

云南地区的短周期面波相 速度层析成像研究^{*}

何正勤 苏 伟 叶太兰

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 利用云南数字地震台网 23 个台站记录的短周期(1~18 s)面波资料,用双台窄带滤波互相关方法,测定了在 209 条路径上的基阶瑞利波相速度频散曲线,并通过层析成像反演得到各周期的相速度分布图象.给出了沿 24°N, 25°N, 26°N 及 27°N 和 100.5°E 的相速度频散剖面图.结果表明:云南地区的相速度分布图象具有强烈的横向变化,短周期段的相速度分布与沉积层厚度密切相关,中甸、丽江东部区域在约 25 km 深度存在着明显的低速层,而畹町、云县、思茅一带在该深度范围是一明显的大面积高速区域.小江断裂与红河断裂围成的川滇菱形块体南段为低相速度区域.云南地区强震震中位置主要分布在相速度高速与低速过渡的区域.

关键词 云南地区 瑞利波相速度 层析成像 地壳中上部 速度结构

中图分类号: P315.3⁺1 **文献标识码:** A

引言

云南地区位于印度板块与欧亚板块碰撞带的东缘和中国南北地震带的南段.该区是扬子准地台、松潘—甘孜褶皱系、三江褶皱系及华南褶皱系的交会地区,构造活动复杂、断裂纵横交错、强烈地震频繁发生,是中国大陆内部地震活动最强的地区之一.近 30 年来,一系列强震(如:通海、炉霍、昭通、澜沧、丽江和大姚地震)相继发生.腾冲火山群是我国著名的近代火山活动地区之一,因此,深入系统地研究该区的地壳上地幔速度结构,对于提高云南区域台网的定位精度,确定区域地震的震源机制,研究大陆板块内地震成因的深部构造背景都具有十分重要的科学意义.

近 30 年来,中国地震局在云南地区布设了密集的地震台站,众多地震的发生为该区积累了丰富宝贵的数字地震记录资料,为深入研究该区深部速度结构创造了良好的条件.利用区域地震层析成像在云南地区已取得一系列的研究成果.刘建华等(1989)、陈培善等(1990)、刘瑞丰等(1993)、王椿镛和王溪莉(1994)先后利用 P 波走时资料,研究了该区的三维速度结构.随着资料的不断积累,近两年来又在 P 波走时层析成像方面取得了一些新的研究成果.秦嘉政等(2000)利用 12 000 多个到时,通过层析成像反演得到了腾冲火山及邻区的三维速度结构,结果发现腾冲火山区的上地壳低速、中地壳高速和下地壳低速层,

^{*} 地震科学联合基金(101086)和中国地震局重点项目“中国大陆数字壳幔结构”联合资助.中国地震局地球物理研究所论著 04AC1006.

2003-11-24 收到初稿,2004-01-29 收到修改稿,2004-04-12 决定采用.

对腾冲火山喷发机理和岩浆运移系统动力成因作出了新的推断和解释. 黄金莉等(2002)用走时数据反演得到了云南地区的三维速度结构. 王椿镛等(Wang *et al*, 2003)用 P 波 S 波走时数据, 反演得到了川滇地区的地壳上地幔三维速度结构, 发现川滇地区的地壳上地幔平均速度低、地壳厚度变化剧烈、中下地壳的负速度异常与地震活动性相关.

云南地区曾开展过大量的人工地震测深工作. 熊绍柏等(1986)、林中洋等(1993)的研究成果表明, 在云南地区的部分区域存在中地壳低速层; 胡鸿翔和高世玉(1993)、胡鸿翔和李学清(1994)、陈学波等(1994)和尹周勋等(1987)还专门利用人工地震资料, 对云南地区的地壳浅部基底细结构进行了研究. 吴建平(2001)用远震接收函数, 研究了云南数字地震台站下的 S 波速度结构, 发现壳内低速层的位置深部变化较大.

