

李艳娥, 王林瑛, 郑需要. 2014. 汶川地震前后波速比变化特征的再研究. 地震学报, 36(3): 425-432. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.03.008.

Li Y E, Wang L Y, Zheng X Y. 2014. Restudy of the variation of  $v_p/v_s$  before and after the Wenchuan earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 36(3): 425-432. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.03.008.

## 汶川地震前后波速比变化特征的再研究<sup>\*</sup>

李艳娥 王林瑛<sup>\*</sup> 郑需要

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

**摘要** 收集整理了四川省地震台网 1990—2012 年产生的地震直达波震相数据, 利用单台多震和达法对 2008 年汶川  $M_s8.0$  地震前后四川地区的波速比变化特征进行了分析研究(共筛选出 13 个数据量较为丰富、连续性较好的台站). 结果显示: 其中位于龙门山断裂中北段西侧的 4 个台站, 震前出现长达 7 年左右的中长期波速比低值异常; 其它 9 个台站的波速比震前变化基本稳定. 震前波速比出现异常的 4 个台站的分布与汶川  $M_s8.0$  地震孕震区范围大体一致, 从而为研究汶川  $M_s8.0$  地震前是否存在地壳介质特性的时间变化过程, 提供了有力的判定依据.

**关键词** 2008 年汶川  $M_s8.0$  地震 波速比 单台多震和达法 地壳介质特性  
doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.03.008 中图分类号: P315.72 文献标志码: A

## Restudy of the variation of $v_p/v_s$ before and after the Wenchuan earthquake

Li Yan'e Wang Linying<sup>\*</sup> Zheng Xuyao

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

**Abstract:** Based on the seismic phase data recorded by Sichuan Digital Network from 1990 to 2012, this paper analyzes the variation of wave velocity ratio  $v_p/v_s$  before and after the 2008 Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake by using Wadati method of single station and multi-earthquake. We carefully winnow the date and select 13 stations with relatively abundant and continuous data. The results show that the wave velocity ratio obviously decreased at four stations before the Wenchuan earthquake in the western side of middle-northern Longmenshan fault, which lasts for almost seven years; while the ratio did not show abnormal varaiton at the other nine stations. The position of the four stations with anomalous wave velocity ratio are consistent with Wenchuan earthquake seismogenic zone, providing sufficient evidence for whether the temporal variation process of crustal media characteristics exists before the Wenchuan earthquake.

**Key words:** 2008 Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake; wave velocity ratio; Wadati

<sup>\*</sup> 基金项目 国家自然科学基金(41090292)和中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项(DQJB12C06)联合资助.

收稿日期 2013-02-06 收到初稿, 2013-12-25 决定采用修改稿.

<sup>+</sup> 通讯作者 e-mail: wang\_linying@163.com

method of single station and multi-earthquake; characteristic of crustal media

引言

2008 年 5 月 12 日汶川  $M_s8.0$  地震发生后, 为研究汶川地震前后波速比和视速度时间变化特征, 王林瑛等(2011)曾以龙门山断裂及其附近地区的地震震相报告提供的数据为基础, 利用单震多台和达法研究了龙门山断裂及其附近地区的波速比和视速度在汶川地震前的低值异常过程. 研究表明, 汶川地震前, 在龙门山断裂及其附近地区虽然存在波速比的低值异常, 但异常幅度并不显著; 然而, 其视速度的低值异常过程显著, 且异常持续时间长达 3—4 年左右(王林瑛等, 2011). 该研究采用的单震多台和达法由于会受到单次地震使用台站分布的影响, 存在较大范围数据的平均效应, 局部范围的异常可能会受到压制和减弱. 另外, 上述研究仅限于龙门山断裂及其附近地区, 没有利用整个四川省及邻区地震震相数据, 无法进行龙门山断裂附近与外围地区波速比变化特点的对比研究. 因此, 对余震区附近与外围地区波速比变化特征的差异性研究受到限制, 难以给出汶川地震余震区附近台站出现的波速比异常是否唯一与汶川地震的发生具有密切关联性的证据.

