

# 2016 年青海门源 6.4 级地震前后波速比变化研究<sup>\*</sup>

刘文邦, 万玉杰, 李玮杰

(青海省地震局, 青海 西宁 810001)

**摘要:** 基于青海地震台网 2009 年 1 月至 2016 年 4 月产出的震相观测报告数据, 利用多台和达法和单台法对 2016 年门源 6.4 级地震前后震源周边地区波速比变化特征进行了研究。结果显示: 多台和达法计算得到震前一年波速比存在低值变化, 但异常不显著; 门源单台计算结果发现 2014 年初至 2015 年研究区波速比存在低值异常, 之后返回平均值, 其它台站异常不明显。分析认为: 这可能和多台平均将异常减弱以及地震射线路径对震源区的覆盖有关。

**关键词:** 门源 6.4 级地震; 波速比; 和达法; 单台法

**中图分类号:** P315.727

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)增刊 1-0049-06

## 0 引言

在地震孕育过程中, 孕震区介质的物理性状将产生一系列变化, 地震波通过地壳介质时, 波速也会发生相应变化, 研究波速变化可以得到地震孕育的震兆信息。中国已有很多学者做了相关研究, 冯德益等 (1976) 系统研究了我国西部强震及中强震前后波速比异常变化, 讨论了根据近震直达波资料计算波速比确定孕震区的方法, 并探讨了孕震区的一些基本特性, 得出波速比可以作为研究介质物性的重要依据的结论 (冯德益, 1981, 1988)。近年来, 我国很多学者研究了不同地区平均波速比及中强震前后波速比变化。冯建刚等 (2009) 研究得出青藏高原东北缘的平均波速比为 1.706, 刘文邦等 (2014) 基于直达波震相数据利用多台和达法计算了青海东北部上地壳的分区域平均波速比分布在 1.685 ~ 1.709, 李永华等 (2006) 基于波形利用接收函数方法研究了青藏高原地壳厚度和地壳平均波速比。王林瑛等 (2011, 2014) 利用多台和达法和多震联合测定得出汶川 8.0 级地震前波速比低值异常持续 2 年多, 且幅度小持续时间较短; 还利用单台多震法研究发现位于龙门山断裂中北段西侧的 4 个台站, 震前出现了长达 7 年左右的中长期波速比低值异常, 发现芦山地震前部分台站也存在较明显的降低过程, 并

探讨了不同方法影响波速比变化的因素, 空间分辨率等在波速比异常识别上的不同。

2016 年 1 月 21 日, 青海省海北州门源县发生 6.4 级地震, 对当地造成了巨大的影响和财产损失, 该地区属青藏块体东北缘, 属青藏高原监测能力较好地区, 积累了一定的数字化地震资料。为了进一步做好震例总结工作, 鉴于以上学者的研究方法和思路, 本文分别利用多台和达法和单台法研究门源 6.4 级地震前后门源地区波速比变化特征。

## 1 计算方法及原理

采用的计算方法是多台和达法。该方法由和达清夫提出, 在假定震源区到地表为理想均匀弹性介质的条件下, 纵波速度  $V_p$ 、横波速度  $V_s$  与介质泊松比  $\sigma$ 、杨氏模量  $E$  和介质密度  $\rho$  之间的关系 (李善邦, 1981) 为

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

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

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1 - \sigma)}{1 - 2\sigma}}. \quad (3)$$

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-08-23.

基金项目: 青海省地震科学基金课题 (2015A04) 资助.

由式 (3) 可知,  $V_p/V_s$  为介质泊松比  $\sigma$  的函数, 主要反映地壳上层介质泊松比变化。

根据 P 波走时和 P 波、S 波到时差的线性关系, 得到波速比值  $V_p/V_s$ , 线性相关系数  $R$ , 由此可计算误差  $\gamma$ , 具体公式为

$$\frac{V_p}{V_s} = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - (\sum_{i=1}^n \Delta t_i)^2}{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i t_{Pi} - \sum_{i=1}^n t_{Pi} \sum_{i=1}^n \Delta t_i} \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{Pi} - \bar{t}_{Pi})(\Delta t_i - \bar{\Delta t}_i)}{\left[ \sum_{i=1}^n (t_{Pi} - \bar{t}_{Pi})^2 \sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \bar{\Delta t}_i)^2 \right]^{1/2}} \quad (5)$$

