

Crustal Thickness (H) and Wave-Velocity Ratio (K) along and surrounding the Longmenshan Fault from Receiver Function

Xiaotao Zhang, Haiyun Long

China Earthquake Networks Center, Beijing
Email: zhangxiaotao@seis.ac.cn

Received: Apr. 5th, 2017; accepted: Apr. 26th, 2017; published: Apr. 30th, 2017

Abstract

Using teleseismic data recorded at 27 seismic stations in the region along and surrounding the Longmenshan fault zone, the P-wave receiver function were computed, and the crustal thicknesses and wave-velocity ratio were estimated by the H-K stacking method. The crustal thickness increases from east to west in the study area. The thickness of the crust of the Yangtze block is relatively flat, and the thickness is between 41 and 48 km. There is a difference of crustal thickness between north and south part of the Longmenshan fault, and the south part is deeper than the north about 3 - 9 km. The crust of Songpan Ganzi block is thicker and increases sharply. The depth is more than 49 km and it's a convex distribution from east to west. In the study area, the wave velocity is between 1.68 and 1.88, and wave-velocity ratio values in Wenchuan, Jingyan and Shiman is higher.

Keywords

Receiver Function, Longmenshan Fault, Crustal Thickness, Wave-Velocity Ratio

利用接收函数研究龙门山断裂带及邻区地壳厚度(H)和波速比(K)

张小涛, 龙海云

中国地震台网中心, 北京
Email: zhangxiaotao@seis.ac.cn

收稿日期: 2017年4月5日; 录用日期: 2017年4月26日; 发布日期: 2017年4月30日

摘要

对龙门山断裂带及其邻近地区27个地震台站的记录提取远震P波接收函数, 并应用H-K叠加方法, 求得每个台站下方的地壳厚度和波速比。研究区域地壳厚度总体变化是, 从东往西地壳增厚。扬子地块地壳厚度变化较为平缓, 厚度在41~48 km之间; 龙门山断裂带南北段地壳厚度存在差异, 南段比北段厚3~9 km; 松潘-甘孜地块地壳较厚且变化剧烈, 深度在49 km以上, 且在东西方向上呈“凸”形展布; 研究区波速比变化范围在1.68~1.88之间, 其中汶川、井研和石棉地区波速比较高。

关键词

接收函数, 龙门山断裂带, 地壳厚度, 波速比

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

P波接收函数是用三分量远震P波的水平分量对垂直分量作反褶积运算后得到的时间序列。主要由直达波P, 台站下方速度界面产生的Ps转换波及其速度界面与地表的多次反射波(PpPs, PsPs, PpSs)等震相组成[1] [2] [3] [4]。该方法在发展的过程中也经历了多次改进与创新, 但主要是围绕着接收函数的提取和反演两大部分进行。接收函数的提取实质上是一个反褶积的过程, 目前可分为频率域和时间域两大类[5] [6] [7] [8] [9]。频率域的方法主要是通过改善频谱估计的精度和分辨率来测定接收函数; 时间域的方法主要是依据一定的准则, 设计相应的滤波器来计算接收函数。接收函数的反演可分为线性化反演[10] [11] [12]和非线性化反演[3] [13] [14]两大类。由于接收函数方法具有简单易行、分辨率高的特点, 现已成为地壳上地幔结构研究领域一个非常重要而又普遍使用的方法。国内外的科学家应用该方法也对我国不同区域的地球物理学问题开展了大量卓有成效的工作[15]-[20]。

2008年5月12日汶川8.0级地震发生在龙门山断裂带上, 本文通过利用布设在龙门山断裂带及其附近的台站所接收到的远震波形数据, 采用接收函数的H-Kappa叠加方法[21]反演该区域的地壳厚度和波速比, 进而研究它们的分布特征, 以期对该区域的地壳结构有进一步的认识。