为此, 本文首先收集了四川省地震局 2001—2012 年数字地震台网产出的地震直达波震相数据, 对汶川地震前后四川省波速比的变化特征再次进行了系统的研究分析. 考虑到汶川地震为  $M_s8.0$  巨大地震, 震前波速比的异常过程有可能达到数年甚至 10 年以上, 仅 2001 年 1 月—2012 年 6 月的数据可能无法全面反映巨大地震前地壳介质特性整体异常变化的全过程. 因此, 又进一步补充搜集和整理了 1990 年 1 月—2000 年 12 月四川省地震台网的模拟数字地震仪台网记录的震相数据, 将地震震相数据从 2001 年向前扩展至 1990 年, 研究数据总计时间长达 22 年. 其中含有 122 811 次地震事件, 891 430 对直达波震相数据, 且获取的地震震相数据连续性很好.

1 单台多震波速比  $v_P/v_S$  计算方法和使用资料

单台多震和达法计算得到的是多次地震事件由单台记录的平均波速比(图 1), 表征多次地震发生时段内, 由多个震源至某个台站直达波穿透路径范围内的平均波速比.

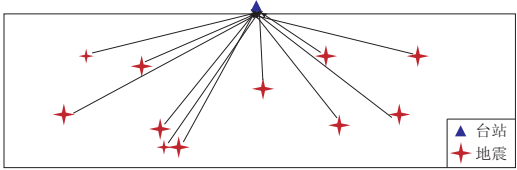


图 1 单台多震和达法示意图  
Fig. 1 Sketch of Wadati method of single-station and multi-earthquake

本研究采用的计算方法为单台多震和达法, 该方法由日本地震学家和达清夫 1928 年提出. 在假定震源区到地表介质为理想均匀弹性的条件下, 纵波速度  $v_P$  和横波速度  $v_S$  与介质泊松比  $\sigma$ 、弹性模量  $E$ 、介质密度  $\rho$  之间的关系为(李善邦, 1981)

$$v_P = \sqrt{\frac{E}{\rho} \left( 1 + \frac{2\sigma^2}{1 - \sigma - 2\sigma^2} \right)}, \tag{1}$$

$$v_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \sigma)}}, \tag{2}$$

$$\frac{v_P}{v_S} = \sqrt{\frac{2(1 - \sigma)}{1 - 2\sigma}}. \tag{3}$$

由式(3)可见， $v_P/v_S$  为介质的泊松比  $\sigma$  的函数，主要反映的是地壳中上层介质泊松比的变化。P 波和 S 波的速度则与介质的泊松比  $\sigma$ 、弹性模量  $E$  和介质密度  $\rho$  密切相关。

根据 P 波走时与 P 波、S 波到时差的线性关系得到  $v_P/v_S$  波速比值如下：

$$\frac{v_P}{v_S} = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - (\sum_{i=1}^n \Delta t_i)^2}{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i t_{Pi} - \sum_{i=1}^n t_{Pi} \sum_{i=1}^n \Delta t_i}, \tag{4}$$

线性相关系数  $R$  为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{Pi} - \bar{t}_P) - (\Delta t_i - \Delta \bar{t}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{Pi} - \bar{t}_P)^2 \sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \Delta \bar{t}_i)^2}}, \tag{5}$$

计算误差  $\gamma$  为

$$\gamma = \left( \frac{v_P}{v_S} - 1 \right)^2 \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n (\delta t'_{Pi})^2}{(n-2) \left[ n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - (\sum_{i=1}^n \Delta t_i)^2 \right]}}, \tag{6}$$

式中， $t_{Pi}$  为 P 波走时， $t_{Si}$  为 S 波走时， $\Delta t_i = t_{Si} - t_{Pi}$ ， $n$  为每次地震到时数据的个数， $\delta t'_{Pi} = (t_{Pi} - t_0) - \Delta t_i / (v_P/v_S - 1)$  (冯德益，1981)。