$$\gamma = \left( \frac{V_p}{V_s} - 1 \right)^2 \left\{ \frac{n \sum_{i=1}^n (\delta t'_{Pi})^2}{(n-2) \left[ n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - (\sum_{i=1}^n \Delta t_i)^2 \right]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式 (4) ~ (6) 中,  $t_{Pi}$  为 P 波走时,  $t_{Si}$  为 S 波走时,  $\Delta t_i = t_{Si} - t_{Pi}$ ,  $n$  为每个地震的到时数据个数,  $\gamma$  为波速比计算误差,  $\delta t'_{Pi} = (t_{Pi} - t_0) - \Delta t_i \left( \frac{V_p}{V_s} - 1 \right)$  (冯德益, 1981)。

## 2 资料选取

青海省门源县位于青藏高原东北缘, 其监测能力较好, 门源 6.4 级地震震中位于甘青交界地区, 2 省震中附近台站对本次地震都有较好记录。本研究多台法计算使用了青海省台网给出的距离门源 6.4 级地震震中 180 km 范围内台站, 单台法计算挑选了门源主震附近的门源台、铎尖台、龙王山台和祁连台。门源 6.4 级地震发生在冷龙岭断裂, 震前该断层附近中小震不多, 计算时样本量太少。为了进一步增加中小震的样本量, 计算时采用了其北东向甘肃境内昌马—俄博断裂附近的中小震, 近年来该断裂附近发生的中小震较多, 可以大幅提高研究样本量。从图 1 可以看出, 震中附近台站分布不均匀, 门源主震震中南部和西部台站较多, 这些台站记录的冷龙岭附近及昌马—俄博断裂的中小震正好可以较好覆盖门源地震震源区。综合考虑了地震射线路径对门源 6.4 级震源区的覆盖及研究地震样本量, 笔者选定 ( $37^\circ \sim 38^\circ$

N,  $101^\circ \sim 103^\circ$ E) 范围内地震为研究对象, 通过控制 S 波和 P 波到时差调整研究台站的范围。图 1 中实心三角形为青海地震台网及临省部分地震台, 空心三角形为 2014 年初并入青海省地震台网的临时台阵。图 2 为研究区的地震射线路径分布图, 射线路径较好的覆盖了研究区。

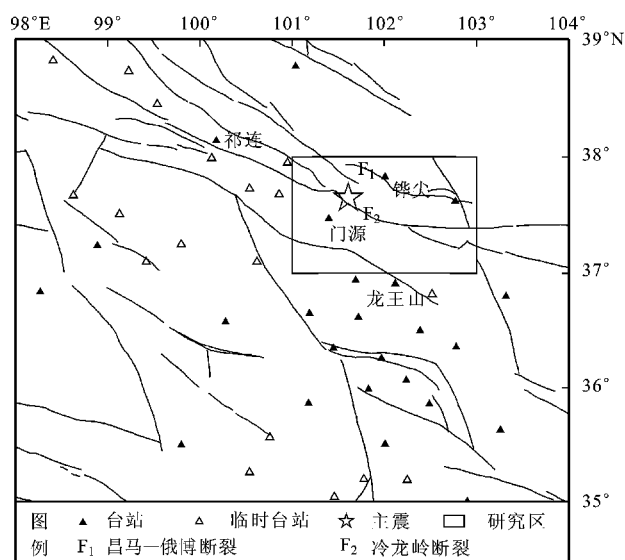


图 1 研究区台站分布

Fig. 1 Distribution of seismic stations in the study area

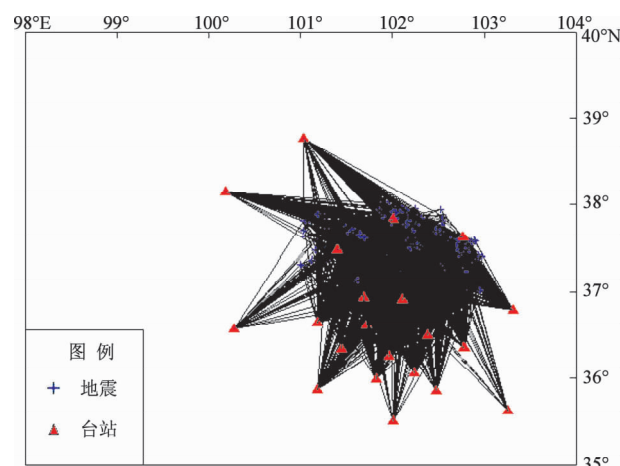


图 2 研究区地震射线空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of seismic rays in the study area

