华东三分区波速比时空特征分析与研究①

吴 密[1]，刘泽民[2]，章 兵[1]，王 群[1]，徐 强[1]，谢瑞杰[3]

（1.铜陵市地震信息中心，安徽 铜陵 244000；2.安徽省地震局预报中心，安徽 合肥 230000；
3.铜陵市地震台，安徽 铜陵 244000）

摘要：对华东三个活动地块区进行了波速比时空对比分析，发现：各活动块区的波速比曲线随时间变化形态差异较大，目前仅鲁东黄海块体处于波速低值异常，但是异常幅度比较小，短期内发生中强地震的可能性不大；空间分布上主要以低值异常为主，近三年的波速比低值异常主要集中在山东南部地区。同时结合安庆 M_S4.8、高邮M_S4.9等震例，在震前高值区会明显出现大范围离散-收敛（发震）-离散现象。

关键词：华东地区；活动地块；和达法；波速比

中图分类号：P315.31 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－0844(2014)04－1033－06

DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2014.04.1033

Analysis of Spatiotemporal Characteristics of Wave Velocity Ratio in Three Seismically Active Blocks of East China

WU Mi[1], LIU Ze-min[1], ZHANG Bing[1], WANG Qun[1], XU Qiang[1], XIE Rui-jie[3]

(1.*Earthquake Information Center of Tongling Seismological Bureau*, *Tongling*, *Anhui* 244000, *China*;
2.*Prediction Center*, *Earthquake Administration of Anhui Province*, *Hefei*, *Anhui* 230000, *China*;
3.*Tongling Seismic Station*, *Tongling*, *Anhui* 244000, *China*)

Abstract: Zhang Guomin et al.(2005) presented the Chinese active block division research results, analyzing the regional characteristics of East China seismic geology and seismic activity on three plots.(Comparing seismic wave velocity space and time, we can see that each earthquake block's seismic wave velocity curve changes with time differences. In the eastern part of Shandong Province and in the Yellow Sea seismic block, recent seismic velocity shows low-value anomalies, but the abnormal amplitude is relatively small, and therefore the possibility of moderately strong earthquakes occurring in the short term is small. East China seismic wave velocity distribution in space is connected to low-value anomalies; in nearly three years of seismic wave velocity spatial distribution, East China Earthquake low velocity ratio anomalies were mainly concentrated in southern Shandong Province. Analyzing this together with the Anqing M_S4.8 and Gaoyou M_S4.9 earthquake characteristics, a high-value area before an earthquake will show a significantly large scope of discrete convergence phenomena.

The East China area, which spans the three tectonic units North China, Southern China, and Yellow Sea, has a complex geologic structure. The regional deep fault has an obvious effect on the regional tectonic movement and strong earthquake activity and distribution. The Tancheng-Lujiang (Tan-Lu) fault zone, a great fault across the East China area, spawned the Jiangxi region's

① **收稿日期**：2014-03-06
基金项目：安徽省地震局科研合同制项目(201303)
作者简介：吴 密(1984－)，男，安徽黄山人，助理工程师，主要从事地震监测预报工作.E-mail:ah-tldzj@163.com
通迅作者：刘泽民(1979－)，男，湖南衡东人，高级工程师，主要从事地震监测预报工作.E-mail:liuzemin@163.com

2005 Jiujiang-Ruichang M_S5.7 earthquake, as well as the Dingyuan M_S4.2, Anqing M_S4.8, Ruichang—Yangxin M_S4.9, and Gaoyou M_S4.6 earthquakes. In this fault belt, the intensity and frequency of moderate seismic activity is significantly increased. Studying the East China region, especially the ratio of wave velocity features near the area of the Tan-Lu fault zone, can give a scientific basis for the seismic trend in the region, enhance the use value of seismic station information, and realize the organic combination of earthquake monitoring and prediction.

This study uses the China Earthquake Networks Center earthquake catalog data for the East China area (27°～38° latitude, 111°～125° longitude) to calculate that, for a Richter magnitude where $M_L \geqslant 1$, there were 2 815 events from January 2008 to September 2013, with a seismic wave velocity ratio of 1 834. According to the East China region's boundary and tectonic characteristics, the study area is divided into the North China, Southern China, and the Eastern-Yellow Sea blocks (Figure 1) to study and analyze the data. As Figure 1 shows, the distribution of earthquakes is relatively uniform, and the area of earthquake monitoring station density is high, so that the spatial and temporal characteristics of wave velocity ratio representing the region calculate the wave velocity ratio very well.

