

甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震序列波速比变化特征研究^①

张 博^{1,2}, 冯建刚^{1,2}, 张 辉^{1,2}, 姜佳佳^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要:收集了甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震序列固定台站和震后 6 个流动台站震相观测报告,提取了 P 波、S 波走时信息,采用多台和达法计算该地震序列波速比,发现震后较强余震发生前波速比趋势性下降的特征。这对后续震情跟踪和趋势判定过程中强余震预测有一定的参考价值和指示意义。

关键词: 岷县漳县 $M_s6.6$ 地震; 地震序列; 波速比; 多台和达法

中图分类号: P315.31

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)03-0557-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0557

Study on Wave Velocity Ratio(v_p/v_s) Variation Characteristics of Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake Sequence, Gansu Province

ZHANG Bo^{1,2}, FENG Jian-gang^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}, JIANG Jia-jia^{1,2},

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Collecting fixed stations and six ambulatory stations observational report of Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ earthquake sequence, extracting travel-time information of P-wave and S-wave, using the multi-station method to compute wave velocity ratio of this earthquake sequence. The results show that there is a decreasing trend of velocity ratio before strong after-shocks. It is of reference value and indicative significance on the short-imminent term prediction of strong after-shocks.

Although the wave velocity ratio anomaly is still a controversial issue, domestic and foreign scholars have made some achievements in theory and practice. In 1928, the Japanese seismologists Wadati Kiyoo first proposed the calculation method of wave velocity ratio: multi-station method. In 1962, the Soviet Union scholar Semionov published the first results of velocity abnormal in Garm region, found wave velocity anomaly and wave velocity ratio anomaly before earthquake magnitude greater than 3.5. In the early 1970s, Japan, the United States and other countries have also found a lot of wave velocity anomaly before earthquake. Especially American scholar Aggarwal found the change of wave velocity ratio anomaly before several small earthquake (the maximum magnitude is 3.3) in earthquake group and proposed to explain the anomalous with DD mode. At the same time, domestic scholars got some useful results in this field. In 1970s, Feng et al. summed up in the evolution of the crust, physical properties of medium will produce a series of changes, such as the emergence of micro fracture, expansion, seismic waves through the earth's crust medium, and velocity will change accordingly, which is an important basis for the study of the wave velocity ratio of the medium. Wang et al. (2011) made a further re-

① 收稿日期: 2013-08-31; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2013068

基金项目: 中国地震局兰州地震研究所地震科技发展基金(2013Q02); 国家自然科学基金(41304048)

作者简介: 张 博(1986—), 男(汉族), 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要从事地震活动性与数字地震波的应用研究工作

search of variation characteristics of wave velocity ratio before and after the Wenchuan earthquake. Feng et al. (2009) studied the average wave velocity ratio in the northeastern margin of Qinghai-Tibetan Plateau, and found that there is a certain difference in the spatial distribution of wave velocity ratio. Li et al. (2006) found strong aftershock wave velocity ratio before trend decline.

Based on the previous theoretical and the actual data, we conclude that the average wave velocity ratio of this sequence is 1.713, which is consistent with the results of Feng et al. (2009). It is a different levels of wave velocity ratio decline trend before the aftershocks with $M_L \geq 3.0$ occurred. Most of the aftershocks with $M_L \geq 3.0$ occurred in the process of the wave velocity ratio of sequence pick-up after down to the lowest, however, only a few aftershocks with $M_L \geq 3.0$ occurred while wave velocity ratio in the process of down to the lowest.

