

云南地区波速比异常图像的南北差异

蔡静观, 张喜玲, 李永莉

(云南省地震局, 云南昆明 650041)

摘要:动态追踪了云南地区第4强震活跃期6.3级以上强震前波速比异常图像, 显示出明显的南北差异: 滇西南的1988年11月6日澜沧-耿马7.6、7.2级和1993年1月27日普洱6.3级强震发生在低波速比异常区内; 中缅边境上的1992年4月23日6.7、6.8级和1995年7月12日孟连西7.2级强震发生在低波速比异常区边缘; 而滇西北的1996年2月3日丽江7.0级、1976年11月7日、12月14日宁蒗6.7、6.4级和滇东的1995年10月24日武定6.5级强震却都发生在高波速比异常区内. 强震前近震震级 M_L 与持续时间震级 M_D 的震级差的南北差异也进一步证实了波速比异常的差别.

主题词:波速比异常; 云南; 南北差异

中图分类号: P315.3⁺1; P315.72; **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(1999)04-0363-07

0 前言

波速比作为地震波运动学参数应用于地震预报中, 人们更多地关注其低值异常. 孕震区在应力积累过程中, 微小裂隙的产生使地震波在穿越介质时波速比减小, 从而成为地震的前兆信息^[1-2]. 通常用于解释地震前波速变化成因的主要是扩容-膨胀模式.

在地震预报实践中, 尤其在强震活跃期间多个强震同时孕育过程中, 全地域的波速比图像通常出现大面积低值异常. 为此, 在确定强震的危险区时, 引入了高值异常. 近年来, 梅世蓉教授在研究华北地区的大震时, 从深部构造、力学分析、岩石破裂实验和大震震例等多方面论证了坚固体孕震模式, 提出非均匀地壳中高速扰动体(坚固体)的存在是局部地区应力高度集中的根本条件, 当高速扰动体被低速扰动区包围时, 即震源体的刚度比四周的环境刚度大时, 可以满足失稳条件, 导致突然破裂, 发生大地震; 否则可以导致缓慢破裂而不发生大地震^[3-5]. 作者曾就丽江地震前波速比的动态演化图像和实验结果论述了丽江地震的孕震模式^[6-7], 那么其它地区又怎么样呢? 本文讨论了云南地区第4强震活跃期6.3级以上强震前波速比的异常图像.

1 计算方法简介和资料可信度的论证

1.1 计算方法简介

收稿日期: 1998-08-17

基金项目: 中国地震局“九五”攻关项目(95-04-04)部分研究成果

作者简介: 蔡静观(1946-), 女, 研究员, 主要从事地震学和地震预报研究, 目前在研究多个强震孕育时的场源关系和识别方法.

以和达图为基础,利用震中周围多台资料计算出平均波速比 γ ,假如有 n 个台的数据,则可用最小二乘法计算在均匀介质中,以不同地震台记录到的近震直达 $\bar{P}$ 、 S 波到时 T_{P_i} 、 T_{S_i} 计算波速比

$$\gamma = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta T_i^2 - (\sum_{i=1}^n \Delta T_i)^2}{n \sum_{i=1}^n (\Delta T_i T_{P_i}) - \sum_{i=1}^n T_{P_i} \sum_{i=1}^n \Delta T_i} \quad (1)$$

式中 $\Delta T_i = T_{S_i} - T_{P_i}$.

相关系数 R 和波速比的剩余标准差 S 由下式计算:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{P_i} - \bar{T}_P)(\Delta T_i - \overline{\Delta T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{P_i} - \bar{T}_P)^2 - \sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \overline{\Delta T})^2}} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{(1-R)^2 \sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \overline{\Delta T})^2}{n-2}} \quad (3)$$

其中: $\bar{T}_P = (1/n) \sum_{i=1}^n T_{P_i}$, $\overline{\Delta T} = (1/n) \sum_{i=1}^n \Delta T_i$.

1.2 资料可信度的论证

对波速比计算中的诸如时间服务、震相分析、震源深度、计算方法和介质的不均匀等因素另文作了详细讨论,本文只叙述主要见解.

选取4个以上地震台记录的震相清晰的2.5级以上中小地震,算出每个地震的波速比、误差和相关系数,共3000余次地震.对(3)式中的 S 以0.01的间隔统计地震次数, $S < 0.05$ 的地震次数占65%, $S < 0.10$ 的地震次数占85%.