Key words: East China; active block; multi-staion method; wave velocity ratio

0 前言

中强地震前孕震区由于应力状态发生变化导致该地区介质的波速比也发生相应的变化，在中强震前的中小地震波传播穿过孕震区时其地震波必将包含孕震区内波速的变化信息。Birch[1] 和 Simmons[2] 等在实验室发现：当围压或含水状态的变化时岩石的弹性波速度会发生变化；Nur[3] 和 Scholz[4] 等在研究波速比时发现，较大地震前，地壳中裂缝增加（波速比下降）和流体的流入（波速比上升）有可能会引起地壳中地震波速度的变化（膨胀扩容模型）。

据岩石样品破裂实验结果，在岩石受压初期波速随压力增大而增加，但在岩石破裂前，当压力超过岩石强度的 50%左右以后波速比却随压力增大而明显下降。因此，研究波速比时空演化特征，并总结中强地震前孕震区的波速比变化规律，将有助于震情跟踪研判。

20 世纪 50 年代以来，国内外陆续开展波速比研究。如美国学者阿加瓦尔发表蓝山湖震群中几次小地震前波速比异常变化，并提出 DD 模式（扩容模式）。上世纪 70 年代我国逐步开展此项研究工作[5-9]，1976 年的松潘—平武 7.2 级大震前波速比负异常现象就是当时发出预报的依据之一。此外安徽及邻区波速比变化研究也在逐步探索研究中，如徐鑫等[10]在安徽及邻区中强震前波速比变化研究中发现 7 次中强震有 5 次存在低值异常，其中以 1995 年苍山地震震例尤为突出。

近年来，随着数字地震观测仪器的改进和台站布局密度加大，以及震相资料的不断积累和观测精度的提高，利用数字地震资料分析中强地震前后地震波速变化特征的研究结果逐渐增多[11-14]，分别对不同区域发生的中强地震和水库地震进行了波速比变化特征的震例研究，对震前存在波速比异常给予了判定。

华东地跨华北、华南和鲁东—黄海块体三个大地构造单元，地质构造复杂，区域性深大断裂对区域构造运动和中强地震活跃程度与分布有着明显的控制作用。郯庐断裂带是中国大陆东部一条巨大的深大断裂，斜贯华东地区，自 2005 年江西九江瑞昌 M_S5.7 地震后，在郯庐断裂带南段相继发生了定远 M_S4.2、安庆 M_S4.8、瑞昌阳新交界 M_S4.6、高邮 M_S4.9地震，断裂带南段的中等地震活动强度和频度显著增强。系统开展华东地区，特别是郯庐断裂带附近地区的波速比研究，不仅能为该地区的震情趋势研判给出科学依据，同时对提升地震台站资料的使用价值，实现地震监测与预报有机结合也有重要意义。本文分别对华东三个分区的波速比进行时空对比分析，以期对波速比异常与中强震的关系进行探讨。

1 计算原理

地震的纵波波速与横波速度之比即为波速比，用 V_P/V_S 表示。日本地震学家和达清夫提出和达法，在假定震源区到地表介质为理想均匀弹性的条

件下，利用地震直达纵波的到时和直达纵波与横波到时差的线性关系，可直接计算出从震源到地表台站的平均介质波速的比值，并将其作为表征上地壳介质总体物性的重要物理参量（李善邦，1981）。利用地震资料求地震波速比的方法有：和达法、四震相法等，本文使用和达法。具体理论公式参考王林瑛、张小涛等研究文献[14-16]。

2　数据资料处理

2.1　时空范围限定

本研究根据国家地震台网中心地震目录资料，挑选华东地区（111°～125°E，27°～38°N）2 815 个 $M_L \geqslant 1.0$地震的震相走时资料，计算 2008 年 1 月至 2013 年 9 月地震波速比值 1 834 个。根据华东地区的边界和构造块体，将研究区划分为三个子区域，分别是华北、华南与鲁东—黄海地块（图 1），并对上述三个分区进行分析研究。从图 1 中的地震分布可以看出，地震分布相对均匀，且该地区地震台站密度较高，因此认为计算其波速比能很好地代表该区域的波速比的时空特征。