## 3 波速比计算结果

### 3.1 多台和达法

多台法计算使用了 2009 年 1 月 1 日至 2016

年 4 月 31 日青海台网给出的  $M_L \geq 1.0$  地震的震相观测报告数据, 计算时设定统一限定条件: 相关系数  $R \geq 0.99$ , 计算误差  $\gamma \leq 0.1$ , 台站个数  $n \geq 4$ 。图 3 给出了多台和达法计算波速比的相关系数  $R$  和计算误差统计。如图 3a 所示, 相关系数  $R$  均大于 0.99, 其中绝大部分地震  $R > 0.996$ , 说明如式 (5) 所示, 在用最小二乘法拟合时, 拟合直线与观测数据相关性较好, 偏离直线的台站较少。图 3b 给出的计算误差  $\gamma$  统计, 计算误差  $\gamma \leq 0.1$ , 计算误差  $\gamma$  主要集中在 0.02 ~ 0.06 之间。本文拟合的方法通过限定相关系数保证了绝大部分观测数据与拟合直线较好的贴合, 从而使计算误差较小。

图 4 给出了研究区多台和达法波速比时间曲线, 其中图 4a 为计算时采用 S 波和 P 波到时差为 15 s 内的地方震结果, 图 4b 为到时差为 20 s 内的地方震结果。为了进一步减小地震波传播路径的影响, 减少研究台站的范围, 使尽量多的射线路径通过震源区, 本部分对比分析到时差 15 s 和 20 s 内近震结果。如图 4a 所示, 由 5 点平滑后的波速比时序曲线可以发现, 整个研究时段内波速比的平均值为 1.697, 波速比从 2015 年初开始存在约半年的降低过程, 之后回返, 在门源 6.4 级地震前下降之后发震。图 4b 显示研究时段内波速比平均

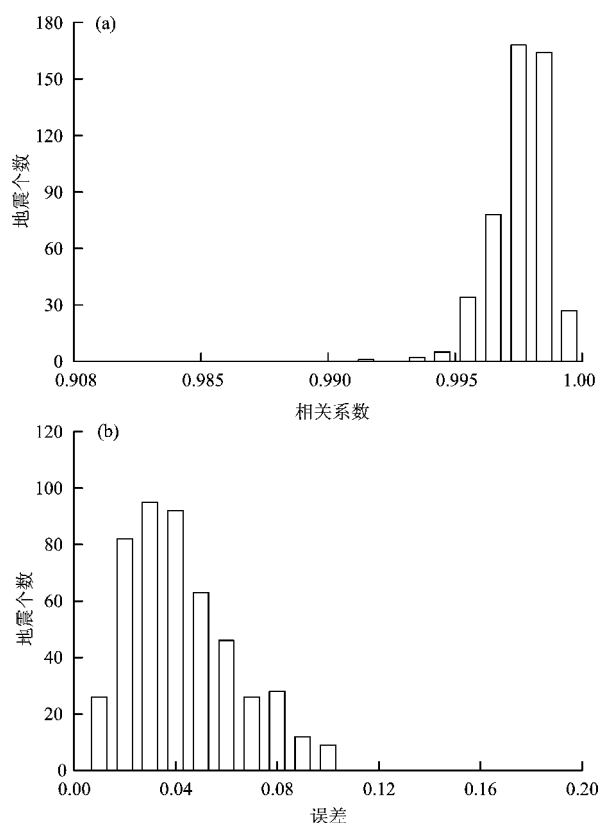


图 3 波速比计算相关系数 (a) 和计算误差统计直方图 (b)

Fig. 3 Histograms of the correlation coefficient (a) and the calculation error of calculating  $V_p/V_s$  (b)