2. 研究区域概况

龙门山断裂位于青藏高原东缘的松潘-甘孜地块与扬子地块相衔接的地段, 其地质构造与大约45百万年前的印度洋板块和欧亚板块之间大的碰撞紧密相关。这一碰撞使得青藏高原东部产生强烈的变形和断裂作用, 并导致高原的隆升和其下方地壳的增厚。龙门山遭受青藏高原东缘断裂作用而强烈上升, 四川盆地(扬子地块)则相对下沉[22]。一般情况下将龙门山断裂带分为前、后龙门山两部分, 它由与龙门山脉走向一致的3条断裂组成: 前山断裂、后山断裂和龙门山主中央断裂。龙门山长约500 km, 宽40~50 km, 北起广元, 南至泸定、天全, 呈北东-南西向展布, 北东与大巴山相交, 南西被鲜水河断裂相截[23] [24]。龙门山是世界上最陡峭的大陆断崖陡坡带之一, 从四川盆地(扬子地块)海拔高程约400 m起, 到龙门山及松潘-甘孜地块平均高程达4 km, 而跨过的水平距离仅为50~60 km。由于其地形特殊, 两侧镶接的地块性质与构造差异很大, 历来是地球科学研究的热门地区[25]。

3. 观测资料

图 1 展示了龙门山断裂带及其邻区的 27 个数字地震台站分布, 可以看出这些台站对研究区域有较好的覆盖。我们选取了从 2010 年 10 月至 2011 年 10 月期间, 震中距在 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之间, 震级在 M5.5 以上, 388 次远震波形记录, 供本研究接收函数的提取和反演。从图 2 可以看出, 本研究选取的远震主要分布在台站的东部、南部, 少许分布在西部, 北部地震事件缺失。

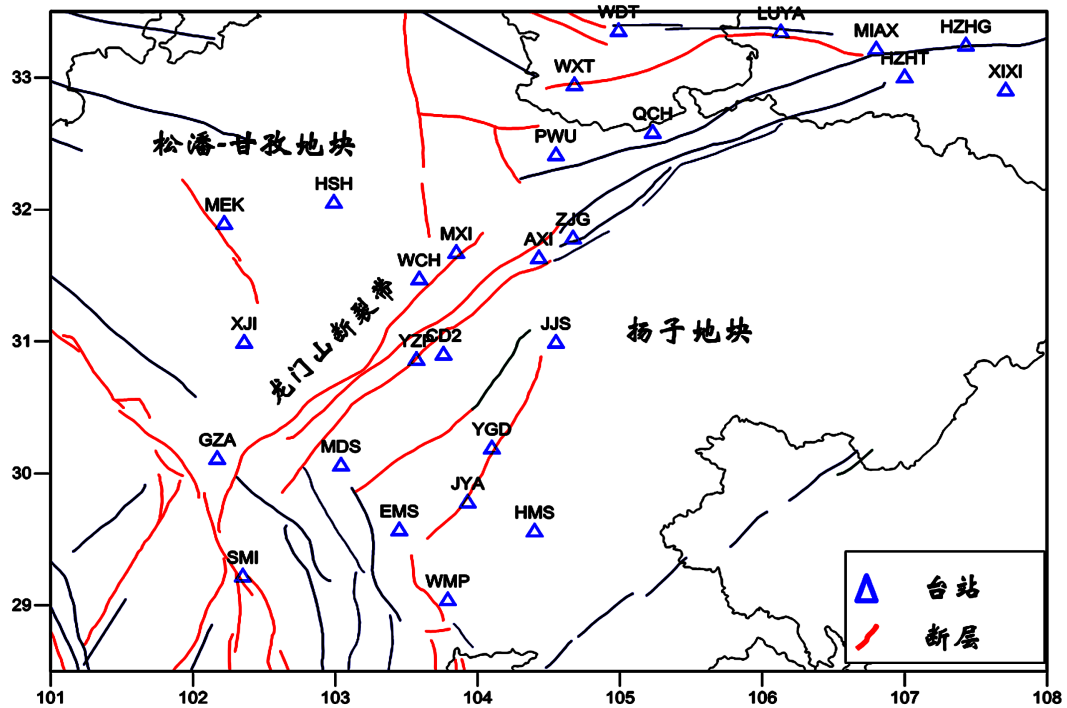


Figure 1. The distribution of seismic stations in Longmenshan and its adjacent areas

