 深度的上地幔温度呈现明显的东高西低分布,东部和东南部在 100 km 不再是岩石圈上地幔了。西部主体温度在 1100~1300°C,低于 1300°C 绝热等温温度,该地区是岩石圈上地幔。 $T=70$  s (约 120 km)(图 5-c)中国大陆衰减特征是中国东部日本海及邻域、中部的华北地块、上扬子地块以及西部的天山山系及边邻地区为低衰减区域,而在华北的松辽盆地、东南部的东南沿海山系及边邻地区以及西部的准格尔地块、青藏地块西部为大范围的高衰减区域。

而至 80~90 s 周期(图 5-d),西部高衰减异常区存于青藏块体的中东部地区,其东缘(松潘—甘孜地块)高衰减特征增强;东部的华北地块、东海、东北吉林与相邻的日本海以及蒙古东部低衰减异常也越来越突出。

100~120 s 周期的 Rayleigh 面波衰减主要受上地幔 140~220 km 深度范围内的物质结构的影响,其分布(图 5-e,图 5-f)已经显示出,尽管青藏地块中部(中心位于羌塘地块)衰减仍然大于相邻的喜马拉雅冲断带和塔里木盆地,其高衰减特征随周期的增大不断减弱。喜马拉雅冲断带、塔里木盆地、柴达



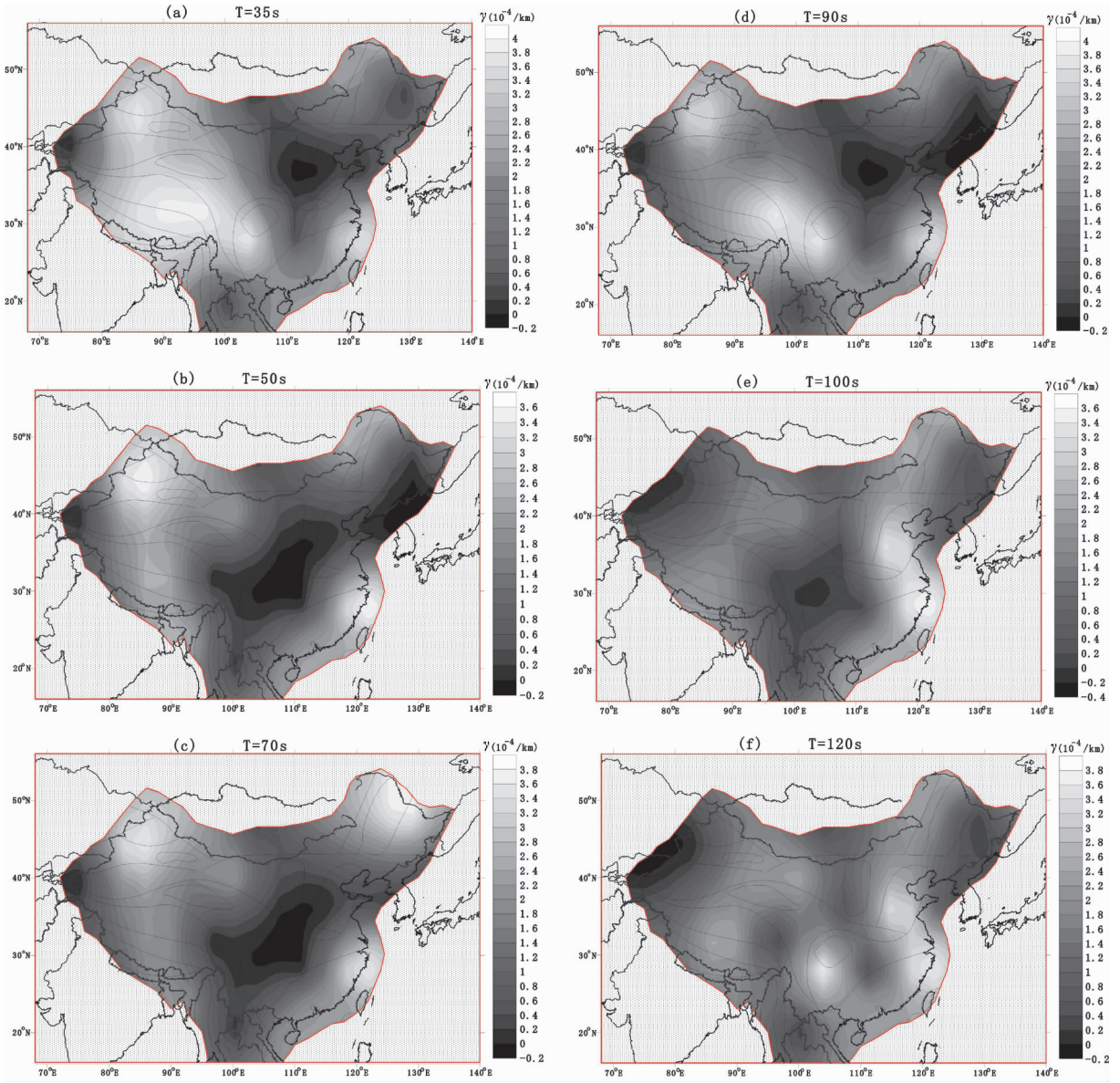


图 5 中国大陆 Rayleigh 面波在各个周期衰减系数分布图  
 Fig.5 Distribution of attenuation coefficients of Rayleigh wave in different periods