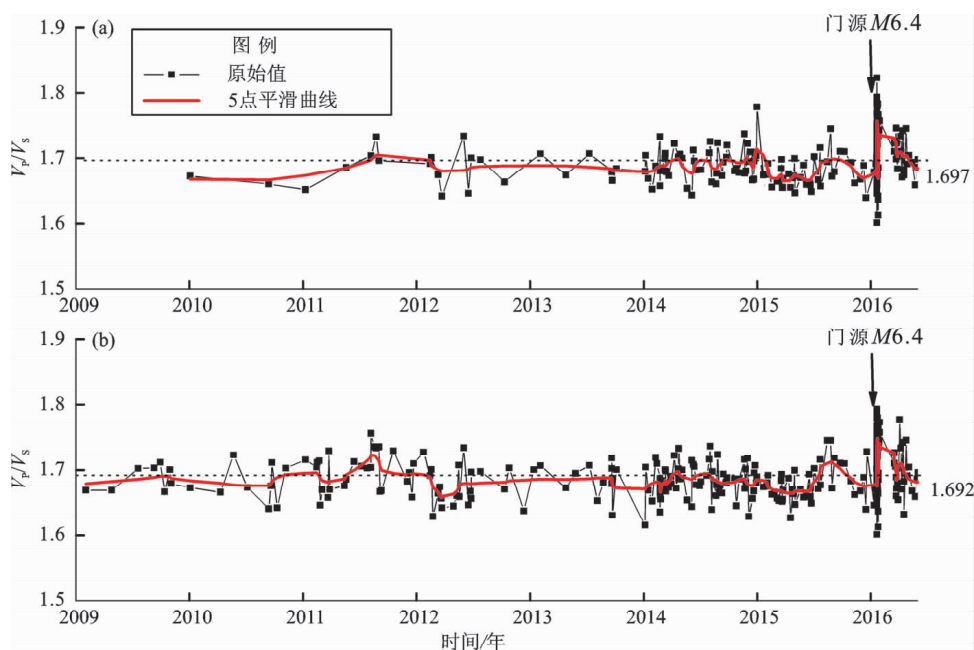


图 4 研究区多台和达法波速比时间变化曲线

(a)  $t_{Si} - t_{Pi} \leq 15$  s; (b)  $t_{Si} - t_{Pi} \leq 20$  s

Fig. 4 Time variation curve of  $V_p/V_s$  calculated by multi-stations Heda method in the study area

值为 1.692, 波速比变化也存在相似过程, 但幅度和持续时间更短。这种变化可能表明门源 6.4 级地震前孕震区可能存在一段时间波速比变化过程。对比图 4a、b 的曲线可发现: 图 4a 的地震个数更少, 但主震前的变化较明显, 主要可能与计算时采用到时差为 15 s 内的地方震可以有效地缩小研究台站的范围, 使更多的异常地震波射线通过了孕震区有关。

多台波速比计算结果显示波速比在门源 6.4 级地震前存在下降一回返一下降的过程, 但相对整个研究时段内波速比的起伏变化, 异常并不是很明显, 这可能与地震和台站分布不均匀有关。多台和达法是通过拟合的方法得到的结果, 虽然误

差小, 但如果不是所有台站记录的地震射线都经过孕震区, 在多台拟合的平均效应下, 波速比异常可能会减弱。

### 3.2 单台法

近年来很多学者用不同方法研究典型强震序列前后波速比变化, 李艳娥等 (2014) 利用多台和达法和多震联合测定法, 得出汶川 8.0 级地震前波速比低值异常为 2 年多, 且幅度小持续时间较短; 利用单台多震法研究发现, 其中位于龙门山断裂中北段西侧的 4 个台站在震前出现了长达 7 年左右的中长期波速比低值异常。鉴于此研究发现, 本文利用单台的方法计算了门源 6.4 级地震震源区附近不同方向台站的波速比。