用于计算波速比的中小地震,震中距一般不超过150 km,震相分辨的差错引起的波速比误差不超过0.10;对93%的地震而言,波速比与震源深度无明显关系.

对那些 $S > 0.20$ 的地震进行分析:除数据点密集成团和时间服务等因素外,能造成波速比较大误差的原因主要是计算方法的局限和介质的横向不均匀性.选取与强震孕震区尺度相当的近台数据来计算波速比以尽量排除非孕震因素的影响和避免大面积的平均掩盖了孕震信息.

在时间上,采用逐月追踪的方法,对强震发生的当月数据逐日追踪.对一些变化不明显的波速比异常图像以年度(上年9月至次年8月)重迭来提高其在年度会商会中的实用性和可操作性,也避免了文章的冗长.波速比高、低值异常的确定以云南地区的多年均值 1.70 ± 0.05 为正常值, $\gamma \geq 1.75$ 为高值异常, $\gamma \leq 1.65$ 为低值异常,为使图像清晰,图中只给出具有波速比高、低值异常的地震震中.

2 强震前波速比的动态演化图像

2.1 滇西南地区强震前波速比的动态演化图像

云南地区第4强震活跃期6.3级以上强震主要发生在滇西南和中缅边境地区,如省内的1988年11月6日澜沧-耿马7.6、7.2级和1993年1月27日普洱6.3级强震,中缅边境的1992年4月23日6.7、6.8级(简称4.23地震)和1995年7月12日孟连西7.2级强震(简称

孟连西地震). 强震前的波速比异常图像以强震发生的时间和异常变化来划分.

图1展示了1986~1997年滇西南地区12 a来1 000多次中小地震的波速比异常空间分布图像,反映出滇西南强震频繁发生过程中波速比异常的动态演化过程.

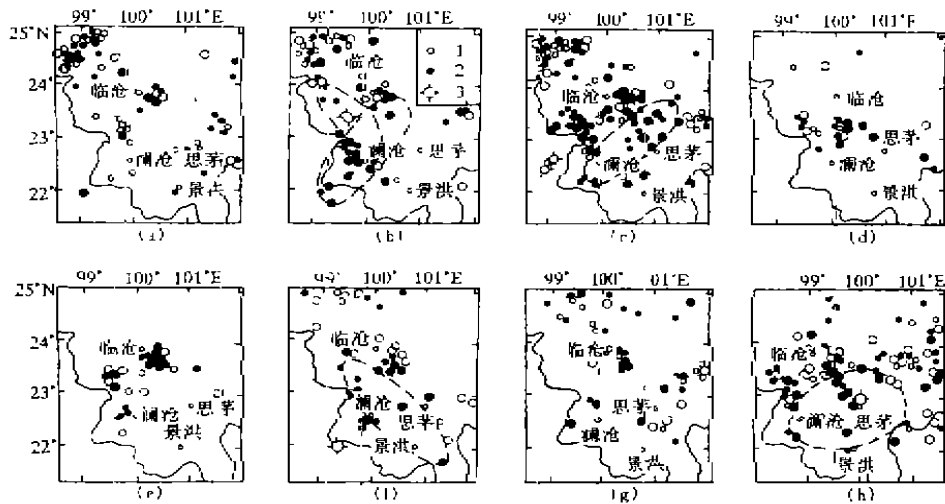


图1 滇西南强震频繁发生过程中波速比的动态演化图像

Fig. 1 The dynamic evolution patterns of v_p/v_s ratio during the strong earthquakes which occurred frequently in southwest Yunnan.

(a) 1985-10~1987-12; (b) 1988-01~10; (c) 1988-11~1992-03;
(d) 1992-04~12; (e) 1993; (f) 1994-01~1995-06; (g) 1995-07~1997-12;
(h) 1989-11~1992-12; 1 波速比高值异常; 2 波速比低值异常; 3 强震震中