Key words: Minxian-Zhangxian $M_s 6.6$ earthquake; earthquake sequence; wave velocity ratio; multi-station method

0 引言

地震波携带着震源和介质变化的大量信息。波速比作为地震波的运动学特征,可以捕捉大震前后的异常变化信息,通过对波速比变化的时间、幅度、形态的研究,找出与强震的对应关系^[1]。

国外对地震前波速和波速比的测定与研究起源于上世纪 20 年代^[2],在理论和实践上都取得了较大的进展。1928 年日本地震学家和达清夫首先提出和达法求波速比,他指出对一个地震以一组台站记录的 P_g 波走时 t_p 和 S_g 波走时 t_s 之差拟合直线求得斜率,再加 1 即为波速比^[3]。1962 年苏联学者谢苗诺夫发表了研究加尔姆地区波速异常的初步结果,发现在震级约大于 3.5 级的地震发生前都可观测到波速和波速比异常^[3]。20 世纪 70 年代初日本、美国及其他国家也相继发现了许多地震前的波速异常,特别是美国学者 Aggarwal 等^[4]发现了蓝山湖震群中几次小地震(最大震级为 3.3 级)前波速比的异常变化,并提出用 DD 模式解释波速异常。在国际上对波速比异常仍然存在争议的情况下,国内学者在此方面的研究取得了一定的进展和成果。20 世纪 70 年代我国学者冯德益等^[5]总结出在地壳演化过程中介质的物理性状将产生一系列变化,如出现微破裂、扩容,地震波通过地壳介质时,波速也会相应发生变化,这是利用波速比研究介质物性的重要依据;王林瑛等^[6]研究了汶川地震前后波速比的变化特征,通过地震波速提取和监控地下介质物性的变化,对深入认识巨大地震的发震机理和演化过程,探索预测途径提供了依据;冯建刚等^[2]研究了青藏块体东北缘地区的平均波速比,发现波速比在空间分布上有一定差异,甘东南(北纬 34° 以南)波

速比值最高;黎明晓等^[7]研究了云南地区 2000 年以来 6 级以上地震序列的波速比变化,发现强余震之前波速比趋势性下降的特征。

本文利用甘肃“十五”数字地震台网及 6 个流动台站记录到的震相观测报告,采用多台和达法计算岷县漳县地震序列的波速比,结合余震序列的起伏活动特征讨论强余震前波速比的变化特征,试图为强余震的研判提供参考依据。

1 原理和方法

地震波速度和波速比的变化在一定程度上反映了地下岩石状态的变化,岩石破裂实验恰好证明了在破裂孕育过程中主断裂面上纵波速度形态的变化^[8]。波速比的计算方法学者也曾做过总结^[8],主要有和达法、双台求波速比、四震相法、虚拟台站法和联合求波速比法等。因研究区域台站分布相对较多(图 1),故本文采用多台和达法计算岷县漳县序列的波速比。

在理想均匀弹性介质条件下,纵横波速度 v_p 、 v_s 分别与介质泊松比 σ 、杨氏模量 E 和密度 ρ 有如下关系^[9]:

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

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

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1 - \sigma)}{1 - 2\sigma}} \quad (3)$$

根据 P_g 波走时和 P_g 、 S_g 波到时差的线性关系得到波速比值 γ , 同时也可得到相关系数 S_{xy} 和误差 R 的计算公式:

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

$$S_{xy} = \sum_i [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})], \quad x_i = t_{pi}, \quad y_i = \Delta t_i \quad (5)$$

$$R = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}}, \quad \Delta t_i = t_{si} - t_{pi} \quad (6)$$

其中, t_{pi} 为 P_g 波走时, t_{si} 为 S_g 波走时。

2 资料选取

2013 年 7 月 22 日 7 时 45 分甘肃岷县漳县发生 $M_s 6.6$ 地震, 90 分钟后发生了 $M_s 5.6$ 强余震。本次地震发育了丰富的余震序列, 截止 8 月 26 日 08 时共发生余震 130 0 余次, 其中 5.0~5.9 级 1 次, 4.0~4.9 级 1 次, 3.0~3.9 级 9 次。

在岷县漳县 6.6 级地震震中半径 150 km 范围内布设有 13 个“十五”数字地震台站, 地震后围绕震中架设了 6 个流动台站, 提高了余震序列的定位精度(图 1)。