中长周期面波频散资料已广泛用于研究地壳上地幔三维速度结构(宋仲和等, 1993; 朱介寿等, 2002; 何正勤等, 2001, 2002), 成为研究较大构造单元速度结构差异的有效手段之一. 随着宽频带区域数字地震台网的新建落成, 利用短周期面波研究局部区域的地壳中上部精细结构已成为可能, 有关研究成果已公开发表. 例如, Chung 和 Yeh(1997)利用短周期瑞利波资料, 反演得到了台湾西南部的地壳浅部速度结构; Mladen 等(2000)用震中距约 100 km、震级 M_L 3.6~4.2 地震的短周期(2~20 s)面波群速度频散资料, 研究了 Slovenia 地区的速度结构; 何正勤等(2000)利用北京区域数字台网的短周期(2~18 s)面波相速度资料, 反演了河北平原北部的地壳中上部速度结构. 到目前为止, 由于受到台站密度、仪器频带和资料数量的限制, 国内外的短周期面波研究还都只限于混合路径的一维速度模型反演. 随着资料的结累, 短周期面波进行高分辨率三维细结构的研究已成为可能. 云南区域数字地震台网的建成和投入运行, 为完成本项目提供了契机. 本文采用双台法测定的相速度资料, 对云南地区的地壳中上部速度结构进行了层析成像研究. 与前人不同的是, 采用双台法可以扣除确定地震震中和发震时刻的误差, 大大提高了测定相速度频散的精度. 本研究是利用面波层析成像方法研究复杂介质精细结构的一个尝试.

1 资料选取与预处理

云南省数字地震台网由 23 个台站组成, 其分布位置如图 1 所示. 该台网自 1998 年投入运行以来, 已经积累了较丰富的数字记录资料. 该台网使用港震公司研制的 CSO 宽频带数字地震仪, 记录频段为 0.05~40 Hz, A/D 转换 24 位, 理论动态范围 138 dB. 本研究共选用震中距小于 10° 、震级大于 4.0 级的浅源地震 69 次. 为了提高频散测定的精度, 所用资料中, 震中与两个台站都近似位于同一条大圆路径上. 首先根据震中与台站位置挑选出满足上述条件的台站对, 并对选中的所有记录逐一绘制波形图, 从中选出记录波

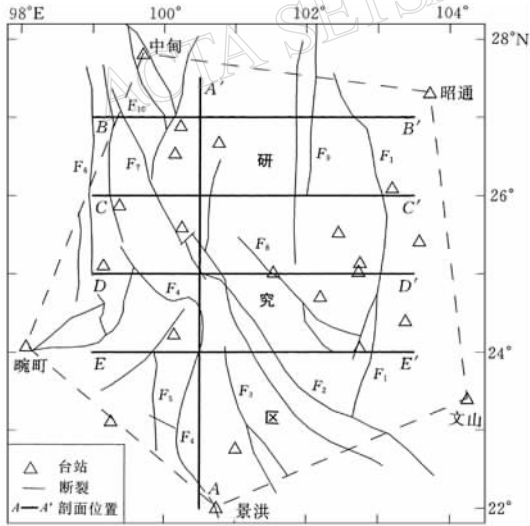


图 1 研究区域与台站位置图

F_1 小江断裂, F_2 红河断裂, F_3 无量山断裂, F_4 澜沧江断裂, F_5 南定河断裂, F_6 怒江断裂, F_7 乔后—巍山断裂, F_8 通海—楚雄断裂, F_9 安宁河断裂

形规则、面波发育良好、频散特征明显的记录，再用 SAC 软件进行重采样和带通滤波后按 SAC 的二进制格式存放备用。

2 相速度的测定

本研究采用窄带滤波—互相关法(冯锐等, 1981)测定两台站间的相速度，计算过程分为两步：首先用同样的窄带通滤波器，分别对两个台站的记录 $X_1(t)$, $X_2(t)$ 做滤波，得到只含有相同频率成分的简谐波

$$Y_i(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} X_i(\tau - t)V(t)dt \quad i = 1, 2 \tag{1}$$

$$V(T_n, t) = W(T_n, t)U(t) \tag{2}$$

$$Y_i(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} X_i(\tau - t)W(T_n, t)U(t)dt \quad i = 1, 2 \tag{3}$$

其中, $U(t)$ 为权函数。

$$U(t) = \cos^2\left(\frac{\pi t}{2N}\right) \quad -N \leq t \leq N, N = mT_n \tag{4}$$

$W(T_n, t)$ 为理想带通滤波器的单位脉冲响应函数

$$W(T_n, t) = A_0 \frac{\sin(2\pi ht)}{\pi t} \cos\left(\frac{2\pi t}{T_n}\right) \tag{5}$$