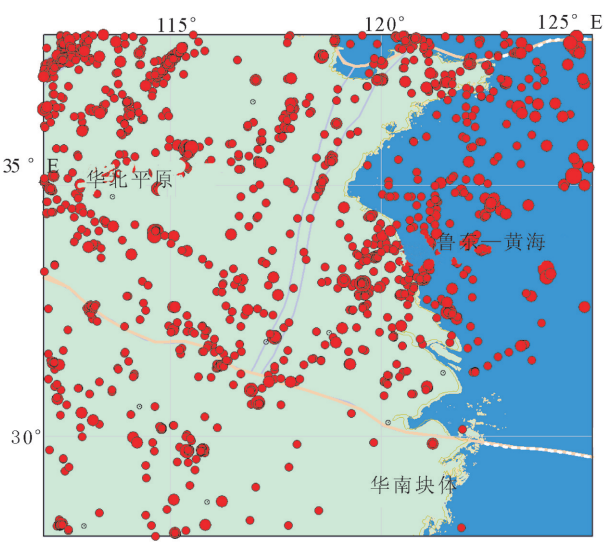


图 1　M_L2.0 以上震中分布图

Fig.1　Distribution of earthquake epicenters with $M_L \geq$ 2.0 in Eastern China

2.2　计算参数

为减少误差，对其计算参数限定如下：①多台直达波到时差的跨度要求≥10 s；②单个地震参与计算的台数在 4 个以上；③要求计算结果的相关系数≥0.995（图 2）；④单个地震的计算误差≤0.05；⑤纵横波到时差 ≤23 s。经过以上限定后，既保证有足够样本数目，同时可剔除部分误差较大或者错误的数据，提高数据的精度和可信度。

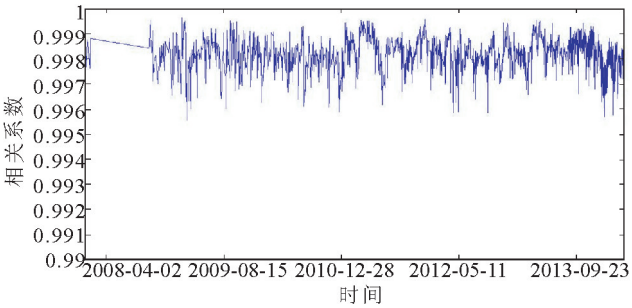


图 2 地震波速比相关系数

Fig.2　The correlation coefficient of seismic velocity ratio

从图 3 可以看出华东地区波速比分布主要集中在 1.64～1.78 范围，比较稳定；同时波速比主要分布于 5～20 个台站数和 5～15 km 震源深度范围。计算精度与记录台站数目密切相关，记录台站数目越多，波速比计算精度越高，波速比值离散度越小。

2.3　计算结果的稳定性分析

（1）为掌握相关系数和台站数目对计算结果的影响，本文选取华东地区 $M_L \geqslant 2.0$ 以上震级段进行研究，发现：相关系数对地震波速比计算结果的影响并不是很大，而参与计算的台站个数对最终求解波速比个数与挑选地震个数影响较大（见表 1）。整个计算过程相对较稳定。

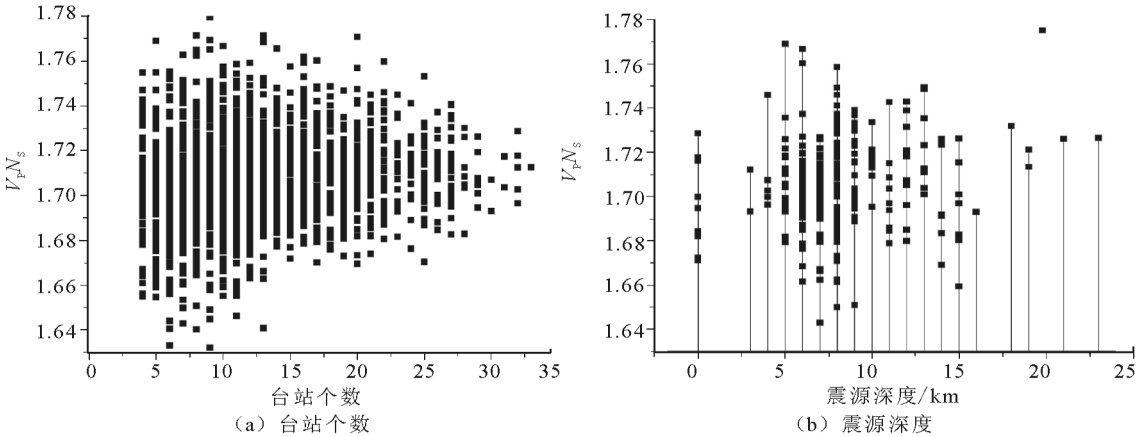
（2）本文分别计算了华北地块 $M_L \geqslant 1.0$、≥2.0、≥2.7 三个震级档波速比曲线和 5 点平滑曲线（图 4），可以看出震级档大小直接影响波速比数据量的多少与曲线的光滑程度，但对波速比曲线整体趋势影响不大，因此对计算结果影响不大。但为了保证结果的精度，在资料足够的时候应尽量降低起始震级。