图 1. 龙门山及邻区地震台站分布

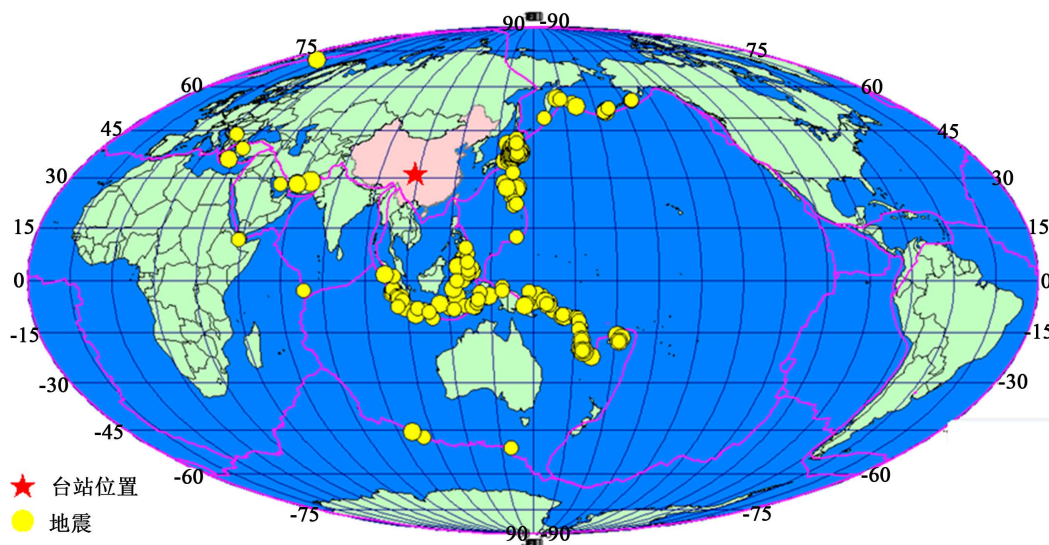


Figure 2. The teleseismic epicenter distribution in this study

图 2. 本研究使用的远震震中分布

4. 数据方法

接收函数是从地震记录三分量中分离出来的, 它消除了仪器响应、地震传播路径、震源等对远震 P 波的影响。主要包含了台站下方地壳和上地幔速度间断面所产生的一次转换波 Ps 以及多次反射波 PpPs, PsPs, PpSs, 这些转换波携带了丰富的地壳和上地幔结构信息[26]。

本研究采用 zhu *et al.*于 2000 年提出的 H-Kappa 方法来反演台站下方的地壳厚度和平均波速比[21]。该方法利用 P 波在穿过莫霍界面时产生的多次反射转换波 Ps, PpPs, PsPs, PpSs 等震相所携带的信息, 同时对地壳厚度和波速比进行约束, 有效的获取莫霍面的深度信息:

$$t_{Ps} = \frac{H}{V_p} \left(\sqrt{(V_p/V_s)^2 - p^2 V_p^2} - \sqrt{1 - p^2 V_p^2} \right)$$

$$t_{PpPs} = \frac{H}{V_p} \left(\sqrt{(V_p/V_s)^2 - p^2 V_p^2} + \sqrt{1 - p^2 V_p^2} \right)$$

$$t_{PsPs+PpSs} = \frac{2H}{V_p} \sqrt{(V_p/V_s)^2 - p^2 V_p^2}$$

式中 t_{Ps} , t_{PpPs} , t_{PsPs} , t_{PpSs} 分别为 Ps, PpPs, PsPs, PpSs 震相与直达 P 波的到时差, p 为入射波的射线参数。地壳介质中 P 波和 S 波的平均速度用 V_p 和 V_s 表示。H-Kappa 域内对多个接收函数的叠加可定义为:

$$S(H, K) = w_1 r(t_1) + w_2 r(t_2) - w_3 r(t_3)$$

其中, H 表示地壳厚度, K 表示波速比, t_1 , t_2 , t_3 分别是预测得到的 Ps, PpPs, PsPs + PpSs 震相走时, $r(t)$ 表示径向接收函数, w_i 是权重。扫描 H, K 域, 当 H, K 对应真实的地壳厚度和波速比时, $S(H, K)$ 达到极大值。