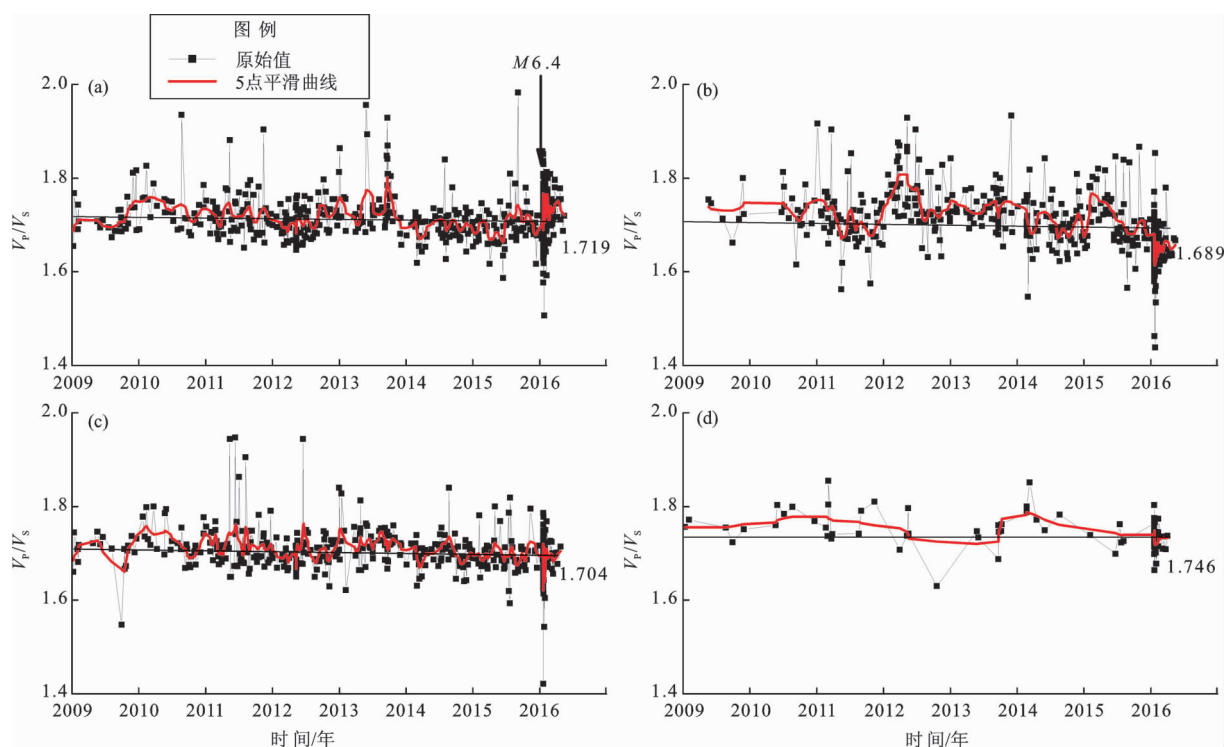


图 5 研究区单台波速比时间变化曲线

(a) 门源台; (b) 铎尖台; (c) 龙王山台; (d) 祁连台

Fig. 5 Time variation curve of  $V_p/V_s$  by single station in the study area

(a) Menyuan Station; (b) Huajian Station; (c) Longwangshan Station; (d) Qilian Station

笔者分别计算了门源台、铎尖台、龙王山台及祁连台单台波速比 (图 5), 因为这 4 个台站离主震近、近年来记录的中小地震较多、且分布在主震的不同方向, 可以对该区域近年来波速比变化进行对比分析。单台法研究的地震样本和多台法是一致的, 研究样本为 2009 年 1 月至 2016 年 4

月 ( $37^{\circ} \sim 38^{\circ} \text{N}$ ,  $101^{\circ} \sim 103^{\circ} \text{E}$ ) 范围内  $M_L \geq 1.0$  地震。门源台距离门源 6.4 级主震震中约 27 km, 位于主震的西南方向。从图 5a 可见, 门源台波速比平均值为 1.719, 2014 年初至 2015 年中研究区波速比存在低值异常, 该段时间波速比平均值为 1.694, 下降了约 1.5%, 2015 年中后返回平均值,

地震后序列波速比升高。门源主震前门源单台与多台曲线均存在低值一回返的过程,但单台得到低值异常持续时间比多台低值异常时间长。单台法研究的是门源台与研究区内不同地震射线路径计算得到的波速比。门源台位于主震的西南方向,中小地震主要分布在东北方向,门源单台的绝大多数地震射线覆盖了冷龙岭断裂及门源震源区,虽然单台计算结果误差较大,但从概率统计的角度,5 点平滑后得到的波速比低值异常应该是客观的。铔尖台距离门源 6.4 级主震震中约 40 km,位于其北东方向。如图 5b 所示,铔尖台波速比平均值为 1.689,波速比时序曲线显示类似正弦波的起伏变化,门源主震前无明显趋势性异常。我们分析认为:铔尖台位于门源地震东北方向的昌马—俄博断裂的附近,该台记录到的发生在冷龙岭断裂和昌马—俄博断裂的地震位于不同的方位,并且记录到的发生在昌马—俄博断裂的地震射线路径不能覆盖门源震源区,这可能是由于铔尖单台曲线起伏变化较大,震前无趋势性变化。龙王山台距离门源 6.4 级主震震中约 95 km,位于其东南方向。如图 5c 所示,龙王山台波速比平均值为 1.704,波速比时序曲线较稳定,2015 和 2016 年略有降低趋势,但幅度较小。该台位于研究区的南部,地震射线路径对冷龙岭断裂有较好覆盖,但部分射线路径偏离门源主震震中位置且距离较远,这可能是门源地震前波速比略有降低趋势但幅度较小的原因。祁连台距离门源 6.4 级主震震中约 136 km,位于其西北方向。如图 5d 所示,祁连台波速比平均值为 1.746,计算得到的波速比的地震较少,未发现异常。这可能与该台离主震较远且地震射线路径对发震断裂的覆盖较差有关。