表 1　地震波速比相关系数、台站数目

Table 1　Seismic wave velocity correlation coefficient, the number of seismic stations

序号	台站数目	相关系数	波速比个数	地震个数
1	4	0.980	1 235	1 834
	4	0.990	1 235	
	4	0.995	1 235	
2	6	0.980	1 175	1 733
	6	0.990	1 175	
	6	0.995	1 175	
3	8	0.980	1 050	1571
	8	0.990	1 050	
	8	0.995	1 050	

（3）由于单个地震波速比计算可能含有一定的误差，因此原始曲线突跳较大（图 4(a)），不利于分



(a) 台站个数 (b) 震源深度

图 3 波速比与地震震源深度、台站数关系

Fig.3 The relationship between the wave velocity ratio, focal depths and the number of seismic stations

析长时段波速变化。本文采用 5 点数据平滑，对曲线进行平滑处理，这样有利于突显曲线信息量，同时也可以降低单个地震误差干扰。

3 波速比时空分析

3.1 时间分析

本文对波速比曲线进行了标准差计算，经多次研究确定当波速比值高于或低于 5 点滑动曲线波速比值的一个标准差为异常，并对波速比震例总结与异常判断做了重新研究和分析。

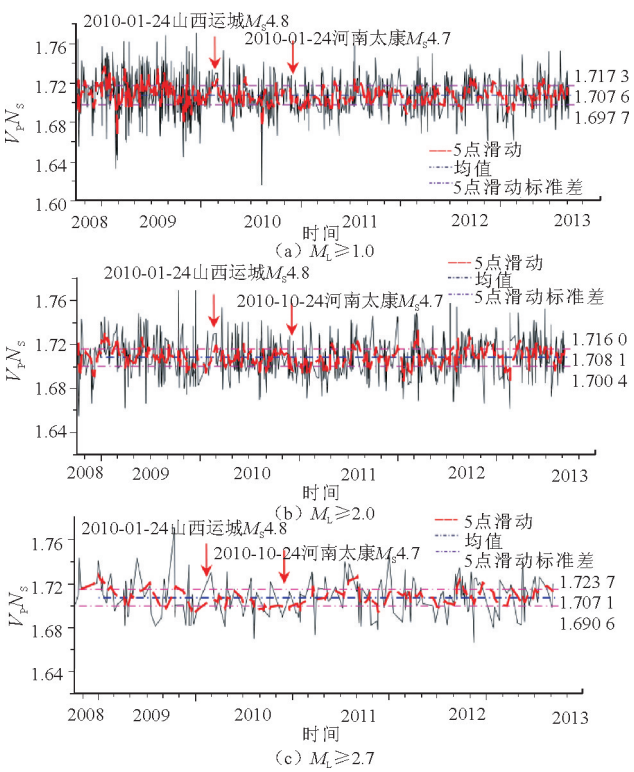


图 4 华北块体地震波速比时间曲线

Fig.4 The seismic wave velocity ratio curves in north China block

(1) 图 4 为华北块体各震级档波速比时间进程对比曲线。2010 年山西运城 M_S4.8、河南太康 M_S4.7 两次中等地震前，波速比存在很明显的低值异常持续时段。特别是 $M_L \geqslant 2.7$ 曲线(图 4(c))，异常信息较为突出，其中红色曲线为 5 点滑动曲线，更能突显出该项信息。2013 年上半年华北块体存在持续时间较短、幅度较小的异常变化，目前恢复。因此认为该块体波速比时间变化未出现明显的异常，短期内发生中强震可能性不大。