式中, h 为通频带半宽度(本研究取 $h=0.001$), T_n 为滤波中心周期, A_0 为常系数, 本研究取 m 值为 2.5. 通过窄通带滤波后的同频记录 $Y_1(t)$ 和 $Y_2(t)$ 用不同时移量 p 计算出互相关系数 γ_{21}

$$\gamma_{21} = (T_n, p) = \int_{-\infty}^{\infty} Y_2(T_n, t + p)Y_1(T_n, t)dt \tag{6}$$

最后由振幅矩阵的等直线确定其相速度

$$C(T_n) = \frac{r_2 - r_1}{p} \tag{7}$$

式中, $r_2 - r_1$ 是两台震中距之差. 当 Y_1 与 Y_2 同相位时 γ_{21} 为最大值, 反相位时 γ_{21} 为最小值. 因此, 将 γ_{21} 等值线的最大值勾绘出来, 就可以方便地确定出相速度频散曲线。

本研究中所选的资料中震中距都较小, 记录波形中短周期信息十分丰富. 由于对波形的挑选都十分严格, 计算出的振幅分布等值线都很规则典型. 本研究共获得在 209 个台站对之间路径上的频散曲线, 在相同路径上通过算术平均, 最终用于层析成像的路径为 142 条. 这些路径较均匀地覆盖了云南地区, 如图 2 所示。

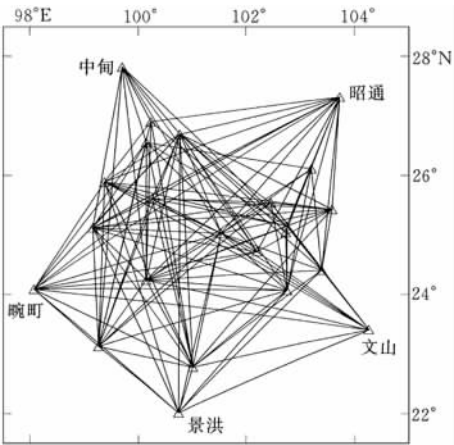


图 2 面波路径分布图

3 面波层析成像

利用面波频散反演地壳上地幔三维速度结构通常采用两步法：首先根据实测混合路径

上的相速度频散值,反演得到不同周期的相速度分布图象,构成在不同位置(或小区域内)的纯路径频散曲线;再根据相速度反演出横波速度结构. 上述的第一步常称为面波层析成像,这也就是本文所要涉及的内容. 横波速度结构的反演将在另一篇论文中讨论.

本研究采用 Ditmar 和 Yanovskaya(1987)及 Yanovskaya 和 Ditmar(1990)提出的面波层析成像反演方法,分别对 18 个中心周期反演,得到各个周期的相速度分布图象. 该方法是传统的 Backus-Gilbert 一维方法在面波 2D 反演情况下的推广. 由于模型的基函数是用群到时的积分形式表示,不需要初始参数和约束条件. 其方法的细节见 Ditmar 和 Yanovskaya (1987)的文章. 本研究在反演中使用了 Yanovskaya 提供的计算程序,输入对

应于某一周期为 T_m 的在 L 条混合路径上的相速度值,经反演得到该周期的相速度分布 $V(\varphi, \lambda)$ 和空间分辨 $R(\varphi, \lambda)$. 其中 φ, λ 分别是纬度和经度. 通过对每个周期的逐个反演,便可得到对应于每一特定位置(φ, λ)的纯路径相速度频散曲线.

3.1 不同周期的相速度分布图象与速度结构差异

将反演得到的同一周期在不同位置(φ, λ)上的相速度值,用等值线绘出来就得到了该周期的相速度分布图象,它可以直接反映出在某一深度范围内速度结构的横向变化特征. 对于某一周期而言,其相速度值反映的是深度为近半个波长范围内的平均速度,不同周期段的相速度分布图象分别表征了不同深度范围内的构造差异. 根据各周期的相速度分布图象特征,下面将对具有代表性的 3 个周期的相速度水平分布图象分别进行讨论.