木盆地低衰减特征依然明显。而东部地区随着周期的增大逐渐转变为大范围的高衰减分布，反映东部地区上地幔岩石圈较薄，软流圈发育；但包括四川盆地在内的上扬子地块、鄂尔多斯盆地中南部仍表现为低衰减异常，反映这些区域存在较厚的稳定克拉通岩石圈。中国大陆东部地区及边缘海沿大兴安岭、太行山、天目山、东南沿海山系呈高衰减条带，这一条带位置与中国东部重力梯级相带大致吻合，表明这些地区在该深度范围内(约 120 km)大多进入上

地幔软流圈。与速度反演结果不太一致的是，在松辽盆地东部—日本海附近面波衰减较小。

4.2 中国大陆地区 Rayleigh 面波衰减剖面分布特征

由沿纬向的 Rayleigh 波衰减系数剖面图(图 6)可以清楚看到由地震波速度划分的岩石圈及软流圈的空间分布。

沿北纬 28°剖面(图 6-a):通过青藏地块南部、华南地块的上扬子地块和华夏地块以及东海，青藏地块南部为在整个周期范围表现为高衰减，其中的

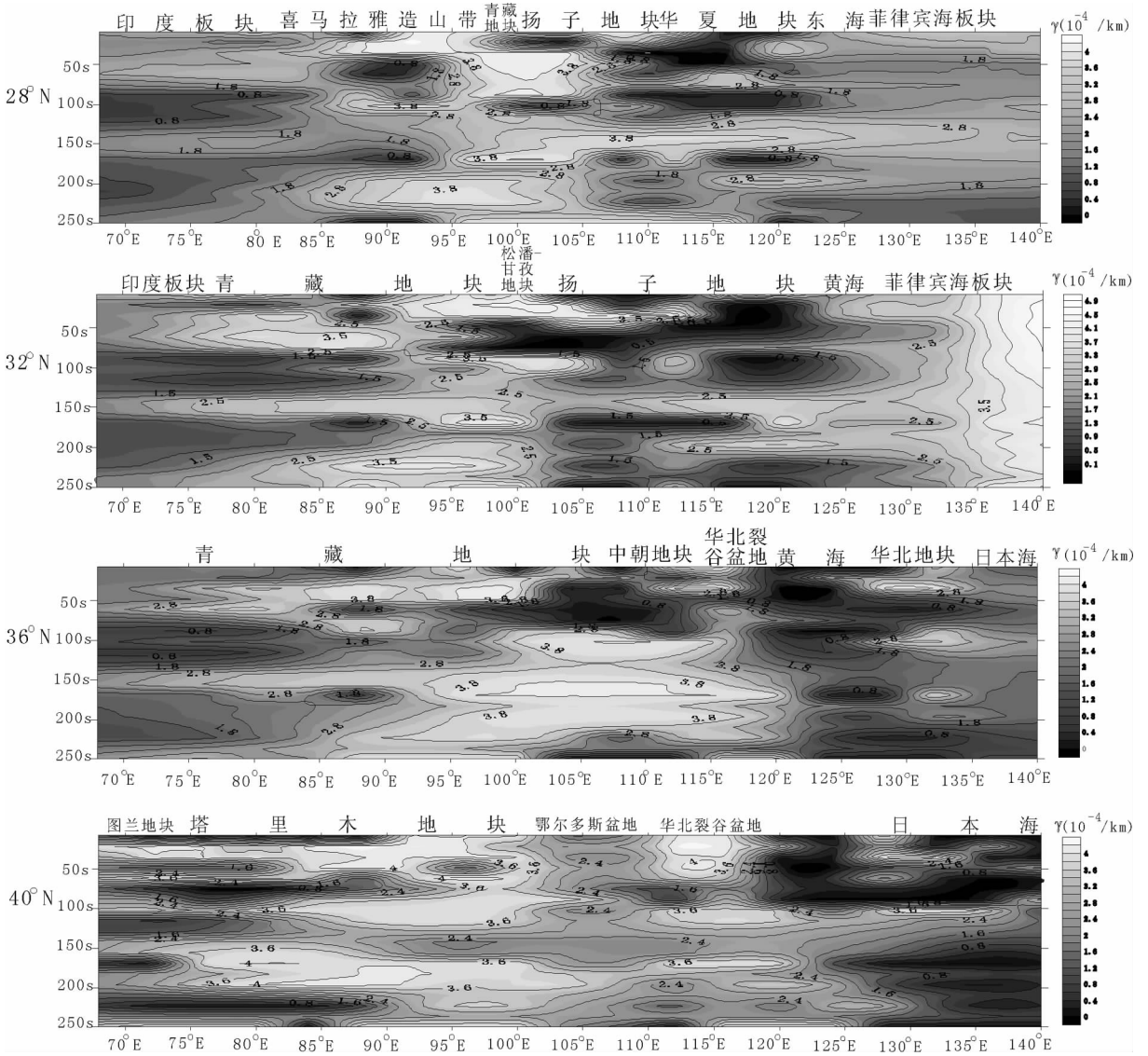


图 6 中国大陆 Rayleigh 面波衰减系数剖面分布图

Fig.6 Distribution of attenuation coefficients of Rayleigh wave at different latitudes

喜马拉雅造山带在整个周期范围衰减特征变化比较大,华夏地块在 150~180 s 的中周期为高衰减,其他短周期和长周期范围表现为低衰减的特征。

沿北纬 32°剖面(图 6-b):通过青藏地块中部、下扬子地块北部,在该剖面上青藏地块衰减特征比较复杂,其中的喜马拉雅造山带在约 70 s 以前衰减较大,在 70~150 s 衰减变小,其东部的松潘甘孜地块除了 50~100 s 衰减较小外,其他周期衰减都较大;下扬子地块整体上衰减比较小。

沿北纬 36°剖面(图 6-c):通过青藏地块北部的羌塘地块与巴颜喀拉地块边界、松潘甘孜地块,华北

地块的鄂尔多斯盆地南部、华北裂谷盆地以及黄海,在该剖面上羌塘地块与巴颜喀拉地块边界整体表现为低衰减特征;松潘—甘孜地块在 100 s 以前的短周期表现为低衰减特征,而在 100 s 以后的中长周期表现为高衰减特征;华北裂谷盆地为高衰减,尤其是黄海在该剖面上在整个周期范围表现为低衰减特征。

沿北纬 40°剖面(图 6-d):通过塔里木地块、华北地块,其中塔里木地块在短周期表现为高衰减,长周期表现为低衰减;其南部的柴达木盆地从长周期到短周期,衰减都比较大;华北地块鄂尔多斯盆地表现为低衰减特征、华北裂谷表现为高衰减。