单台多震和达法计算结果的可能影响因素为：① 每组参与计算的地震空间位置可能不稳定；② 单次地震发震时刻的误差不同。因此在地震时空分布相对均匀和稳定、每次参与计算的数据量基本相同的情况下，其计算结果的可靠性和稳定性较高。

四川地区是地震发生较为频繁的地区，积累了大量的数据，为我们的研究筛选出质量较高的数据提供了保障。为了使研究结果可靠，针对单台多震法计算波速比的特点，本文采用以下参数作为约束条件：

- 1) 地震数据个数  $N=80$  (1 个滑动)，即采用 80 次地震为一组数据得到一个波速比值。
- 2)  $\Delta t \leq 20$  s，即最大的震中距范围为 168 km。
- 3) 排除每组数据中离差偏大的震相数据。
- 4) 相关系数  $R \geq 0.95$ ，误差估计  $\gamma \leq 0.05$ ，删除线性拟合较差的数据。
- 5) 选择震级  $M_L \geq 2.7$ ，主要考虑小地震测定精度可能会较差，容易在时间空间上形成小的丛集，所以选择定位精度较好的地震参与计算。

## 2 波速比异常计算结果

四川省地震台网运行可分为 1990—2000 年四川省模拟数字化地震记录的运行时段和 2001—2012 年数字地震仪地震记录的运行时段。图 2 为四川省及其邻区 1990 年 1 月—2012 年 6 月地震震中的空间分布图。

经过对四川省数字地震台网 2001—2012 年数据分析，从中对比和筛选出 13 个数据丰富且连续性好的地震台站。图 3 给出了这 13 个地震台的空间分布。

考虑到台网运行环境和分析判读震相精度的一致性，首先分析了四川省数字地震台网

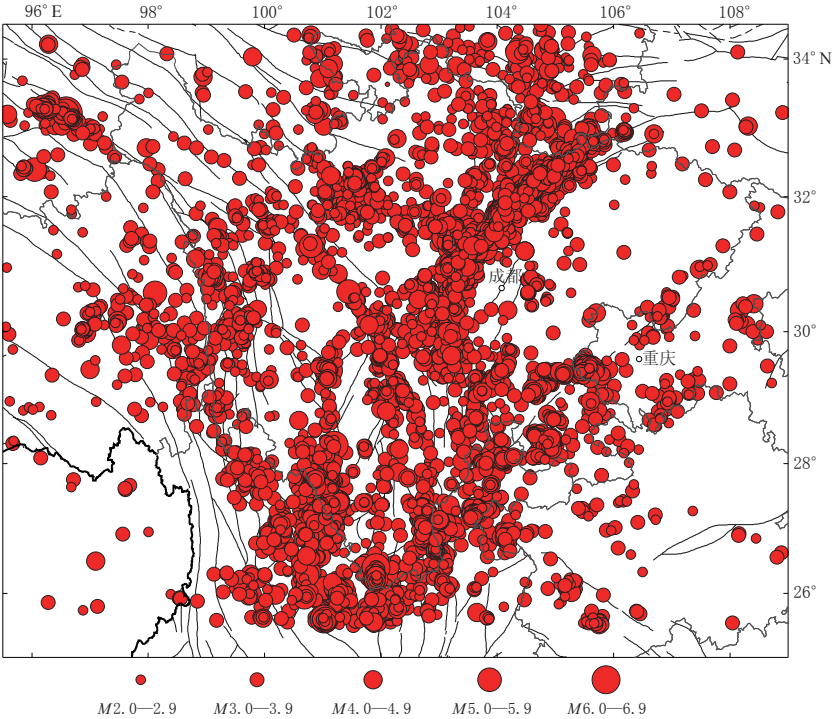


图 2 四川省及其邻区 1990 年 1 月—2012 年 6 月地震的震中空间分布图  
Fig. 2 Distribution of earthquakes in Sichuan Province and its surrounding areas from January of 1990 to June of 2012