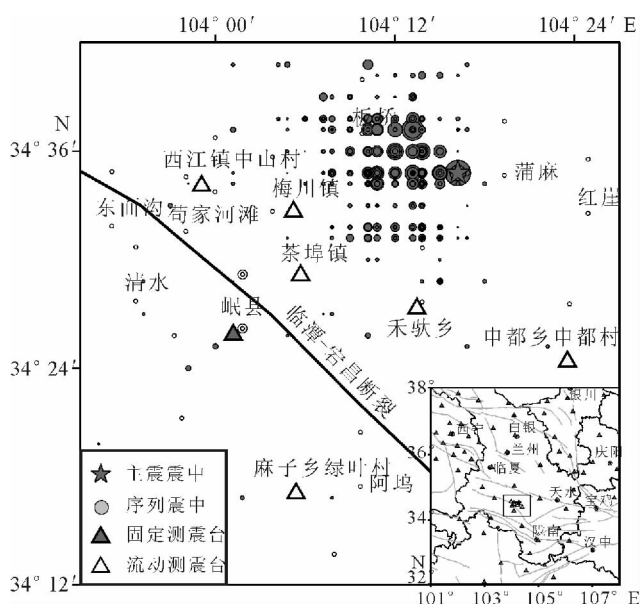


图 1 岷县漳县 6.6 级地震余震序列与台站分布图

Fig. 1 The aftershock sequence of Minxian-Zhangxian

$M_s 6.6$ earthquake and distribution of seismic stations

本文搜集整理了岷县漳县地震后甘肃台网的震相观测报告, 选取直达波 P_g 和 S_g 的震相数据, 采用多台和达法计算公式测定该序列的波速比。

计算中选取同时被 5 个台站记录到的地震事件为有效事件, 序列的相关系数分布如图 2 所示, 其中

相关系数在 0.97~1 之间的地震事件为 902 次, 占本次计算所有地震次数的 82.5%, 平均相关系数为 0.997 4。统计结果表明所有地震事件的相关程度良好, 另外也可以看出地震事件随时间变化过程中相关系数变化不大, 有效范围内大多数地震的相关系数高于 0.99, 这给地震序列波速比变化分析提供了有利条件。

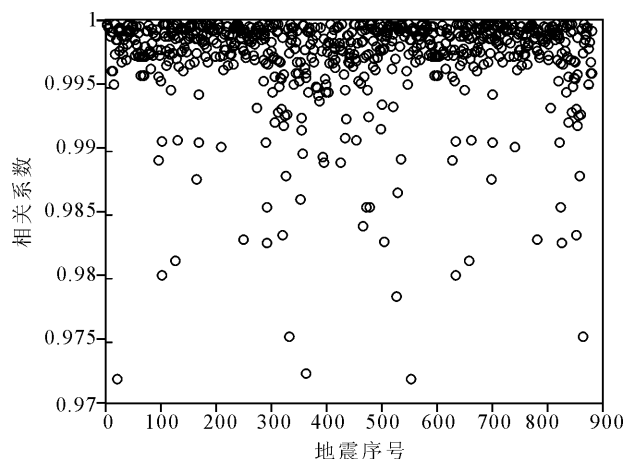


图 2 相关系数统计图

Fig. 2 Statistical graphic of correlation coefficients

3 计算结果分析

图 3 是岷县漳县地震序列中相关系数大于 0.97 的地震事件波速比演化图。从数值变化范围来看, 该序列波速比在 1.613~1.848 之间, 均值为 1.713。为减小单点突跳可能对计算结果造成的影响, 采用 5 点平滑对数据进行处理, 得到了与实际波速比变化步调基本一致的平滑曲线。从图 3 中可以看出, $M_L 3.0$ 以上余震发生前波速比都有一个趋势性下降的过程。图 4 为主震发生后 7 天内的地震序列波速比演化图和 $M-T$ 图, 我们同样看到了这种趋势性下降的特点。

图 5 给出了波速比随震级变化曲线, 主震波速比高出均值 0.4, 达到 1.753; 震级小于 $M_L 2.0$ 以下的地震波速比波动较大, 随着震级逐渐增大, 波动范围越来越小。因较大余震样本量较少, 其变化关系不太明显。