5. 数据处理

本文选取震中距在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 震级在 M5.5 以上的远震 P 波, 对其进行滤波以此选择信噪比高的地震事件, 截取 P 波到时前 10s 至 P 波到时后 70 s 的数据; 进行去均值、去倾斜等基本的数据处理; 将两个水平分量旋转至径向和切向分量; 利用时间域迭代反褶积法求取接收函数; 我们使用了系数 a 为 2.0 的高斯滤波器对接收函数作低通滤波, 以便一方面尽可能的使接收函数包含更多的细节信息, 另一方面又能尽量滤除多数噪声[27]。图 3 是 ZJG 台站的接收函数的计算结果, 图 3 中左图接收函数按震中距进行排列, 右图接收函数按反方位角进行排列。从图中可以看出, 直达 P 波部分清晰尖锐, 紧随其后能量次强的为 Ps 转换震相, 它在直达 P 震相之后的 6 秒左右到达, 后继震相显得模糊。

本文随后利用 Zhu *et al.*提出的 H-kappa 叠加方法进行了计算。在叠加过程中, 选取 P 波的平均速度为 6.3 km/s, w_1, w_2, w_3 的权重分别赋值为 0.7, 0.2, 0.1。图 4 是叠加后的 H-K 图像, H-K 图像中灰色部分表示 $S(H, K)$ 值, 小椭圆中颜色最深处为该台站下方地壳厚度和波速比值。从 H-K 图上叠加的结果可以显示江油台下方的地壳厚度约为 40.4 km, 波速比约为 1.75。依据同样的方法我们得到了龙门山及其邻区其它 26 个台站下方的地壳厚度与波速比(表 1)。

6. 结果与分析

本研究提取了龙门山及邻区 27 个台站的接收函数, 并利用 H-Kappa 方法反演了台站下方的地壳厚度和平均波速比。图 5 为利用克里金插值后获得的龙门山及邻区的地壳厚度分布。就总体分布而言, 本文结果与前人的研究结果较为一致[28] [29]。从东向西地壳厚度存在逐渐增加的趋势。但细节也有不同之处: 本文研究结果显示松潘-甘孜地块地壳厚度在 49 km 至 57 km 之间, 地壳厚度变化剧烈。另外, 该块体

Table 1. The crustal thickness and wave-velocity ratio results below 27 stations in Longmenshan and its adjacent area
表 1. 龙门山及邻区 27 个台站下方的地壳厚度及波速比

台站代码	台站名	地壳厚度 H (km)	dH (km)	波速比 K	dk
HZHG	汉中(国)	35.3	±2.60	1.73	±0.04
CXT	成县	40.4	±2.70	1.74	±0.05
WDT	武都	45.3	±2.01	1.76	±0.03
HZHT	汉中	45.2	±2.32	1.82	±0.03
NSHT	宁陕	45.9	±2.50	1.68	±0.04
XIXI	西乡	46.2	±2.56	1.79	±0.04
WXT	文县	46.8	±2.90	1.69	±0.05
LUYA	略阳	49.3	±2.78	1.69	±0.04
ANKG	安康(国)	49.7	±2.61	1.82	±0.05
MIAX	勉县	43.6	±2.79	1.79	±0.05
AXI	安县	41.2	±2.50	1.76	±0.04
GZA	姑咱	57.7	±2.76	1.82	±0.05
YGD	仁寿	41.8	±2.30	1.82	±0.04
WCH	汶川	52.1	±2.0	1.87	±0.04
MXI	茂县	47.3	±2.19	1.78	±0.03
EMS	峨眉山	49.6	±2.16	1.75	±0.03
PWU	平武	39.9	±2.51	1.75	±0.05
ZJG	江油	40.4	±2.65	1.75	±0.04
JJS	中江	40.5	±2.61	1.80	±0.04
CD2	成都	42.9	±1.92	1.80	±0.02
YZP	都江堰	42.6	±2.01	1.80	±0.03
QCH	青川	40.2	±2.81	1.75	±0.04
JYA	井研	44.2	±2.71	1.86	±0.05
WMP	沐川	44.8	±2.07	1.79	±0.03
HMS	荣县	47.4	±2.71	1.71	±0.04
XJI	小金	53.3	±2.6	1.71	±0.04
HSB	黑水	53.9	±2.11	1.73	±0.03
MEK	马尔康	56.5	±2.12	1.71	±0.03
SMI	石棉	47.1	±2.51	1.88	±0.03
MDS	雅安	44.6	±2.61	1.80	±0.03