综上所述,结合蔡学林<sup>[4]</sup>对中国大陆及邻区岩石圈地壳三维结构分类及分析,中国大陆克拉通型地台(上扬子地块、塔里木地块、鄂尔多斯地块) Rayleigh 面波衰减较小,增厚型地壳(青藏地块) Rayleigh 面波衰减较大,在受地壳断块式伸展变形与上地幔物质上涌的联合作用下形成的盆岭式减薄型地壳结构(华北地块、下扬子地块)在短周期 Rayleigh 面波衰减较小,在长周期 Rayleigh 面波衰减较大。铲形式薄型地壳结构(中扬子地块、华夏地块)系克拉通型地块经中生代以来地壳伸展变形逐渐减薄形成的,在整个周期范围 Rayleigh 面波衰减较大。

#### 4.3 中国大陆地区 Rayleigh 面波衰减与大地热流及震中分布关系

地震波衰减可能还反映了其所在区域的介质物性,与温度、压力等参数同样密切相关。而它与温度的关系则主要表现为地震波衰减与区域大地热流分布的联系。地震波衰减与温度的关系则主要表现为衰减系数与区域大地热流分布的联系。大地热流是地球内部热状态和热结构在地表的最直接显示,它能直接反映岩石层的热演化史和近代构造活动<sup>[44,50,53]</sup>。根据胡圣

标等<sup>[5]</sup>发表的中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版),本文给出了研究区域内(68°E~140°E, 16°N~56°N)的 169 个热流的数据(图 7)和  $M_s \geq 6.0$  的震中分布图。比较图 7 和短周期( $T=35$  s)的 Rayleigh 波衰减系数分布(图 5-a)可以看出中国大陆 Rayleigh 波衰减与大地热流分布有一定的相关性:研究区域内热流值较高的青藏地块及邻区表现为 Rayleigh 波衰减大,热流值较低的中国东部表现为 Rayleigh 波整体衰减小。说明面波衰减系数与现今构造活动明显相关,因此 Rayleigh 波衰减特性可以反应板块构造活动性。对比图 7 和图 5-a,中国大陆地震波衰减特性强震分布关系密切,在大约以 107°E 为界的中国大陆西部地震明显强于中国东部,与此关系密切的是,在约 107°E 为界大陆西部(以青藏高原为中心)地震波衰减大,以东的大陆地区衰减明显减小。尤其在衰减特性变化的分界线上(图 5-a),反映构造活动强烈,大地震分布集中的特点。由此可见,中国大陆高衰减区的分布与活动断裂分布、强震活动区域、强震破裂区以及低速区、高地热活动等相关,表明构造活动强烈、大震破裂造成介质破碎、热物质沿深大断裂带上涌等,可能是中国大陆高衰减