4 结论

本文通过研究 2013 年 7 月 22 日甘肃岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震序列波速比得到如下认识: 该序列平均波速比为 1.713, 与 2009 年冯建刚等^[2]测定的该区域波速比结果一致; $M_L 3.0$ 以上余震出现前序列波速比都出现了不同程度的趋势性下降, 而多数 M_L

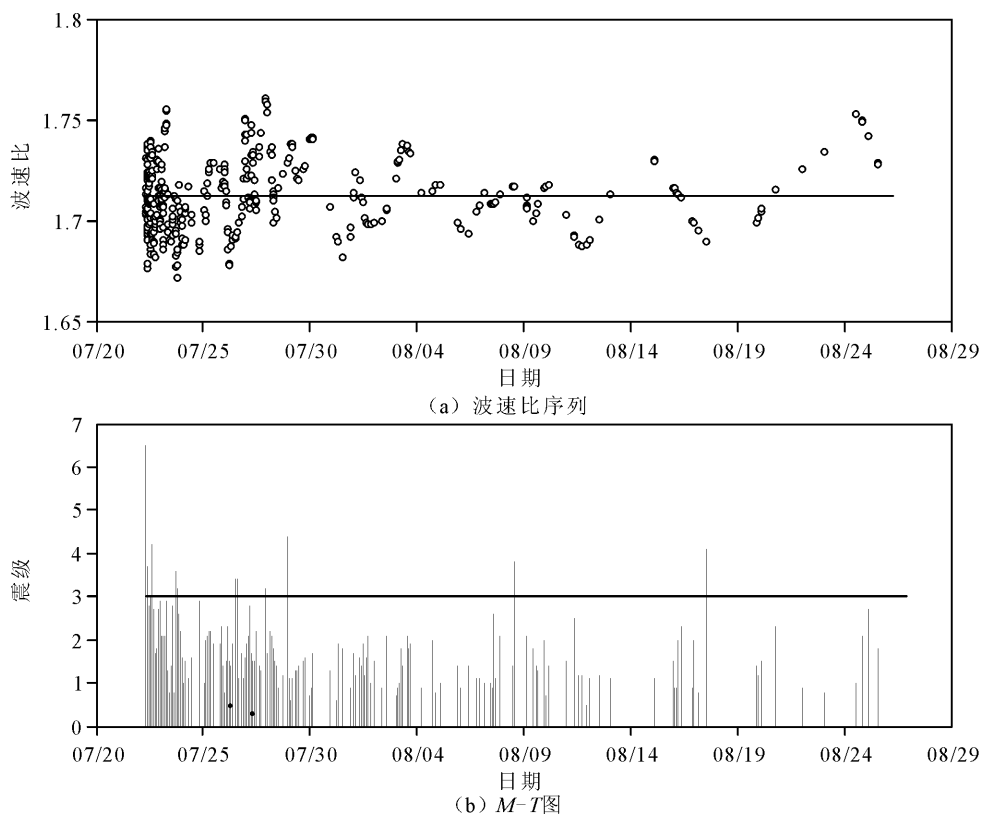


图3 岷县漳县地震序列波速比演化曲线与序列 $M-T$ 图

Fig. 3 Variation of v_p/v_s with time and $M-T$ graph of Minxian—Zhangxian earthquake sequence

3.0 以上余震均发生在序列波速比下降出现拐点后回升的过程中,仅有个别 $M_L 3.0$ 以上余震发生在序列波速比下降过程中。

参考文献 (References)