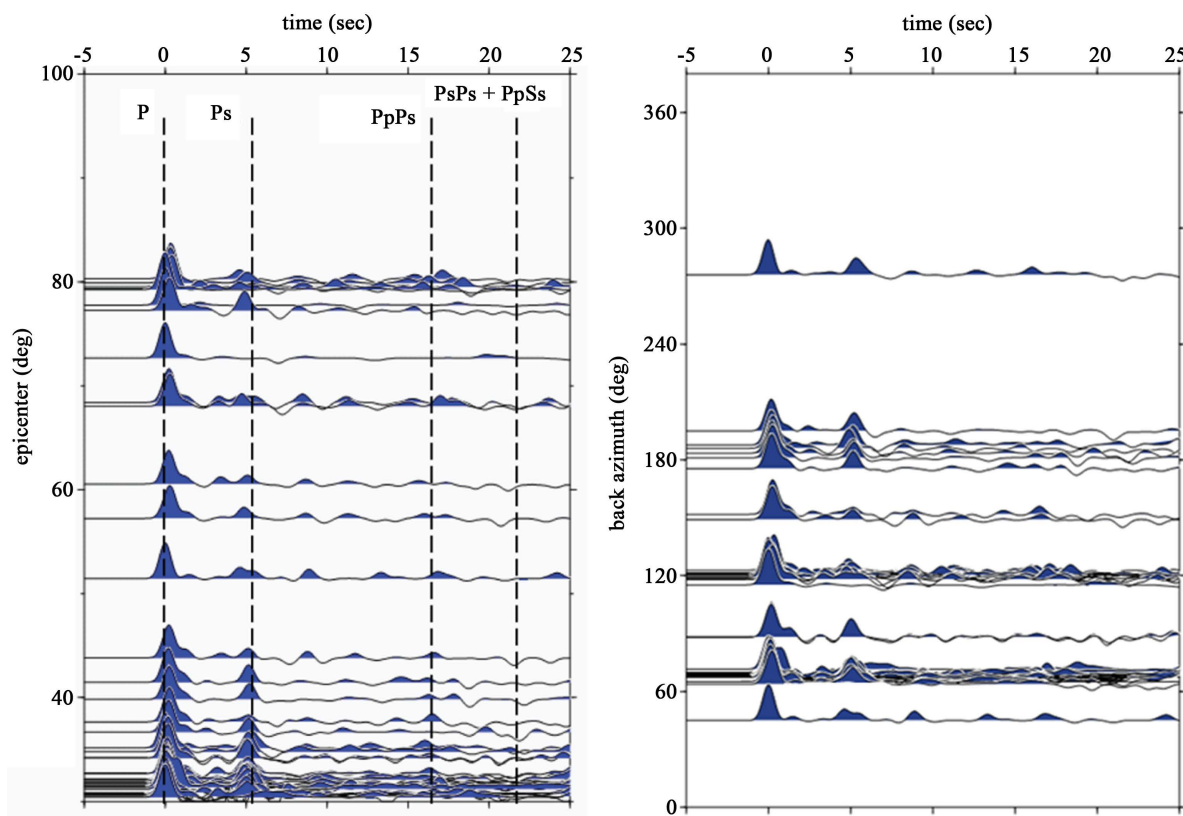


Figure 3. The receiver function image of Jiangyou station (ZJG)
图 3. 江油台(ZJG)接收函数图像