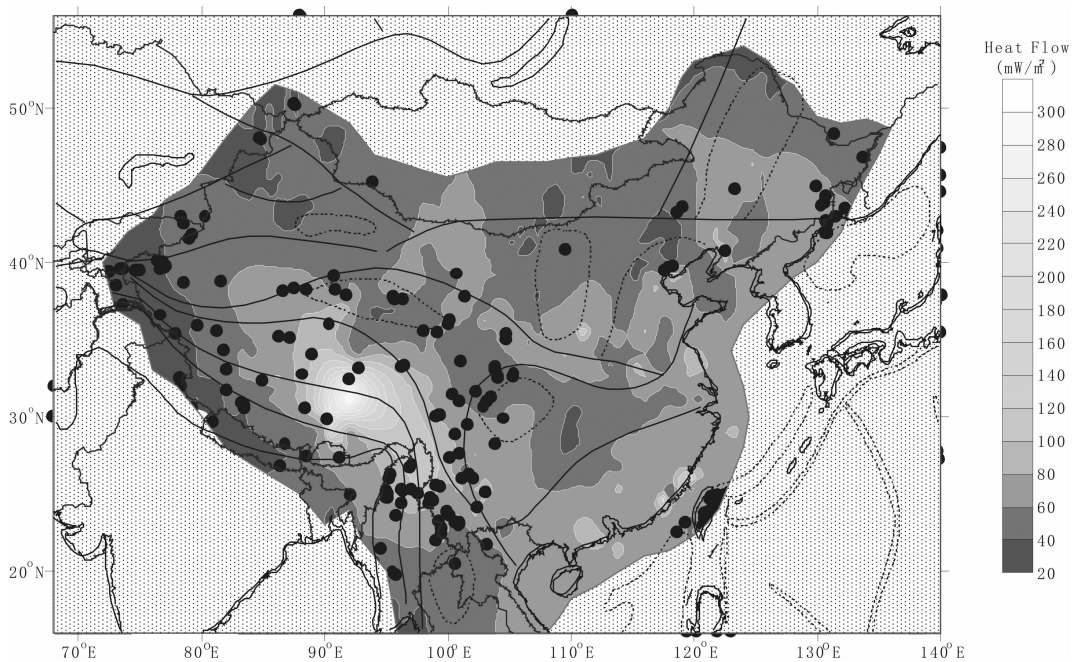


图 7 中国大陆大地热流及 1970—2009 年  $M_s \geq 6.0$  地震震中分布图

Fig.7 Distribution of heat flow and epicenters of earthquakes (dots) with  $M_s \geq 6.0$  that occurred in 1970—2009 in China's mainland



的主要成因<sup>[54]</sup>。

## 5 结 论

本文利用双台法反演得到中国大陆 Rayleigh 面波衰减特征,研究区域的衰减系数横向和纵向变化非常显著,能够明显区分软流圈结构,各个大构造单元的衰减系数呈现出显著的变化,这为解释中国大陆区域地球内部介质性质和探讨地球动力学提供了丰富的信息:

1)短周期(深度为 20~50 km)总体表现为东部(中国东北、华北、华南)以及中国大陆克拉通型地台(上扬子地块、塔里木地块、鄂尔多斯地块)Rayleigh 面波衰减减小,西北部(以青藏高原为中心)的增厚型地壳 Rayleigh 面波衰减大,反映在该深度东部地区已进入上地幔,西部仍处于下地壳。

2)中周期(深度为 60~130 km)Rayleigh 面波衰减特征是呈 SN 向展布,将中国大陆分成以鄂尔多斯—四川盆地为中部的三分图像,中部岩石圈稳定区表现为衰减小、速度高的稳定区域,表明鄂尔多斯与四川盆地这些厚岩石圈一般具有高速、低衰减分布,其下层的软流圈不发育,它们是大陆上的克拉通区(地台或地盾)。以东、以西分别为东部岩石圈拉张减薄区和青藏高原岩石圈汇聚增厚区均表现为活动性较强的高衰减特征。中国大陆东部陆相盆地低速、高衰减热结构的深部背景可能与西太平洋边缘弧后盆地热流上升有关,而青藏高原隆升使地壳内部物质发生剧烈形变,并伴有部分熔融及流动现象,而呈极低速、高衰减分布特征。