- [1] 李海兵, 王宗秀, 付小方, 等. 2008 年 5 月 12 日汶川地震 ($M_s 8.0$) 地表破裂带的分布特征[J]. 中国地质, 2008, 35 (5): 803-813.
LI Hai-bing, WANG Zong-xiu, FU Xiao-fang, et al. The Surface Rupture Zone Distribution of the Wenchuan Earthquake ($M_s 8.0$) Happened on May 12th, 2008[J]. Chinese Geology, 2008, 35(5): 803-813. (in Chinese)
- [2] 冯建刚, 代伟, 董治平, 等. 青藏块体东北缘平均波速比的测定及研究[J]. 西北地震学报, 2009, 31(1): 61-65.
FENG Jian-gang, DAI Wei, DONG Zhi-ping, et al. Determination and Study on Average Seismic Velocity Ratio (V_p/V_s) in Northeastern Margin of Qinghai—Tibet Block[J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, 31(1): 61-65. (in Chinese)
- [3] 傅征祥, 程燕. 北京和张家口地区地壳平均波速比的联合测定[J]. 地震, 1988, 8(4): 28-34.
FU Zheng-xiang, CHENG Yan. Joint Determination of Crust Wave Velocity Ratio in Beijing and Zhangjiakou Region[J]. Earthquake, 1988, 8(4): 28-34. (in Chinese)
- [4] Aggarwal Y P, Sykes L R, Ambruster J, et al. Premonitory Changes in Seismic Velocities and Prediction of Earthquakes [J]. Nature, 1973, 241 (5385): 101-104.
- [5] 冯德益. 地震波速异常[M]. 北京: 地震出版社, 1981.
FENG De-yi. Anomalies of Seismic Velocity [M]. Beijing: Seismological Press, 1981. (in Chinese)
- [6] 王林瑛, 李艳娥, 李芳, 等. 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, 2011, 33(1): 1-14.
WANG Lin-ying, LI Yan-e, LI Fang, et al. Temporal Variation of V_p/V_s , V_p and V_s before and after 2008 Wenchuan Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2011, 33(1): 1-14. (in Chinese)
- [7] 黎明晓, 刘杰. 云南地区地震序列的波速比 (V_p/V_s) 异常研究[J]. 地震, 2006, 26(1): 26-34.
LI Ming-xiao, LIU Jie. Study on Velocity Ratio (V_p/V_s) Anomaly of Earthquake Sequences in Yunnan Region[J]. Earthquake, 2006, 26(1): 26-34. (in Chinese)
- [8] 黎明晓, 张晓东. 应用多站法测定华北地区地壳的平均波速比[J]. 地震, 2004, 24(1): 163-169.
LI Ming-xiao, ZHANG Xiao-dong. Determining Average Seismic Velocity Ratios (V_p/V_s) in the Crust in North China Region by Multi-station Method[J]. Earthquake, 2004, 24(1): 163-169. (in Chinese)
- [9] 李善邦. 中国地震[M]. 北京: 地震出版社, 1981.
LI Shan-bang. Chinese Earthquake [M]. Beijing: Seismological Press, 1981. (in Chinese)
- [10] 王志铨, 李源. 汶川地震余震区波速比与强余震的关系[J].