## 4 分析与讨论

本文利用多台法和单台法计算了门源 6.4 级地震前后震源周边地区的波速比值。多台和单台法计算结果显示,在门源 6.4 级地震前一年,波速比存在降低之后回返的过程,但相对整个研究时段内波速比的起伏变化,异常并不明显。单台法计算

的结果显示,门源单台波速比从 2014 年初开始至门源地震前存在一段时间波速比低值异常,其它台站波速比变化稳定或异常不明显。分析认为:由于地震和台站分布的不均匀,并且计算需要一定的地震样本量,多台法计算使用的地震射线路径无法很好地覆盖门源 6.4 级地震的孕震区域,各地震射线路径存在差异,多台平均计算方法的平均效应将异常减弱,导致异常不显著。而门源单台与研究区绝大部分地震的路径覆盖了门源地震震源区,且离主震距离较近,可以较好反映震源区地壳介质物性变化。

本研究基于青海省台网给出的震相报告分析了门源 6.4 级地震前后波速比变化,研究结果受到多方面因素的影响:首先是研究区的选取及地震射线路径覆盖范围的影响;其次也会受到地震定位精度、震相读取误差等因素的制约。虽然在研究过程中对数据进行了筛选,结果还是通过统计平均的方法得到。对于得到的结果,仍需利用数字地震学,从实际记录到的波形中找到更为确凿的波速变化证据。

## 参考文献:

- 冯德益,郑斯华,盛国英等. 1976. 我国西部地区一些强震及中强震前后波速比异常的初步研究(一)——波速比异常[J]. 地球物理学报,19(3):196-205.
- 冯德益. 1981. 地震波速异常[M]. 北京:地震出版社.
- 冯德益. 1988. 地震波理论和应用[M]. 北京:地震出版社.
- 冯建刚,代伟,董治平等. 2009. 青藏高原东北缘平均波速比的测定和研究[J]. 西北地震学报,31(1):61-65.
- 李善邦. 1981. 中国地震[M]. 北京:地震出版社,522.
- 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[J]. 地震学报,36(3):425-432.
- 李永华,田小波,吴庆举等. 2006. 青藏高原 INDEPTH-III 剖面地壳厚度与泊松比:地质与地球物理含义[J]. 地球物理学报,49(4):1037-1044.
- 刘文邦,王培玲,马玉虎等. 2014. 青海东北部地区多台波速比研究[J]. 地震研究,37(增刊1):45-49.
- 王林瑛,李艳娥,李芳等. 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.
- 王林瑛,李艳娥,郑需要等. 2014. 芦山  $M_s 7.0$  强震前单台波速比变化特征研究. 地震学报,36(1):42-58.

## Research on Variation of Wave Velocity Ratio before and after Qinghai Menyuan $M_s6.4$ Earthquake in 2016

LIU Wenbang, WAN Yujie, LI Weijie

(*Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China*)

### Abstract

Based on the observation report of seismic phases recorded by Qinghai Seismic Network from Jan. ,2009 to Apr. ,2016, we study the variation characteristics of wave velocity ratio before and after the 2016 Menyuan  $M_s6.4$  earthquake by using multi-station method and single station method. The results shows that the wave velocity ratio calculated by the multi station method shows a low value change which was not significant in one year before the earthquake. The wave velocity ratio calculated by the single Menyuan station shows a low value change from the beginning of 2014 to 2015, then returns to the average value, while the ratios of other stations dot's show abnormal change. The reason of the obtained result maybe have the relation with the multi – station average reduced the abnormity and the coverage of the source region by the seismic ray path.

**Key words:** Menyuan  $M_s6.4$  earthquake; wave velocity ratio; Wadati method; single station method