3)长周期(深度为 140~220 km)Rayleigh 面波衰减特征是中国大陆中西部衰减较小,而在东部衰减较大。表明中国大陆西部(以青藏高原为核心)地幔岩石圈为较冷、高速、低衰减的克拉通地块,为冈瓦纳古陆俯冲到高原该深度所致。同时西太平洋边缘弧后盆地的地幔浅部上升热流构成上地幔中的热室,形成东亚西太平洋边缘海巨型低速、高衰减带。

4)Rayleigh 面波衰减与地壳上地幔温度关系显示:中国大陆 Rayleigh 波在短周期的衰减特征与大地热流分布有一定相关性:研究区域内热流值较高的青藏地块及邻区表现为 Rayleigh 波衰减大,热流值较低的中国东部表现为 Rayleigh 波整体衰减减小。

5)中国大陆地震波在短周期的衰减特性与强震分布关系密切,在大约以 107°E 为界的中国大陆

西部地震明显强于中国东部,与此关系密切的是,在约 107°E 为界大陆西部(以青藏高原为中心)地震波衰减大,以东的大陆地区衰减明显减小。

## 参考文献(References):

- [1] 许志琴,杨经绥,嵇少丞,等. 中国大陆构造及动力学若干问题的认识[J]. 地质学报, 2010, 84(1):1-29.  
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Ji Shaocheng, et al. On the continental tectonics and dynamics of China [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(1):1-29(in Chinese with English abstract).
- [2] 袁学诚,李廷栋. 中国岩石圈三维结构雏型 [J]. 中国地质, 2009, 36(1):29-52.  
Yuan Xuecheng, Li Tingdong. A preliminary 3D model of lithospheric structure in China [J]. Geology in China, 2009, 36(1):29-52(in Chinese with English abstract).
- [3] 李廷栋. 中国岩石圈的基本特征[J]. 地学前缘, 2010, 17(3):1-13.  
Li Tingdong. Principal characteristics of the lithosphere of China[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(3):1-13(in Chinese with English abstract).
- [4] 程先琼,朱介寿,蔡学林. 东亚地幔流动速度研究 [J]. 中国地质, 2006, 33(4):896-905.  
Cheng Xianqiong, Zhu Jiushou, Cai Xuelin. Mantle flow vertical of East Asia [J]. Geology in China, 2006, 33(4):896-905(in Chinese with English abstract).
- [5] 蔡学林,朱介寿,程先琼. 南海复蘑菇状地幔低速柱结构及其地幔动力学[J]. 中国地质, 2010, 37(2):268-279.  
Cai Xuelin, Zhu Jiushou, Cheng Xianqiong. The structure of the composite mushroom-shaped mantle plume in the South China Sea and its mantle dynamics[J]. Geology in China, 2010, 37(2):268-279 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张国伟,董云鹏,姚安平. 关于中国大陆动力学与造山带研究的几点思考[J]. 中国地质, 2002, 29(1):7-13.  
Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Yao Anping. Some thoughts on the study of continental dynamics and orogenic belts[J]. Geology in China, 2002, 29(1):7-13(in Chinese with English abstract).
- [7] 袁学诚. 论中国西部岩石圈三维结构及其对寻找油气资源的启示 [J]. 中国地质, 2005, 32(1)1-12.  
Yuan Xuecheng. 3D lithospheric structure of western China and its enlightenment on petroleum prospecting [J]. Geology in China, 2005, 32(1):1-12(in Chinese with English abstract).
- [8] 吴根耀. 白垩纪:中国及邻区板块构造演化的一个重要变换期[J]. 中国地质, 2006, 33(1):64-77.  
Wu Genyao. Cretaceous: A Key transition period of the plate tectonic evolution in China and its adjacent areas [J]. Geology in China, 2006, 33(1):64-77(in Chinese with English abstract).
- [9] 程先琼,朱介寿,蔡学林. 全球地幔垂直流动速度研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4):1022-1028.  
Cheng Xianqiong, Zhu Jiushou, Cai Xuelin. A study of global vertical velocity of mantle flow [J]. Chinese Journal of Geophysics,