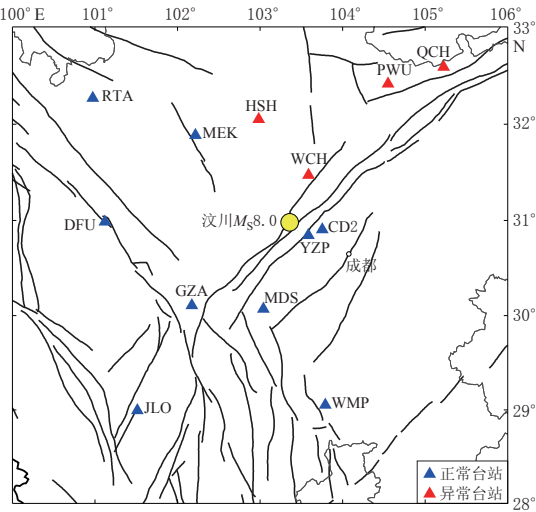


图 3 四川地区 2001—2012 年 13 个数据连续性好的地震台站空间分布图  
Fig. 3 Distribution of 13 digital seismic stations with good quality recording in Sichuan Province from 2001 to 2012

中上述 13 个地震台站 2001 年 1 月—2012 年 6 月的地震震相数据, 结果表明其中 9 个台站的波速比在汶川地震之前基本稳定, 另外 4 个台站的波速比在汶川地震之前出现低值异常, 且已持续 7 年左右. 为提高分析结果的连续性和可靠性, 又补充整理了 1990 年 1 月—2000 年 12 月四川省地震台网的模拟数字化台网记录的震相数据, 重点对波速比出现异常的 4 个台站进行分析.

青川 (QCH)、平武 (PWU)、汶川 (WCH) 和黑水 (HSH) 等 4 个台站为汶川地震前波速比出现低值异常过程的台站. 图 4 给出了这 4 个台站 1990 年 1 月—2012 年 6 月波速比随时间的变化曲线, 其中由于数据质量问题平武台使用的数据时间为 1995 年 1 月—2012 年 6 月.

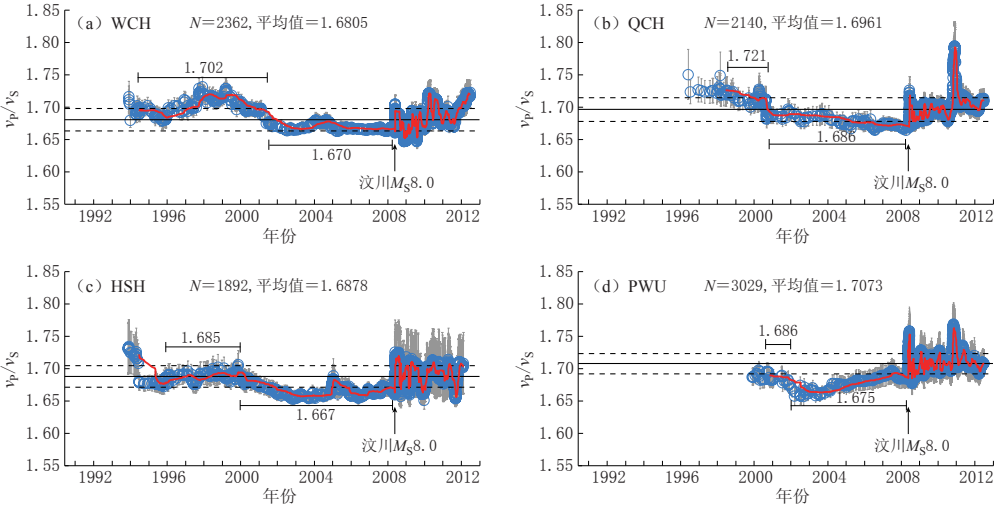


图 4 汶川(WCH)，青川(QCH)，黑水(HSH)和平武(PWU)台波速比随时间的变化曲线  
图中数字表示相应时间段内的波速比平均值，灰色竖线为计算误差，蓝色曲线为波速比结果，  
红色曲线为 10 个点平均滑动结果，黑色实线为平均值，虚线为标准差