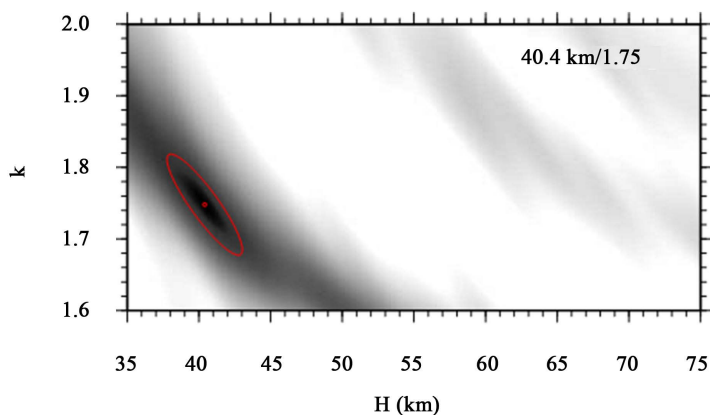


Figure 4. The H-Kappa stacking result of Jiangyou station (ZJG)
图 4. 江油台(ZJG) H-Kappa 叠加结果

地壳厚度由西向东存在“凸”字形展布。龙门山断裂带中南段地壳厚度在 43 km 至 49 km 之间，比其北段要厚。龙门山地震带北段地壳存在一个较薄的区域，如江油、平武地区地壳厚度仅约 40 km。扬子地块地壳较薄且变化较为平稳。图 6 给出了龙门山及邻区波速比的分布特征。从图中可以看出，研究区波速比变化范围在 1.68~1.88 之间，龙门山断裂带的中南段和其东南部波速比较高，如汶川、井研、石棉地区的波速比值约 1.87。实验室测试表明，波速比的变化主要是由于 SiO₂ 含量的变化引起，较多的铁镁质的地壳对应着较高的波速比，而与温度和压力的关系不大[30]。影响波速变化的最主要因素是地壳的物质

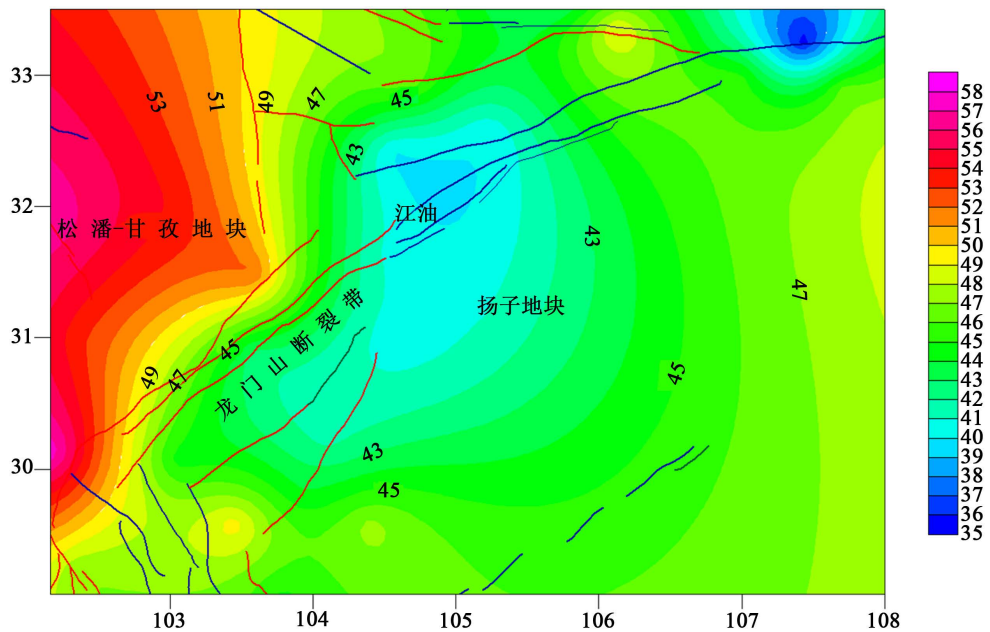


Figure 5. The distribution of crustal thickness in Longmenshan and its adjacent areas
图 5. 龙门山及邻区地壳厚度分布