- 2006, 49(4):1022-1028(in Chinese with English abstract).
- [10] 崔军文, 张晓卫, 唐哲民. 青藏高原的构造分区及其边界的变形构造特征[J]. 中国地质, 2006, 33(2):256-267.  
Cui Junwen, Zhang Xiaowei, Tang Zheming. Tectonic divisions of the Qinghai-Tibet Plateau and structural characteristics of deformation on their boundaries [J]. *Geology in China*, 2006, 33(2):256-267(in Chinese with English abstract).
- [11] 邱瑞照, 李廷栋, 邓晋福, 等. 中国大地构造单元新格局——从岩石圈角度的思考[J]. 中国地质, 2006, 33(2):401-410.  
Qiu Ruizhao, Li Tingdong, Deng Jinfu, et al. A new pattern of tectonic units of China considered in light of the lithosphere [J]. *Geology in China*, 2006, 33(2):401-410(in Chinese with English abstract).
- [12] 徐纪人, 赵志新. 中国岩石圈应力场与构造运动区域特征[J]. 中国地质, 2006, 33(4):782-792.  
Xu Jiren, Zhao Zhixin. Regional characteristics of the lithospheric stress field and tectonic motions in China and its adjacent areas [J]. *Geology in China*, 2006, 33(4):782-792(in Chinese with English abstract).
- [13] 袁学诚. 再论岩石圈地幔蘑菇云构造及其深部成因 [J]. 中国地质, 2007, 34(5):737-758.  
Yuan Xuecheng. Mushroom structure of the lithospheric mantle and its genesis at depth: revisited [J]. *Geology in China*, 2007, 34(5):737-758(in Chinese with English abstract).
- [14] Andson D L, Ben-Menabem A, Archambeau C B. Attenuation of seismic energy in upper mantle [J]. *J. Geophys. Res.* 965, 70: 1441-1448.
- [15] Dziewonski A M, J Steim. Dispersion and attenuation of mantle waves from waveform inversion [J]. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1982, 70:503-527.
- [16] 洪学海, 朱介寿, 曹家敏, 等. 中国大陆地壳上地幔 S 波品质因子三维层析成像[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5):642-651.  
Hong Xuehai, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Tomography of 3-D S-wave quality factor of the crust and Upper Mantle in China [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2003, 46(5):642-651 (in Chinese with English abstract).
- [17] 宋仲和, 陈国英, 安昌强, 等. 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), 1993, 23(2):180-188.  
Song Zhonghe, Chen Guoying, An Changqiang. The 3-D structure of crust and mantle in Continental China and adjacent seas [J]. *Science in China (Series B)*, 1993, 23(2):180-188(in Chinese with English abstract).
- [18] 朱介寿, 曹家敏, 李显贵, 等. 中国及邻近区域地球三维结构初始模型的建立[J]. 地球物理学报, 1997, 40(5):627-648  
Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Li Xiangui, et al. A preliminary three-dimensional Earth's model of China and adjacent regions and its implications [J]. *Chinese J. Geophys.* 1997, 40(5):627-648 (in Chinese with English abstract).
- [19] 朱介寿. 全球地幔三维结构模型及动力学研究新进展[J]. 地球科学进展, 1996, 11(5):421-431.  
Zhu Jieshou. The recent development of three-dimensional models and geodynamics of the Earth's mantle [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1996, 11(5):421-431(in Chinese with English abstract).
- [20] 袁学诚主编. 中国地球物理图集[M]. 北京:地质出版社, 1996.  
Yuan Xuecheng. Atlas of Geophysical Maps of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996(in China).
- [21] 刘福田, 曲克信, 吴华, 等. 中国大陆及其邻近地区的地震层析成像[J]. 地球物理学报, 1989, 32(3):281-291.  
Liu Futian, Qu Kexin, Wu Hua, et al. Seismic tomography of the Chinese Continent and adjacent region [J]. *Chinese J. Geophys.*, 1989, 32(3):281-291(in Chinese with English abstract).
- [22] 张禹慎, 马石庄. 全球地震面波相速度变化及其大地构造学意义[J]. 地球物理学报, 1997, 40(2):181-192.  
Zhang Yushen, Ma Shizhuang. Global surface wave phase velocity variations and their tectonic implications [J]. *Chinese J. Geophys.*, 1997, 40(2):181-192(in Chinese with English abstract).
- [23] 滕吉文, 胡家富, 张中杰. 中国西北地区岩石层瑞利波三维速度结构与沉积盆地[J]. 地球物理学报, 1995, 38(6):737-749  
Teng Jiwen, Hu Jiafu, Zhang Zhongjie. The 3-D structure of Rayleigh wave and sedimentary basins in the Northwest China [J]. *Chinese J. Geophys.*, 1995, 38(6):737-749 (in Chinese with English abstract).
- [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[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2):402-411.  
Yi Guixi, Yao Huajian, Zhu Jieshou, et al. Rayleigh-wave phase velocity distribution in China and its adjacent regions [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2008, 51(2):402-411(in Chinese with English abstract).
- [25] Romanowicz B. Multiplet coupling due to lateral heterogeneity: asymptotic effects on the amplitude and frequency of the Earth's normal modes [J]. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1987, 90:75-100.
- [26] Romanowicz B. The upper mantle degree 2: Constraints and inferences from Global mantle wave attenuation measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95:11, 051-11 071.
- [27] Romanowicz B. On the measurement of anelastic attenuation using Amplitudes of low-frequency surface waves [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interior*, 1994, 82:179-191.
- [28] Romanowicz B. A global tomographic model of shear attenuation in the upper Mantle [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100:12, 375-12, 394.
- [29] Mitchel B J, L WB Leite, G K Yu, et al. Attenuation of Love and Rayleigh Waves across the Pacific at periods between 15 and 110 seconds [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1976, 66:1189-1202.
- [30] Mitchel B J. An elastic structure and evolution of the continental crust and upper mantle from seismic surface wave attenuation [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(4):441-462.
- [31] Mitchell B J. Surface wave attenuation and crustal and lasticity in central North America [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1973, 63:1057-1071.
- [32] Geuy-kuen Yu, Moon-Tsu Tsai, Ruey-Der Hwang. Velocity Dispersion and Attenuation of Rayleigh waves across the Philippine Sea [J]. *TAO*, 2000, 11(2):515-524.