Fig. 4 Variation of  $v_p/v_s$  with time for the stations WCH, QCH, HSH, and PWU  
The numbers in the fig. denote the average  $v_p/v_s$  ratios at corresponding time intervals. Grey vertical bars denote error bars of  $v_p/v_s$  ratio, blue curve denotes  $v_p/v_s$  value, red curve denotes moving average ratio over 10 points, black solid line denotes average  $v_p/v_s$  ratio, dashed line denotes the standard deviation

图中波速比稳定段—低值异常段平均值结果显示，这 4 个台站的波速比随时间变化的形态基本一致，从 2000 年开始波速比出现降低，低值持续了大概 7 年时间；但在临震前波速比的变化特征不明显，其原因可能是由于选取 80 次地震作为一组计算结果，从时间上不足以分辨波速比的变化；如果改为 40 次地震或者 30 次地震作为一组数据，临震前即可看到波速比的恢复形态。由于资料原因，本研究重点分析波速比稳定且持续时间长的低值异常。

油榨坪(YZP)、道孚(DFU)、姑咱(GZA)、九龙(JLO)、蒙顶山(MDS)、马尔康(MEK)、壤塘(RTA)、五马坪(WMP)和成都(CD2)等 9 个台站波速比在汶川地震前变化基本平稳。图 5 给出了上述 9 个台站 2001 年 1 月—2012 年 6 月波速比随时间的变化曲线。

采用单台多震和达法研究结果表明，沿龙门山断裂带汶川、青川、黑水和平武等 4 个地震台的波速比出现明显的正常—降低—维持长期低值—发震的阶段异常变化过程。汶川  $M_s8.0$  地震发生后，上述 4 个台站的波速比伴随着余震活动强度的逐渐衰减快速恢复到震前的背景水平。分布在鲜水河断裂带、龙门山断裂带南段、安宁河—则木河断裂带以及图 5 所示的 9 个台站，汶川地震前后的波速比变化基本平稳。

下面以黑水台为例对不同方位波速比进行研究，对异常的主要区域进一步加以判断和分析。和达法是基于一种平均意义的计算结果，其计算过程中会受到多种因素，诸如计算波速比所使用的地震空间分布、时间分布等影响，这会造成结果的不稳定性和差异性。当某个台站出现波速比异常时，如何判断是否与未来强震相关？能否从波速比异常的方位得到一些信息？假如波速比低值异常与强震相关，那么出现异常的区域应与强震的孕震区大体一致；相反，在远离孕震区的方位波速比变化则基本稳定。图 6 给出了黑水台不同方位