4 s 周期的相速度分布图象如图 3a 所示,主要反映的是地壳浅表层的速度结构特征,其高速与低速区域的分布与沉积层厚度和区域地质构造有着密切的联系. 在中甸、丽江、云龙一带是明显的低速区,人工地震测深结果表明,这些地区的沉积层(胡鸿翔等, 1986; 林中洋等, 1993)厚度为 3 km 左右. 另一较大的低速区域位于楚雄—通海断裂及其西部区域,这里沉积层厚度为 1~3 km,是扬子地台、华南褶皱系与三江褶皱系的交会之处,其低相速度的出现还可能与强烈的构造活动有关. 此外,在

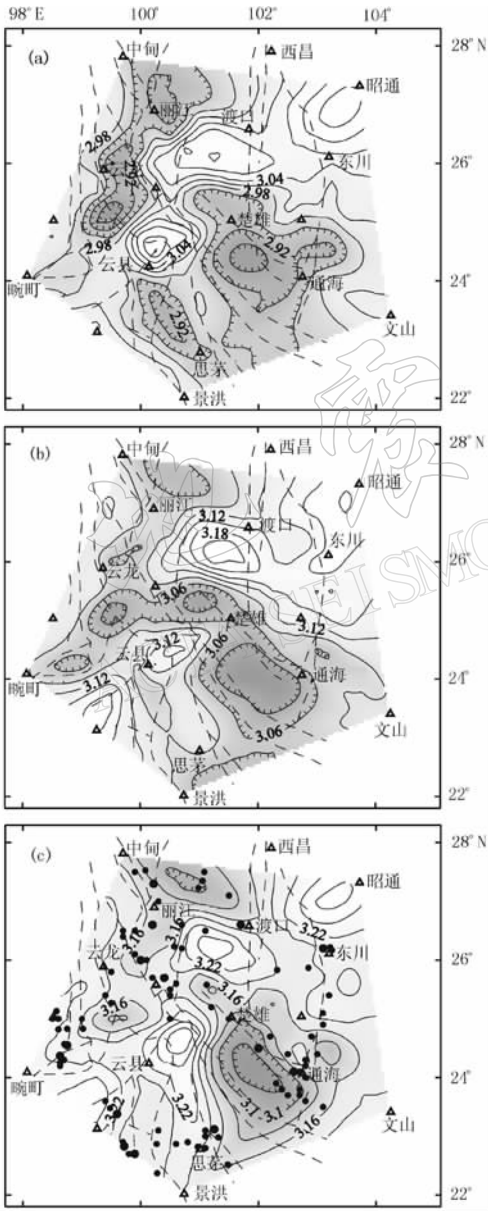


图 3 云南地区瑞利波相速度分布图象

思茅西北还有一小范围的低速区存在. 该地区位于思茅景谷盆地一带, 其沉积层厚度为 3~4 km(胡鸿翔, 高世玉, 1993; 林中洋等, 1993). 在研究区域的东北部(渡口以南、东川以北)为范围较大的高相速度区域. 这些地区沉积层厚度很薄, 其变化趋势与穿过该区域的人工地震测深剖面较一致. 此外, 云县北部地区的相速度也相对较高, 该区的沉积层厚度很薄.

10 s 周期的相速度分布图象如图 3b 所示. 该周期段表征的是从地表到深度约 16 km 范围的速度结构特点. 由于相速度分布具有在一定深度范围内的平均速度特征, 因此如果较短周期的速度异常区域出现在较长周期的图象中, 则说明在该周期新增加的穿透深度范围内不存在着速度结构的异常变化, 如果形态发生改变, 则是速度结构有异常变化的反映. 在该周期段, 西北部云龙—丽江一带的低速区域逐渐消失, 说明这一带的基底速度要明显高于周围地区. 人工地震测深资料(胡鸿翔, 高世玉, 1993)揭示出该地区的基底层速度为 6.3~6.5 km/s, 而周边地区只有 6.0~6.1 km/s. 下关—楚雄—通海一带出现的低速区可能与其基底断裂活动和基底层厚度增厚有关. 东北部的高速区域与上一周期段的形状相差不大.

15 s 周期的相速度分布图象如图 3c 所示, 所影响的深度范围约为 25 km, 主要反映的是中地壳的变化特征. 在中甸—渡口一带存在着较大范围的低相速度区, 这表明在约 25 km 深度上述地区可能存在着明显的低速层. 其高、低速过渡边界与小江断裂的走向基本一致. 畹町、云县、思茅一带在该深度范围是一明显的大面积高速区域. 楚雄—通海西南的低速区域与 10 s 周期的范围和形状都基本相同. 整体看来, 小江断裂与红河断裂所围成的川滇菱形块体, 在本研究区域内是一大块相对于周边的低速区域, 高低速过渡的边界与上述两条断裂的走向基本一致. 15 s 周期的相速度分布图象与王椿镛等(Wang, 2003)用 S 波走时反演得到的深度为 30 km 的速度分布图象显示出基本相似的特征. 在图 3c 中, 绘出了在研究区域内的从有记载以来至 2001 年 12 月发生的震级 6 级以上强震的分布情况. 它们都主要分布在高相速度与低相速度的过渡区域.