- [32] Al-Shukri H J, Mitchell B J. Three-dimensional attenuation structure in and around the new Madrid seismic zone [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1990, 80:615-632.
- [34] Hwang H J, B J Mitchell. Interstation surface wave analysis by frequency domain Wiener deconvolution and modal isolation [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1986, 76:847-864.
- [35] Hwang H J, Brian J Mitchell. Shear velocities,  $Q\beta$ , and the frequency dependence of  $Q\beta$  in stable and tectonically active regions from surface wave observations [J]. Geophys. J. R. Astr. Soc., 1987, 90:575-613.
- [36] Kijko A, B J Mitchell. Multimode Rayleigh wave attenuation and  $Q$  in the crust of the Barents shelf [J]. J. Geophys. Res., 1983, 88:3315-3328.
- [37] Martine Bussy, Jean-paul Montagner. Tomographic study of upper mantle attenuation in the Pacific ocean [J]. Geophysical Research Letter, 1993, 20:663-666.
- [38] Mitchell B J. Regional Rayleigh wave attenuation in North America [J]. J. Geophys. Res., 1975, 81:4904-4916.
- [39] Mitchell B J. Regional variation and frequency dependence of  $Q\beta$  in the crust of United States [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1981, 71:1531-1538.
- [40] Rachel E. Abercrombie, crustal attenuation and site effects at Parkfield, California [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105:6277-6286.
- [41] 胡家富, 段永康, 胡毅力. 利用面波测定台间衰减系数 [J]. 西北地震研究, 1999, 19(2):172-179.  
Hu Jiafu, Duan Yongkang, Hu Yili. Measurement of interstation attenuation coefficients from surface wave [J]. Northwest Seismological Journal, 1999, 19 (2):172-179 (in Chinese with English abstract).
- [42] 李光品, 徐果明, 高尔根, 等. 中国东部地壳、上地幔横波品质因子的三维层析成像 [J]. 地震学报, 2000, 22(1):73-81.  
Li Guangpin, Xu Guoming, Gao Ergeng, et al. Tomography for 3-D transverse wave quality factor of crust and upper mantle in east China [J]. Acta Seismologica Sinica, 2000, 22 (1):73-81 (in Chinese with English abstract).
- [43] 陈国英, 宋仲和. 利用长周期面波研究华北地区地壳上地幔结构的横向非均匀性 [J]. 地球物理学报, 1990, 33(4):417-423.  
Chen Guoying, Song Zhonghe. A study of the lateral heterogeneities in the crust and upper mantle of the North China region by long period surface wave dispersion [J]. Chinese J. Geophys., 1990, 33 (4):417-423 (in Chinese with English abstract).
- [44] 马宏生, 汪素云, 裴顺平, 等. 川滇及周边地区地壳横波衰减的成像研究 [J]. 地球物理学报, 2007, 50(2):465-471.  
Ma Hongsheng, Wang Suyun, Pei Shunping, et al.  $Q_0$  tomography of S wave attenuation in Sichuan-Yunnan and adjacent regions [J]. Chinese J. Geophys., 2007, 50 (2):465-471 (in Chinese with English abstract).
- [45] 刘建华, 胥颐, 郝天珺. 地震波衰减的物理机制研究 [J]. 地球物理学进展, 2004, 19(1):1-7.  
Liu Jianhua, Xu Yi, Hao Tianyao. Study on physical mechanism of the seismic wave attenuation [J]. Progress in Geophys., 2004, 19(1):1-7 (in Chinese with English abstract).
- [46] 刘光鼎. 中国大陆构造格架的动力学演化 [J]. 地学前缘, 2007, 14(3):39-46.  
Liu Ghuangding. Geodynamic evolution and tectonic framework of China [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14 (3):39-46 (in Chinese with English abstract).
- [47] 朱介寿, 曹家敏, 严忠琼. 中国及邻区瑞利面波高分辨率层析成像及其地球动力学意义 [J]. 中国地质, 2007, 34(5):759-767.  
Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Yan Zhongqiong. High-resolution Rayleigh surface wave tomographic imaging of China and adjacent regions and its geodynamic implications [J]. Geology in China, 2007, 34(5):759-767 (in Chinese with English abstract).
- [48] Yang X, Taylor S R, Patton H J. The 20-s Rayleigh wave attenuation tomography for central and southeastern Asia [J]. J. Geophys. Res., 2004, 109, B12304.
- [49] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 中国大陆及邻区岩石圈地壳三维结构与动力学型式 [J]. 中国地质, 2007, 34(4):543-557.  
Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. 3D structure and dynamic types of the lithospheric crust in continental China and its adjacent region [J]. Geology in China, 2007, 34 (4):543-557 (in Chinese with English abstract).
- [50] 安美建, 石耀霖. 中国大陆地壳和上地幔三维温度场 [J]. 中国科学 (D 辑), 2007, 37(6):736-745.  
An Meijian, Shi Yaolin. Three-dimensional thermal structure of the Chinese continental crust and upper mantle [J]. Science in China (Series D), 2007, 34(4):543-557 (in Chinese with English abstract).
- [51] 胡圣标, 何雨娟, 汪集旸. 中国大陆地区大地热流数据汇编 (第三版) [J]. 地球物理学报, 2001, 44(5):611-626.  
Hu Shengbiao, He Lijuan, Wan Jiyang. Compilation of heat flow data in the China continental area (3rd edition) [J]. Chinese J. Geophys., 2001, 44(5):611-626 (in Chinese with English abstract).
- [52] 张国民, 马宏生, 王辉, 等. 中国大陆活动地块边界带与强震活动 [J]. 地球物理学报, 2005, 48(3):602-610.  
Zhang Guoming, Ma Hongsheng, Wang Hui, et al. Boundaries between active-tectonic blocks and strong earthquakes in the China mainland [J]. Chinese J. Geophys., 2005, 48 (3):602-610 (in Chinese with English abstract).
- [53] 刘建华, 刘福田, 阎晓蔚, 等. 华北地区 Lg 尾波衰减研究—Lg 尾波  $Q_0$  地震成像 [J]. 地球物理学报, 2004, 47(6):1044-1052.  
Liu Jianhua, Liu Futian, Yan Xiaowei, et al. A study of Lg coda attenuation beneath North China: seismic imaging Lg coda  $Q_0$  [J]. Chinese J. Geophys., 2004, 47 (6):1044-1052 (in Chinese with English abstract).
- [54] 苏有锦, 刘杰, 郑斯华, 等. 云南地区 S 波非弹性衰减  $Q$  值研究 [J]. 地震学报, 2006, 28(2):206-212.  
Su Youjin, Liu Jie, Zheng Sihua, et al. Q value of anelastic wave at attenuation in Yunnan region, China [J]. Acta Seismologica Sinica, 2006, 28 (2):206-212 (in Chinese with English abstract).