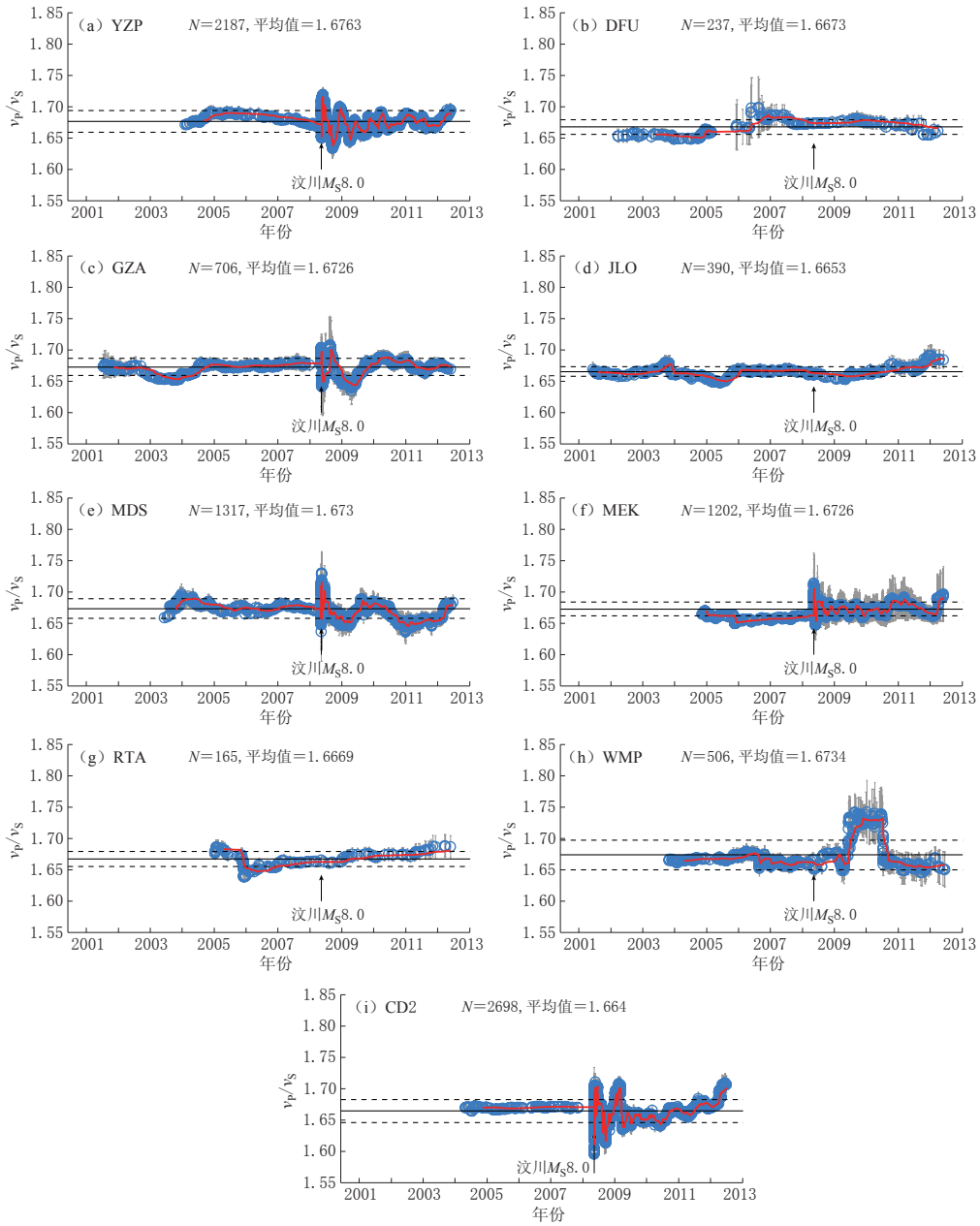


图 5 油榨坪(YZP)、道孚(DFU)、姑咱(GZA)、九龙(JLO)、蒙顶山(MDS)、马尔康(MEK)、壤塘(RTA)、五马坪(WMP)和成都(CD2)等台  
2001 年 1 月—2012 年 6 月单台波速比随时间的变化曲线  
灰色竖线为计算误差,蓝色曲线为波速比结果,红色曲线为 10 个点平均滑动结果,  
黑色实线为平均值,虚线为标准差

Fig. 5 Variation of  $v_p/v_s$  with time for the stations YZP, DFU, GZA, JLO, MDS, MEK, RTA, WMP and CD2 from January of 2001 to June of 2012  
Grey vertical bars denote error bars of  $v_p/v_s$  ratio, blue curve denotes  $v_p/v_s$  value, red curve denotes moving average ratio over 10 points, black solid line denotes average  $v_p/v_s$  ratio, dashed line denotes the standard deviation

的波速比变化特征的对比分析, 将参与计算的地震以图中的直线分为 A 区和 B 区.

图 7 给出了 A 区和 B 区波速比随时间的变化. 结果表明, 在远离断裂带的 A 区波速比变化基本稳定, 而在断裂带附近区域的 B 区波速比低值异常显著. 由此证明, 波速比的异常很可能与强震的孕震区密切相关.