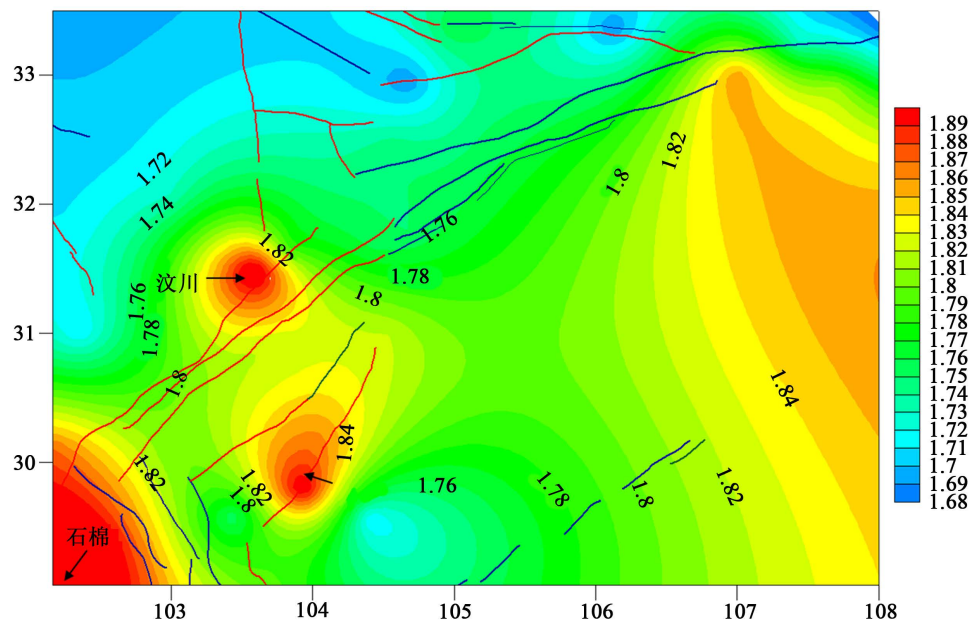


Figure 6. The distribution of wave-velocity ratio in Longmenshan and its adjacent areas
图 6. 龙门山及邻区波速比分布

组成[29]。由此推知, 汶川、井研、石棉地区的高波速比可能反映了台站下方地壳中的铁镁质成分较多; 另外, 从图 6 可知, 总体来讲松潘-甘孜地块的波速比较扬子地块的波速比低, 这可能反映了松潘-甘孜地块比扬子地块的地壳内 SiO_2 含量高; 以上关于研究区域地壳 SiO_2 和铁镁质含量定性的分析, 是基于波速比变化与地壳成分关系[30]推测得出, 其准确性还有待进一步研究。但作者希望本文的研究结果能为其他研究者提供些许有意义的参考。

基金项目

本研究由地震科技星火计划项目(XH17045)资助。

参考文献 (References)