(2) 图 5 为华南块体波速比时间进程曲线，可以看出，2011 年安庆 M_S4.8、瑞昌 M_S4.6 地震前，波速比原始曲线存在中期的持续低值异常，异常时间尺度为 2008 年 10 月—2009 年 9 月，存在持续低值 1 年左右，然后持续高值至发震。安庆地震后也存在类似持续低值一年多的曲线特性，然后在高值段持续一段时间，目前已从低值转为高值，应动态跟踪后续波速比实时变化。

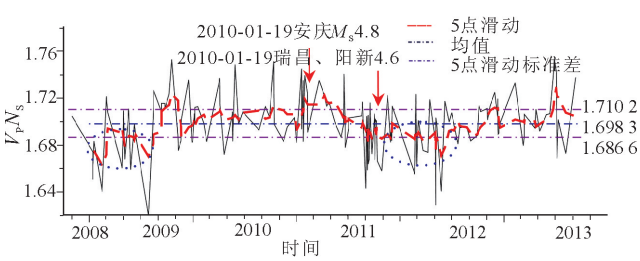


图 5 华南块体地震波速比时间曲线

Fig.5 The seismic wave velocity ratio curves in Southern China block

(3) 图 6 为鲁东—黄海块体波速比时间进程曲线。可以看出，2012 年高邮 M_S4.9 震前波速比存在波动低值异常，然后逐步回升正常范围波动，最后在低值区发震。$M_L \geqslant 2.7$ 地震波速比时间进程曲线

(图 6(b))显示该地区的波速比处于低值异常状态，应注意中长期的曲线动态。

(4) 三分区波速比值曲线形态各一，存在差异。华北块体波速比(V_P/V_S)为 1.708 1，五点滑动波速比值的标准方差为±0.007 792；华南区域平均波速比(V_P/V_S)为 1.698 3，五点滑动波速比标准方差为± 0.011 838；鲁东黄海区域平均波速比值接近于理想弹性介质中的波速比值 1.713 2，五点滑动波速比标准方差为 ± 0.011 372。鲁东黄海区域明显明显高于其它 2 个区域的平均波速比，这在一定程度上也表征了其地下介质的区域差异较为显著。

3.2　空间分析

从 2009—2013 年 2 年一度的波速比时空扫描分布图(图 7(a～d))可看出，华东地区在中强震前均有不同程度的震兆信息反映。2009—2010 年华东地区波速比低值异常区主要集中在皖东南地区，其后发生安徽安庆 M_S4.8 地震；2011—2012 年华东地区波速比低值异常区主要集中在山东南部和江苏北部地区，并在异常区内发生江苏高邮 M_S4.9 地震。从近三年的波速比空间分布可以看出，华东地区波速比低值异常主要集中在山东南部地区，2013 年异常范围有所收缩，因此认为未来一年或稍长时间苏鲁交界地区有发生中强地震的可能。

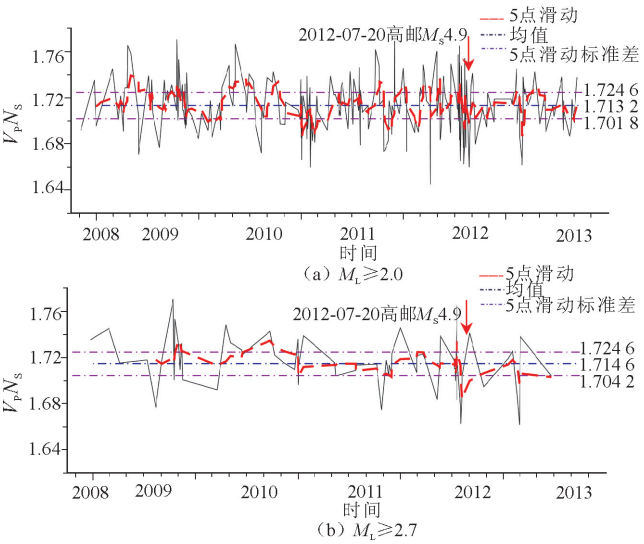


图 6　鲁东—黄海块体地震波速比时间曲线

Fig.6　The seismic wave velocity ratio curves in Eastern Shandong and the Yellow Sea block