3.2 纵剖面上的相速度频散分布与速度结构的横向变化

理论研究表明, 瑞利波的能量主要集中在自由表面附近, 其穿透深度约在半个波长范围内. 因此, 我们可以近似地认为, 某周期的相速度是其半个波长深度范围内平均的横波速度值(实际上相速度值略小于横波速度值), 相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. 因此, 比较相邻地区的相速度频散曲线就能看出速度结构的横向变化特征. 在本研究中, 我们将一条剖面各节点的相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相速度随周期与空间位置变化的纵剖面图(图 4). 由于相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.

本研究给出了沿 100.5°E 经线(A—A')和沿 27°N、26°N、25°N 及 24°N(B—B'、C—C'、D—D'、E—E')纬线共 5 个纵剖面(剖面位置见图 1)的相速度随周期分布图象(图 4).

A—A'剖面沿 100.5°E 经线南北贯穿研究区域, 可以表征南北方向的速度分布特点. 该剖面与人工地震测深的思茅—中甸测线所揭示的结构特征十分吻合. 在 24°N 南段, 周期 7 s 范围内有一个十分明显的低速区域. 其边界位于本剖面与澜沧江断裂两个交点之间, 中心位于景谷附近, 在测线中部的景云桥一带(怒江断裂 90°大拐弯处)周期 1~10 s 的相速

度明显高于南北两侧. 这一带的沉积层很薄, 而且 15~20 s 周期的相速度也明显高于邻区. 在跨越红河断裂的地段, 在 4~8 s 周期有一个十分明显的相速度逆转. 红河断裂以北地区, 短周期低速带的范围逐渐增大到 8 s 附近. 这与胡鸿翔和高世玉(1993)得到的沉积层底界形态非常相似.