3 分析与讨论

本文利用单台多震和达法对汶川地震前波速比变化进行了分析, 得到以下结论:

1) 通过对四川地区所筛选出的 13 个台站在汶川地震前后波速比变化特征的对比分析, 结果显示其中 4 个台站出现波速比显著异常, 其它 9 个台站波速比变化稳定. 通过对比波速比变化显著台站和变化稳定台站的空间分布, 发现出现波速比异常的区域与孕震区范围大体一致, 为确定

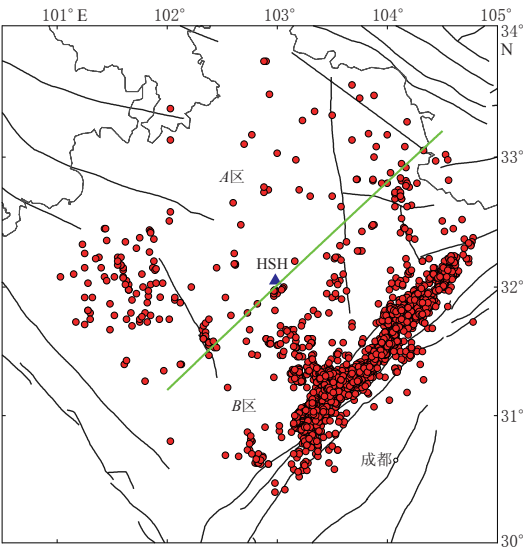


图 6 计算黑水台(HSH)波速比所使用地震的空间分布. 绿色直线为 A 区与 B 区的分界线  
Fig. 6 Distribution of earthquakes used for calculating  $v_p/v_s$  ratio of the station HSH where the green line divides the subareas A and B

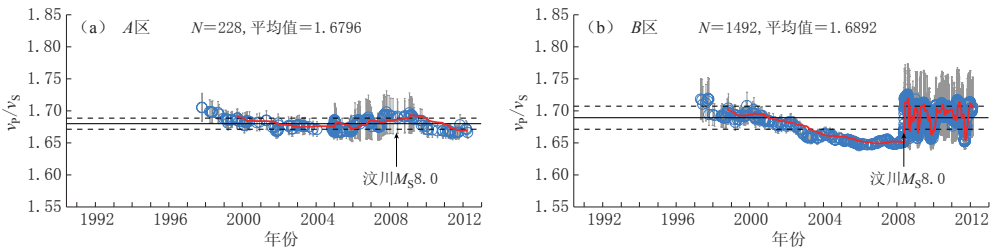


图 7 黑水台根据 A 区(a)和 B 区(b)地震数据所得到的波速比随时间的变化  
灰色竖线为计算误差, 蓝色曲线为波速比结果, 红色曲线为 10 个点平均滑动结果, 黑色实线为平均值, 虚线为标准差

Fig. 7 Variation of  $v_p/v_s$  with time for the station HSH obtained from the data of two subareas A (a) and B (b)

Grey vertical bars denote error bars of  $v_p/v_s$  ratio, blue curve denotes  $v_p/v_s$  value, red curve denotes moving average ratio over 10 points, black solid line denotes average  $v_p/v_s$  ratio, dashed line denotes the standard deviation

汶川  $M_s8.0$  地震前震源区是否存在地壳介质的显著时空变化提供了有利证据.

2) 从本文分析结果看, 汶川  $M_s8.0$  地震在震源区存在明显的波速比中长期异常过程. 汶川  $M_s8.0$  地震在震源区存在明显的波速比正常稳定变化阶段(2001 年以前)和波速比出现波动变化并降低, 继而在低值处持续了近 7 年(2001—2007 年)时间, 这一现象可以作为汶川  $M_s8.0$  地震前波速比变化的中长期特征. 这一特征与 Nur(1972)、Whitcomb 等(1973)、Scholz 等(1973)、冯德益(1981)、梅世蓉(1993)等观点比较吻合.



3) 利用单台多震和达法, 可以清晰地识别出汶川地震前青川、平武、汶川和黑水等台平均波速比出现显著异常变化. 对比单震多台和达法与单台多震和达法可看出, 由于单台多震和达法和达曲线拟合的数据样本给定, 台站位置固定, 地震射线是从多个地震震源到台站下方集中穿透, 只要地震分布位置随时间变化基本稳定, 便可较好地提高平均波速比的计算精度和空间分辨能力, 所携带的多个震源附近至台站下方地壳介质变化的信息也更为丰富和可靠.