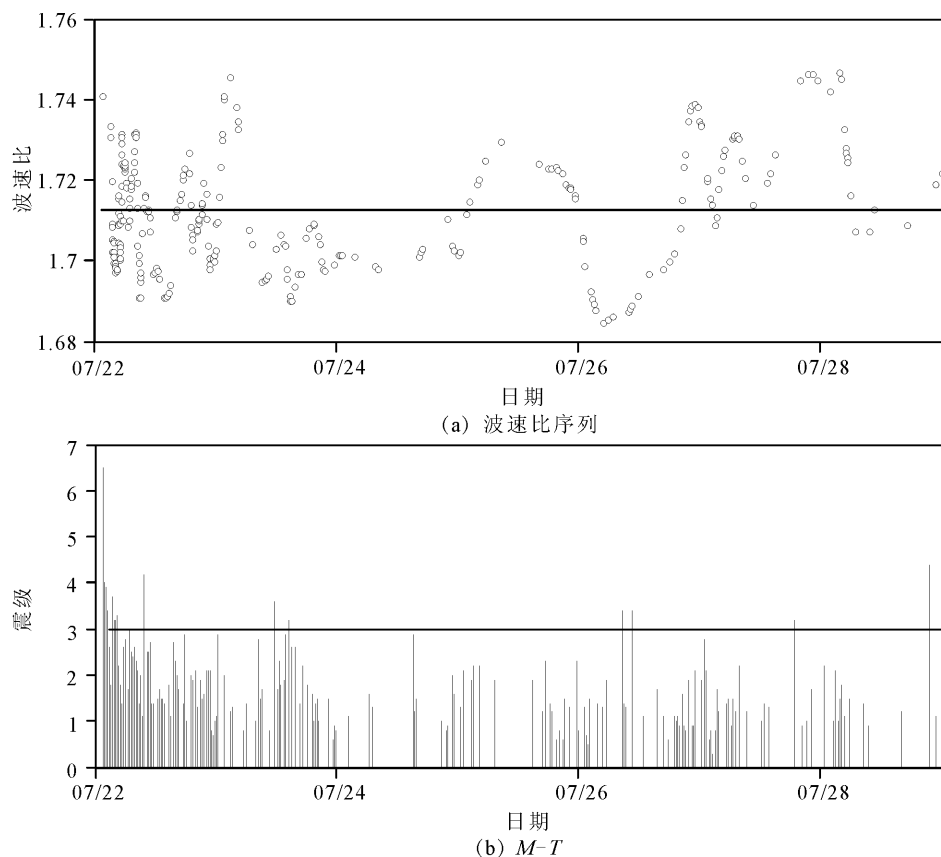
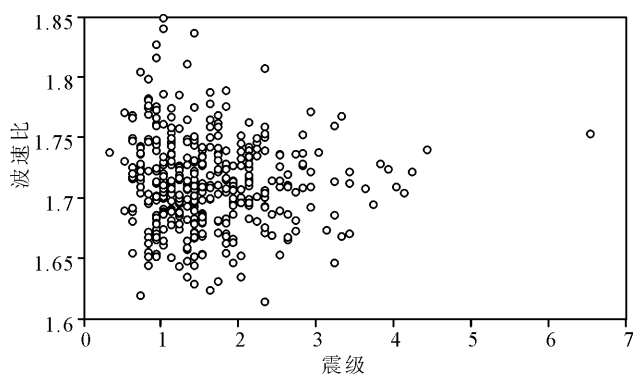
图4 7月22日至7月29日波速比演化曲线与序列 $M-T$ 图Fig. 4 Variation of v_p/v_s with time and $M-T$ graph Minxian-Zhangxian earthquake sequence from July 22nd to July 29th

图5 波速比与震级关系

Fig. 5 Relationship between wave velocity ratios and earthquake magnitudes

山西地震, 2012, (1):2.

WANG Zhi-shuo, LI Yuan. The Relationship between Wave Velocity Ratio and Strong Aftershocks in Wenchuan After-shock Zone[J]. Earthquake Research in Shanxi, 2012, (1): 2. (in Chinese)

- [11] 冯建刚, 蒋长胜, 韩立波, 等. 1970 年以来甘肃台网地震观测报告收集整理及其重新定位研究[J]. 西北地震学报, 2012, 34(3): 289-293.

FENG Jian-gang, JIANG Chang-sheng, HAN Li-bo, et al.

Collection and Reestablish Work for the Earthquake Observation Reports of the Gansu Seismographic Network since 1970 and Earthquake Relocation[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(3): 289-293. (in Chinese)

- [12] 龙海英, 聂晓红, 唐兰兰. 新疆乌苏 5.1 级地震前波速比异常震例研究[J]. 地震研究, 2011, 34(2): 126-130.

LONG Hai-ying, NIE Xiao-hong, TANG Lan-lan. Study of the Abnormity of Wave-velocity Ratio before $M_s 5.1$ Wusu Earthquake in Xinjiang[J]. Journal of Seismological Research, 2011, 34(2): 126-130. (in Chinese)

- [13] Whitcomb J H, Garmany J D, Anderson D L. Earthquake Prediction: Variation of Seismic Velocities before the San Fernando Earthquake[J]. Science, 1973, 180: 632-641.

- [14] Gupta I N. Premonitory Seismic-wave Phenomena before Earthquakes near Fairview Peak, Nevada[J]. BSSA, 1975, 65 (2):425-437.