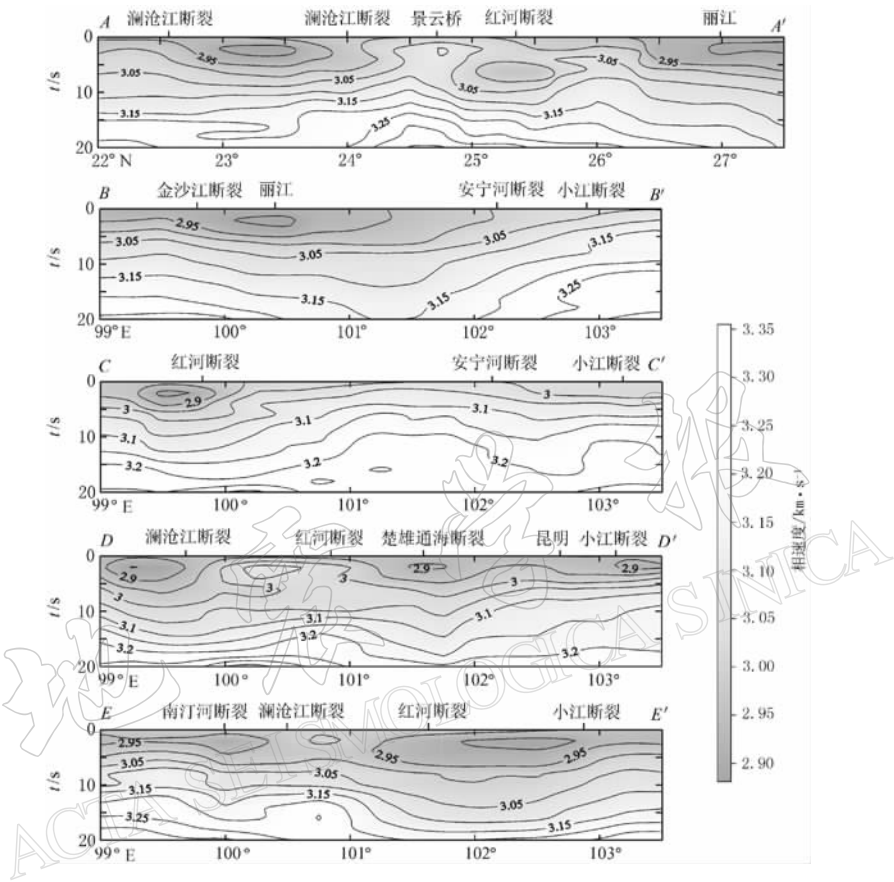


图 4 相速度频散剖面图

B—B'剖面(图 4)沿 27°N 纬线, 西段的短周期相速度明显高于安宁河断裂以东, 这主要反映了沉积层厚度的变化形态. 剖面中部的速度整体都低于东西两侧, 102.5°E 以东速度偏高更加明显.

C—C'剖面在 99°E~100.8°E 段是三江褶皱带穿跨区域, 短周期(1~5 s)为低相速度区, 向东到安宁河断裂附近, 整体速度明显高于东西两侧. 安宁河断裂到剖面东端的短周期相速度较低, 有沉积层增厚的趋势.

D—D'剖面东段与 C—C'剖面东段形态相似, 三江褶皱带仍是短周期低速区, 但低速带的影响周期较大(为 6 s 左右). 红河断裂东西两侧的差异十分突出, 101°E 向东为大范围的短周期低速区, 到剖面东端沉积层有逐渐变浅趋势, 但深度变化不大, 楚雄一通海断裂有界面下凹痕迹.

E—E'剖面穿越的构造单元较多, 其横向差异大, 南定河断裂、红河断裂和小江断裂在剖面上构造分界十分明显. 红河断裂与小江断裂之间, 在整个周期段都是明显的低速区

域, 其影响深度可达 30 km. 南定河断裂东部的速度较高, 界面起伏不大.

在图 4 所示的各剖面中, 澜沧江断裂、小江断裂和红河断裂都具有不同特点的相速度异常变化: 澜沧江断裂在 1~5 s 周期段是明显的低相速度区域, 6~18 s 周期段断裂两侧的速度变化不大. 在 1~18 s 整个周期段, 小江断裂和红河断裂两侧的相速度变化都较大, 小江断裂东侧的相速度明显大于西侧. 红河断裂南段的相速度呈西高东低, 而其北段则呈西低东高趋势.

4 结论

云南地区的相速度分布图象具有强烈的横向变化, 其短周期段的相速度分布与沉积层厚度密切相关. 南定河断裂、红河断裂和小江断裂在相速度分布剖面图中是明显的速度异常边界. 红河断裂和小江断裂所围成的川滇菱形块体南段在 1~18 s 周期段都是明显的低相速度区域. 这里是扬子地台、华南褶皱系与三江褶皱系的交会之处, 其低相速度的出现可能与其强烈的构造活动有关. 云南地区强震($M > 6.0$)震中位置主要分布在相速度高速与低速过渡的区域.

用窄带滤波-互相关法测定两台站间的相速度, 可以扣除确定地震震中和发震时刻的误差, 大大提高了测定相速度频散的精度. 本研究表明, 用区域数字台网的短周期面波进行高分辨率三维细结构的研究是可行的.