单震多台和达法计算结果显示, 波速比震前低值变化不显著, 其原因一是本研究所采用的地震样本的空间范围仅限于龙门山断裂附近, 所使用资料的时间长度有限; 二是由于多震多台法选择的地震分布范围很大, 包括部分汶川地震南部波速变化很小的地区. 同时由于汶川  $M_s8.0$  地震的北部震源区很长, 不同部位受力方式的差异性导致波速比变化过程差异较大, 多台平均计算方法的平均效应可将异常减弱, 导致异常的显著性不突出. 由此可见, 对于汶川  $M_s8.0$  巨大地震, 利用和达法研究其波速比的时间变化特征, 单台和达法由于其影响波速比变化因素相对较少, 空间分辨率较高, 在波速比异常的识别上, 计算结果的可靠性和稳定性明显优于单(多)震多台和达法. 根据 GPS 研究结果, 在波速比异常进入中长期和中短期阶段, 存在构造块体推挤运动过程加剧的观测事实(中国地震局监测预报司, 2009).

本研究是基于大量的震相报告数据进行分析得到的结果, 使用的方法成熟且易于实现, 能够利用地震台网产出的海量数据进行分析, 实现准实时跟踪研究. 其缺点是这一方法受多种因素的制约和影响, 诸如地震定位精度、震相读取误差等. 在研究过程中对使用数据进行筛选, 尽量排除由于数据质量带来的影响. 但是尽管如此, 数据质量存在的问题仍不可避免. 对于所得到的结论, 仍需利用数字地震学, 如重复地震的方法, 从实际记录到的波形中找到更为确凿的波速变化证据. 在今后的工作中将采用精确的波形相关技术推进和深化这方面的研究.

## 参 考 文 献

- 冯德益. 1981. 地震波速异常[M]. 北京: 地震出版社: 34-37, 55-61.
- Feng D Y. 1981. *Velocity Anomalies of Seismic Waves*[M]. Beijing: Seismological Press: 34-37, 55-61 (in Chinese).
- 李善邦. 1981. 中国地震. 北京: 地震出版社: 522.
- Li S B. 1981. *Earthquake Research in China* [M]. Beijing: Seismological Press: 522 (in Chinese).
- 梅世蓉. 1993. 地震科学论文选集: 地震学、地震前兆与地震预报[M]. 北京: 地震出版社: 175-176.
- Mei S R. 1993. *Earthquake Scientific Researches Thesis Anthology: Seismology, Earthquake Precursor and Earthquake Prediction*[M]. Beijing: Seismological Press: 175-176 (in Chinese).
- 王林瑛, 李艳娥, 李芳, 李广平, 张天中, 鲍淑娟, 苏金蓉. 2011. 汶川地震前后地震波速比和视速度变化特征的研究[J]. 地震学报, **33**(1): 1-14.
- Wang L Y, Li Y E, Li F, Li G P, Zhang T Z, Bao S X, Su J R. 2011. Temporal variation of  $v_p/v_s$ ,  $v_p$  and  $v_s$  before and after 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **33**(1): 1-14 (in Chinese).
- 中国地震局监测预报司. 2009. 汶川 8.0 级地震科学研究报告[M]. 北京: 地震出版社: 57.
- Department of Monitoring and Prediction, China Earthquake Administration. 2009. *Scientific Research Report on the Wenchuan  $M_s8.0$  Earthquake* [M]. Beijing: Seismological Press: 57 (in Chinese).
- Nur A. 1972. Dilatancy, pore fluids, and premonitory variations of  $t_s/t_p$  travel times[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **62**(5): 1217-1222.
- Whitcomb J H, Garmany J D, Anderson D L. 1973. Earthquake prediction: Variation of seismic velocities before the San-Fernando earthquake[J]. *Science*, **180**(4086): 632-635.
- Scholz C H, Sykes L R, Aggrawal Y P. 1973. Earthquake prediction: A physical basis[J]. *Science*, **181**(4102): 803-809.