澜沧-耿马地区在1988年8月15日澜沧5.0级地震之前近30 a未发生过5级以上地震,该地区的波速比以高值异常为主(图1(a));从1988年开始,波速比出现低值异常,主体形成北东向、长约230 km的低值异常区,沿北西向震源区展布的低值异常区不如北东向明显(图1(b)),图中也以虚线画出,不论低值异常区如何取向,澜沧、耿马两次主震均位于低波速比异常区内;澜沧-耿马地震后至4.23双强震,滇西南地区的波速比主要是低值异常,4.23地震发生在长约200 km的北东向低波速比异常区的边缘(图1(c));4.23地震后,除澜沧、耿马老震区和临沧地区波速比时高时低继续处于应力调整状态外,该地区低波速比异常的地震减少,原低值异常的地区出现高值异常(图1(d)和(e)).1995年孟连西地震前1.5 a左右,滇西南地区的波速比再次出现低值异常,孟连西地震位于长约270 km、北西向的低波速比异常区的边缘(图1(f));孟连西地震后该地区的波速比仍多为低值异常,但长轴的取向转向北东(图1(g)).

滇西南地处边陲,省外地震由于台网的关系,不易观测到波速比异常的全貌,对中缅边境的4.23双强震和孟连西地震,从现有的资料看,地震发生在低波速比异常区的边缘,但省内的澜沧-耿马地震是发生在低波速比异常区内的.再看普洱地震的震例,在1989年9月29日、10月1日缅甸6.4、6.2级双震后,滇西南地区在长达3 a多的时间内,形成长约180 km的低波速比异常区,普洱地震发生在低波速比异常区内(图1(h)).

总体来说,滇西南的省内强震发生在低波速比异常区内,省外强震发生在低波速比异常区的边缘.在低波速比异常区的周围,或被高波速比异常包围,或高、低波速比异常交错发生.

2.2 武定强震前波速比动态演化图像

1985年4月18日禄劝6.3级地震后到1995年10月24日武定6.5级地震发生,其周围

发生数次中强震,强震前波速比的异常图像先以中强震发生的时间,后以异常变化来划分。

1986年10月,1988年4月,1989年9月在武定地震的周围相继发生了5.0~5.4级中强震,震前波速比的异常范围较小,中强震发生在波速比高、低值异常的重叠部位(图2(a)、(b)、(c));但到1990年,该地区明显出现长约270 km、北东向的低波速比异常区(图2(d));1991年在低波速比异常区内出现高波速比异常(图2(e));在1992~1994年的3 a内,波速比的异常图像非常清晰:低波速比异常包围着高波速比异常区,高波速比异常的地震呈北东向排列,展布带长140 km左右(图2(f));武定地震前夕,震中附近地震很少,昭通—东川一带的波速比从低值异常转为高值异常,武定地震发生在高波速比异常区内(图2(g));震后该地区又呈低波速比异常(图2(h))。

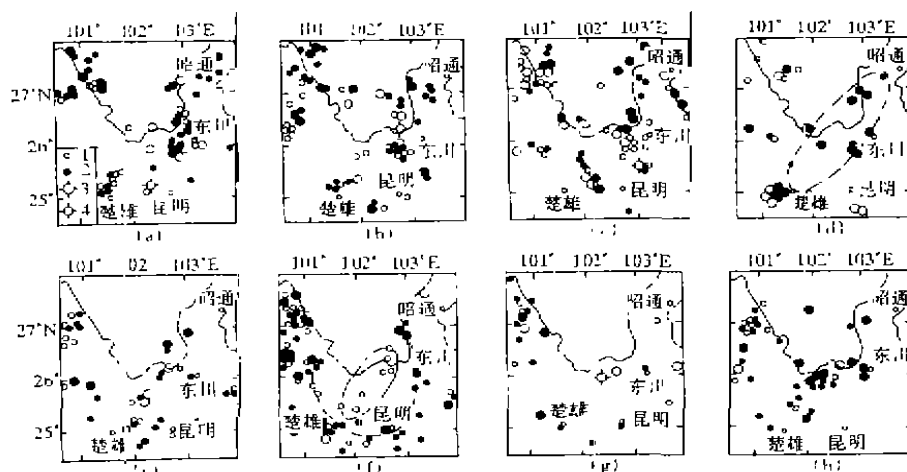


图2 武定强震孕育过程中波速比的动态演化图像

Fig 2 The dynamic evolution pattern of v_p/v_s ratio during the preparation process of the Wuding M6.5 earthquake

(a) 1985-10~1986-10; (b) 1986-11~1988-04; (c) 1988-04~1989-09;