本研究的相速度层析成像使用了圣·彼德堡大学 T B Yanovskaya 教授提供的计算程序, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- 陈培善, 刘福田, 李强, 等. 1990. 云南地区速度结构的横向不均匀性[J]. 中国科学, B 辑, **20**(4): 431~458
- 陈学波, 李金森, 赵静娴, 等. 1994. 三江构造带基底构造特征与强震活动关系[A]. 陈运泰, 阚荣举, 滕吉文, 等主编. 中国固体地球物理学进展[C]. 北京: 海洋出版社, 41~54
- 冯锐, 朱介寿, 陈国英, 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): 586~203
- 何正勤, 丁志峰, 叶太兰, 等. 2002. 中国大陆及其邻域的面波群速度与地壳上地幔速度结构[J]. 地震学报, **23**(3): 252~259
- 何正勤, 张天中, 叶太兰, 等. 2000. 河北平原北部的短周期面波相速度与地壳上部速度结构[J]. 地震学报, **22**(4): 82~86
- 胡鸿翔, 高世玉. 1993. 滇西地区地壳浅部基底速度细结构的研究[J]. 中国地震, **9**(4): 356~363
- 胡鸿翔, 李学清. 1994. 云南地区孟连—思茅—马龙剖面的基底速度细结构[A]. 陈运泰, 阚荣举, 滕吉文, 等主编. 中国固体地球物理学进展[C]. 北京: 海洋出版社, 100~105
- 胡鸿翔, 陆涵行, 王椿镛, 等. 1986. 滇西地区地壳结构的爆破地震研究[J]. 地球物理学报, **29**(2): 133~144
- 黄金莉, 赵大鹏, 郑斯华, 等. 2001. 川滇活动构造区地震层析成像[J]. 地球物理学报, **44**(增刊): 127~135
- 林中亚, 胡鸿翔, 张文彬, 等. 1993. 滇西地区地壳上地幔速度结构特征的研究[J]. 地震学报, **15**(4): 427~440
- 刘建华, 刘福田, 吴华, 等. 1989. 中国南北带地壳和上地幔的三维速度成像[J]. 地球物理学报, **32**(2): 143~151
- 刘瑞丰, 陈培善, 李强. 1993. 云南及其邻近地区三维速度图象[J]. 地震学报, **15**(1): 61~67
- 秦嘉政, 皇甫岗, 李强, 等. 2000. 腾冲火山及邻区速度结构的三维层析成像[J]. 地震研究, **23**(2): 157~163
- 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

- 王椿镛, 王溪莉. 1994. 昆明地震台网下方的三维速度结构[J]. 地震学报, **16**(2): 167~175
- 吴建平, 明跃红, 王椿镛. 2001. 云南数字地震台站下方的 S 波速度结构研究[J]. 地球物理学报, **44**(2): 228~237
- 熊绍柏, 滕吉文, 尹周勋, 等. 1986. 攀西构造带南部地壳上地幔结构的爆炸地震研究[J]. 地球物理学报, **29**(3): 235~244
- 尹周勋, 滕吉文, 熊绍柏, 等. 1987. 渡口及其邻近地区地壳浅层结构的研究[J]. 地球物理学报, **30**(1): 22~30
- 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 2002. 东亚及西太平洋边缘海域高分辨率面波层析成像[J]. 地球物理学报, **43**(5): 646~663
- Chung J K, Yeh Y T. 1997. Shallow crustal structure from short-period Rayleigh-wave dispersion data in Southwestern Taiwan[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **87**: 370~382
- 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)
- Mladen Z, Istvan B, Panza F. 2000. Upper crustal velocity structure in Slovenia from Rayleigh wave dispersion[J]. *Pure Appl Geophys*, **157**: 131~146
- Wang C Y, Chan W W, Mooney W D. 2003. Three-dimensional velocity structure of crust and upper mantle in southwestern China and its tectonic implications[J]. *J Geophys Res*, **108**(B9): 2 442~2 456
- Yanovskaya T B, Ditmar P G. 1990. Smoothness criteria in surface wave tomography[J]. *Geophys J Int*, **102**: 63~72

SEISMIC TOMOGRAPHY OF YUNNAN REGION USING SHORT-PERIOD SURFACE WAVE PHASE VELOCITY

He Zhengqin Su Wei Ye Tailan

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

Abstract: The data of short-period (1~18 s) surface waves recorded by 23 stations belonging to the Digital Seismic Network of Yunnan Province of China are used in this paper. From these data, the dispersion curves of phase velocities of the fundamental mode Rayleigh wave along 209 paths are determined by using the two-station narrowband filtering cross-correlation method. Adopting tomography method, the distribution maps of phase velocities at various periods in Yunnan region are inverted. The maps of phase velocities on profiles along 24°N, 25°N, 26°N, 27°N and 100.5°E and the distribution maps of phase velocities at 3 periods in the study region are given. The results show that the phase velocity distribution in Yunnan region has strong variations in horizontal direction, and the phase velocity distribution in short-period range is closely related to the thickness of sedimentary layers in the shallow crust. The phase velocity in southern part of the Sichuan-Yunnan rhombic block encircled by the Honghe fault and Xiaojiang fault is obviously lower than that in surrounding areas. The epicentral locations of strong earthquakes in Yunnan region are mainly distributed in transitional zones between low and high phase velocities.

Key words: Yunnan region; phase velocity of Rayleigh waves; tomography; middle and upper crust; velocity structure