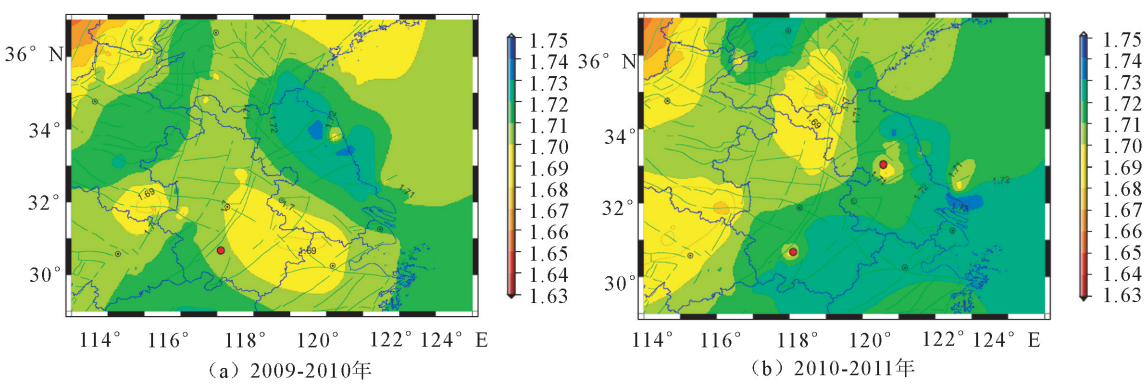


图 7　华东波速比空间分布

Fig.7　The distribution of wave velocity ratio in Eastern China

4　结论与讨论

通过对华东地区 2008 年 1 月—20013 年 8 月 16 日以来地震波速比资料分析发现：

(1) 对比分析华北、鲁东黄海地块 M_L2.0 与 M_L2.7 震级波速比曲线，可知震级大小直接影响波速比数据量的多少与曲线的光滑程度，但对波速比曲线整体趋势影响不大，即波速比时间进程具有很好的同步性，说明计算结果稳定可靠。

(2) 华东三个研究区域波速比时间特征：华北块体波速比目前已经恢复，因此认为该块体波速比时间变化未出现明显的异常；华南块体短期内未发现低值异常，应动态跟踪后续波速比实时变化；鲁东—黄海块体 M_L≥2.7 地震波速比时间进程曲线显示该地区的波速比处于低值异常状态，由此推断未来一段时间内中等地震发生的危险性在逐步增大。各震例在波速比曲线中形态各异，显示了该区地震地质介质的复杂性、地震机制的多样性和震兆信息的非单一性等特点，对震例的总结确实很难把握。

(3) 华东区域波速比空间特征：从 2009—2013 年 2 年一度的波速比时空扫描分布图可看出，该区的波速比分布主要以低值异常为主；从近三年的波速比空间分布可以看出，华东地区波速比低值异常

区主要集中在山东南部地区，2013 年异常范围有所收缩，因此认为未来一年或稍长时间内苏鲁交界地区值得关注。山东南部海域中无地震观测台站，对海域地震的记录分析也存在盲区。大陆上的台站用于定位，一是震中距较远，其次大都偏于一个方位内，海域地震震相分析误差较大，对数据分析精度上难以把握，因此地震定位精度会相对较低，求得的波速比信度同样会受到影响。

（4）由于研究区内数字地震资料有待进一步收集完善，同时较大地震数目偏少，特别对南黄海 2011-01-12、2013-04-21、2013-05-18 几次 M_S5.0 左右边界地震的认识上，还存在差异，能总结出规律性的东西不是很多，尤其是在分析预报的应用上还要更进一步的深入研究和探讨。

致谢：此文在整个研究形成过程中应用了中国地震局地球物理研究所王林瑛、李艳娥等老师编写的程序，同时，审稿者对本文提出了诸多有益建议，在此一并感谢！

参考文献(References)

[1] Birch F. The Velocity of Compressional Wave in Rocks to 10 Kilobars[J].J Geophys Res，1960，65：1083-1102.

[2] Simmons G. Velocity of Shear Wave in Rocks to 10 Kilobars [J].J Geophys Res，1964，69：1123-1130.

[3] NUR A Dilatoncy. Pore Fluid and Premonitory Varations of t_S/t_P，Travel Times[J].BSSA，1972，62(5)：2322-2330.