- [1] Langston, C.A. (1979) Structure under Mount Rainier, Washington, Inferred from Teleseismic Body Waves. *Journal of Geophysical Research*, **84**, 4749-4762.
- [2] Ammon, C.J. (1991) The Isolation of Receiver Effects from Teleseismic P Waveforms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **81**, 2504-2510.
- [3] 刘启元, Kind, R., 李顺成. 接收函数复谱比的最大或然性估计及非线性反演[J]. 地球物理学报, 1996, 39(4): 502-513.
- [4] 吴庆举, 李永华, 张瑞青, 等. 用多道反褶积方法测定台站接收函数[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 791-796.
- [5] Gurrola, H., Baker, G.E. and Minster, J.B. (2010) Simultaneous Time-Domain Deconvolution with Application to the Computation of Receiver Functions. *Geophysical Journal International*, **120**, 537-543.
- [6] Ligorria, J.P. and Ammon, C.J. (1999) Iterative Deconvolution and Receiver Functions Estimation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **89**, 1395-1400.
- [7] Park, J. and Levin, V. (2000) Receiver Functions from Multiple-Taper Spectral Correlation Estimates. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90**, 1507-1520. <https://doi.org/10.1785/0119990122>
- [8] 吴庆举, 田小波, 张乃玲, 等. 用 Wiener 滤波方法提取台站接收函数[J]. 中国地震, 2003, 19(1): 41-47.
- [9] 吴庆举, 田小波, 张乃玲, 等. 计算台站接收函数的最大熵谱反褶积方法[J]. 地震学报, 2003, 25(4): 382-389.
- [10] Owens, T.J., Zandt, G. and Taylor, S.R. (1984) Seismic Evidence for an Ancient Rift beneath the Cumberland Plateau, Tennessee: A Detailed Analysis of Broadband Teleseismic P Waveforms. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 7783-7796. <https://doi.org/10.1029/JB089iB09p07783>
- [11] Ammon, C.J., Randall, G.E. and Zandt, G. (1990) On the Non-Uniqueness of Receiver Function Inversions. *Journal of Geophysical Research*, **95**, 303-315.
- [12] Ammon, C.J. and Zandt, G. (1993) The Receiver Structure Beneath the Southern Mojave Block. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **83**, 737-755.
- [13] Shibutani, T., Sambridge, M. and Kennett, B. (1996) Genetic Algorithm Inversion for Receiver Functions with Application to Crust and Uppermost Mantle Structure beneath Eastern Australia. *Geophysical Research Letters*, **23**, 1829-1832.
- [14] 高星, 王卫民, 姚振兴. 中国及邻近地区地壳结构[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 591-601.
- [15] Mitra, S., et al. (2005) Crustal Structure and Earthquake Focal Depths beneath Northeastern India and Southern Tibet. *Geophysical Journal International*, **160**, 227-248. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2004.02470.x>
- [16] Wang, H.L., Zhu, L.P. and Chen, H.W. (2010) Moho Depth Variation in Taiwan from Teleseismic Receiver Functions. *Journal of Asian Earth Sciences*, **37**, 286-291.
- [17] 徐强, 赵俊猛, 崔仲雄, 等. 利用接收函数研究青藏高原东南缘的地壳上地幔结构[J]. 地球物理学报, 2009, 52(12): 3001-3008.
- [18] 罗艳, 崇加军, 倪四道, 等. 首都圈地区莫霍面起伏及沉积层厚度[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1135-1145.
- [19] 段永红, 张先康, 刘志, 等. 长白山-镜泊湖火山区地壳结构接收函数研究[J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 352-358.
- [20] 刘文学, 刘贵忠, 周刚, 等. 新疆和周边地区地壳厚度和 V_p/V_s 比值变化的接收函数约束[J]. 地球物理学报, 2011, 54(8): 2034-2041.
- [21] Zhu, L. and Kanamori, H. (2000) Moho Depth Variation in Southern California from Teleseismic Receiver Functions. *Journal of Geophysical Research*, **105**, 2969-2980. <https://doi.org/10.1029/1999JB900322>
- [22] 王椿镛, 楼海, 姚志祥, 等. 龙门山及其邻区的地壳厚度和泊松比[J]. 第四纪研究, 2010, 30(4): 652-661.
- [23] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 Ms8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 2008, 30(3): 597-629.
- [24] 李勇, 黄润秋, Densmore, A.L., 等. 龙门山小鱼洞断裂在汶川地震中的地表破裂及地质意义[J]. 第四纪研究, 2009, 29(3): 502-512.
- [25] 宋文杰, 朱介寿, 程先琼, 等. 汶川 Ms8.0 级地震震源区地壳深部结构研究[J]. 第四纪研究, 2010, 30(4): 670-676.

-
- [26] 江晓涛, 程先琼, 宋文杰, 等. 用 H-Kappa 方法反演龙门山断裂带及其邻区的莫霍面深度及波速比分布[J]. 防灾科技学院学报, 2012, 14(3): 12-17.
- [27] 沈旭章, 梅秀萍, 杨辉. 汶川地震破裂带地壳速度结构研究[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(2): 477-488.
- [28] 龙锋, 倪四道, 闻学泽. 用远震接收函数研究龙门山断裂带及其邻区的莫霍面深度及波速比分布[J]. 地球学报, 2011, 32(4): 438-446.
- [29] 楼海, 王椿镛, 吕智勇, 等. 2008 年汶川 Ms8.0 级地震的深部构造环境[J]. 中国科学 D 辑, 2008, 38(10): 1207-1220.
- [30] Christansen, N. (1996) Poisson's Ratio and Crustal Seismology. *Journal of Geophysical Research*, **101**, 3139-3156. <https://doi.org/10.1029/95JB03446>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org