## The attenuation of Rayleigh surface wave in China's mainland

CHENG Xian-qiong, ZHU Jie-shou, CAI Xue-lin

(Department of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

**Abstract:** 442 pairs of Rayleigh wave were selected from 6312 waveforms recorded by 58 stations in China's mainland. The attenuation coefficients of the Rayleigh wave in China were obtained by using the phase-matched method and the frequency-domain Wiener filter. The authors made inversion of the attenuation coefficients of the Rayleigh wave in China's mainland with grids  $40 \times 40$ , and obtained the distribution of attenuation coefficients in different periods in China's mainland. Some conclusions have been reached: i) the attenuation of Rayleigh wave is lower in eastern China than in northwestern China in a short period, which shows that this depth is the upper mantle in eastern China and the crust in western China; ii) the formation of the attenuation of Rayleigh wave is in SN-direction, which divides China's mainland into three parts: the middle part is from Ordos to Sichuan, characterized by stability and low attenuation, whereas the other two parts are of high attenuation in the middle period; iii) the attenuation of Rayleigh wave is higher in eastern China than in northwestern China in a long period, probably due to the subduction of Gondwana land to this depth in northwestern China and the upwelling of the back-arc basin in West Pacific Ocean to this depth; iv) the relationship between the attenuation of Rayleigh wave and heat flow is that the regions such as Qinghai-Tibet block and its adjacent areas whose heat flow is high are of high attenuation, and the regions such as eastern China and its adjacent areas whose heat flow is low are of low attenuation; v) the relationship between the attenuation of Rayleigh wave and strong earthquake is intimate, as shown by the facts that more strong earthquakes and high attenuation of Rayleigh wave occur west of  $107^\circ\text{E}$  and less strong earthquakes and low attenuation of Rayleigh wave occur east of  $107^\circ\text{E}$ .

**Key words:** Rayleigh surface wave; attenuation coefficient; China's mainland, two-station method

---

**About the first author:** CHENG Xian-qiong, female, born in 1974, associate professor, engages in the study of seismic wave tomography and geodynamics; E-mail: chxq@cdut.edu.cn.