[4] Scholz C H，Sykes L R. Aggarwol Y P. Earthquake Prediction：Aphysical Basis[J].Science，1973，181(4)：102.

[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] 梅世蓉，冯德益，张国民，等.中国地震预报概论[M].北京：地震出版社，1993：78-80.
MEI Shi-rong，FENG De-yi，ZHANG Guo-ming，et al. Introduction to Earthquake Prediction China[M]. Beijing：Seismological Press，1993：78-80.(in Chinese)

[7] 傅淑芳. 地震学教程(下)[M].北京：地震出版社，1980.264-270.
FU Shu-fang.Seismology Tutorial (Lower) [M].Beijing：Seismological Press，1980：264-270.(in Chinese)

[8] 徐果明，周惠兰.地震学原理[M].北京：科学出版社，1982：426-427.
XU Guo-ming，ZHOU Hui-lan. Seismology Theory[M]. Beijing：Science Press，1982：426-427.(in Chinese)

[9] 陆远忠，陈章立.地震预报的地震学方法[M].北京：地震出版社，1985.
LU Yuan-zhong，CHEN Zhang-li. Seismic Method for Earthquake Prediction[M]. Beijing：Seismological Press，1985.(in Chinese)

[10] 徐鑫，刘东旺，刘泽民.安徽及邻区中强震前波速比变化研究[J].华北地震科学，2013，31(1)：16-19.
XU Xin，LIU Dong-wang，LIU Ze-min. Stud on Seismic Velocity Ratio Changing before Moderate-Strong Earthquake in Anhui Province and Its Surrounding Area[J]. North China Earthquake Sciences，2013，31(1)：16-19.(in Chinese)

[11] 黎明晓，刘杰.云南地区地震序列的波速比(V_P/V_S)异常的研究[J].地震，2006，26(1)：26-34.
LI Ming-xiao，LIU Jie. Study on Velocity Ratio(V_P/V_S) Anomaly of Earth-Quake Sequences in Yunnan Region[J]. Earthquake，2006，24(1)：26-34.(in Chinese)

[12] 张小涛，吕坚，马广庆，等.九江—瑞昌地震序列的波速比特征研究[J].华北地震科学，2006，24(4)：36-40.
ZHANG Xiao-tao，LV Jian，MA Guang-qing，et al. Characteristics of V_P/V_S Ratio in the Series of Jiujiang-Ruichang Earthquake[J].North China Earthquake Sciences，2006，24(4)：36-40.(in Chinese)

[13] 张博，冯建刚，张辉，等.甘肃岷县漳县 M_S6.6 地震序列波速比变化特征研究[J].地震工程学报，2013，35(3)：557-561.
ZHANG Bo，FENG Jian-gang，ZHANG Hui，et al. Study on Wave Velocity Ratio(V_P/V_S) Varia Tion Characteristics of Minxian — Zhangxian M_S6. 6 Earthquake Sequence，Gansu Province[J].China Earthguake Engineering Journal，2013，35(3)：557-561.(in Chinese)

[14] 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 Vp/Vs，Vp and Vs before and after 2008 Wenchuan Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica，2011 ，33(1)：1-14.(in Chinese)

[15] 冯建刚，代炜，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 We，DONG Zhi-ping，et al. Determi-Nation and Study on Average Seismic Velocity Ratio(Vp/Vs)in Northeastern Margin of Qinghai-Tibet Block[J]. Northwestern Seismological Journal，2009，31(1)：61-65.(in Chinese)

[16] 张小涛，韩丽萍，张新东，等.河北邯郸—邢台地区波速比和泊松比分布特征研究[J].西北地震学报，2012，34(1)：84-87.
ZHANG Xiao-tao，HAN Li-ping，ZHANG Xin-dong，et al. Distribution Characteristics of Wave Velocity Ratio and Poisson's Ratio in Handan-Xingtai Areas，Hebei Province[J]. Northwestern Seismological Journal，2012，34(1)：84-87.(in Chinese)

[17] 李发，李罡风，张佑龙，等.安庆 4.8 级地震的余震 S 波分裂研究[J].华南地震，2012，32(1)：28-34.
Li Fa，LI Gang-feng，ZHANG You-long，et al. Study on Shear Wave Splitting of Aftershocks of M4.8 Anqing Earthquake[J].South China Journal of Seismology，2012，32(1)：28-34.(in Chinese)