(d) 1990; (e) 1991; (f) 1992~1994; (g) 1995; (h) 1996~1997;

1 波速比高值异常; 2 波速比低值异常; 3 强震震中; 4 中强震震中

2.3 丽江强震前波速比的动态演化图像

丽江强震前波速比动态演化图像已在文献[6]中作了详细追踪描述,作为对照,简单说一下:丽江地区在1993年的大面积低波速比异常后(图3(a)),1994~1995年在丽江地震南形成高波速比异常区,地震发生在高波速比异常区内(图3(b)),震后高波速比异常恢复成低值异常(图3(c)).同样,1976年11月7日,12月14日的宁蒗6.7、6.4级强震也发生在高波速比异常区内[8],本文不另展示图件。

纵观整个云南地区的波速比异常演化图像可以看出,滇西南和中缅边境地区的强震在震前波速比的异常图像与滇西北的丽江、宁蒗地震和滇东的武定地震有着明显的不同,前者发生在低波速比异常区,后者发生在高波速比异常区。

3 其它地震波方法的论证

波速比从地震波的运动学特征反映了介质的变化,其它方法对于滇西南及其边境地区和滇西北、滇东强震前的不同异常特征有没有反映呢?作者在研究1995年云南地区地震趋势时,对近震震级 M_L 和持续时间震级 M_D 的震级差作了探讨,发现丽江、武定地震与孟连西地

震在震前的震级差反向变化(图4)。

近震震级 M_L 由水平分量的 S 波最大振幅计算, 而持续时间震级 M_D 由地震波持续时间计算。震级差 $M_D - M_L$ 通常在 0.3 左右, 丽江、武定地震前 M_D 比 M_L 明显增大(0.3~0.8 级), 但孟连西地震前却是 M_D 比 M_L 明显减小(0.3~0.8 级)。

4 讨论和结论

(1) 强震前波速比异常图像的不同可能反映了孕震模式的不同, 但即使同样发生在高波速比异常区的震例, 在时间进程上也不尽相同。虽然巧家地震台位于禄劝、武定附近, 洱源地震台也位于丽江附近, 但巧家地震台的波速比季均值曲线却反映出禄劝、武定地震是在高波速比后 5 a 才发生的(图 5(a)); 而洱源地震台的波速比月均值曲线在丽江地震前 1 a 左右出现高波速比异常(图 5(b))。同样, 澜沧-耿马地震和孟连西地震前的异常形态也不尽相同(图 5(c))。

地震是复杂的物理过程, 其前兆的复杂性和多样性在波速比异常中也同样存在, 这就启示我们要研究波速比异常图像与孕震模式的关系, 目前研究尚处于起步阶段, 须作进一步的探讨。

(2) 作者从多震的云南地区提出震前高波速比的现象, 在其它地区是否也存在这种现象呢? 在有关波速比的文献中, 山东菏泽 5.9 级中强地震前菏泽地区的波速比异常在震前 8 个

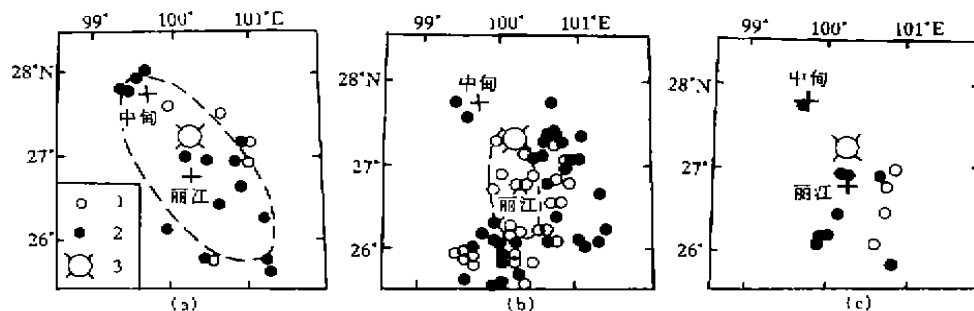


图3 丽江强震孕育过程中波速比的动态演化图像

Fig. 3 The dynamic evolution pattern of v_p/v_s ratio in the preparation process of the Lijiang M7.0 earthquake.

(a) 1993 年; (b) 1994~1995 年; (c) 1996 年;

1 波速比高值异常; 2 波速比低值异常; 3 丽江强震震中

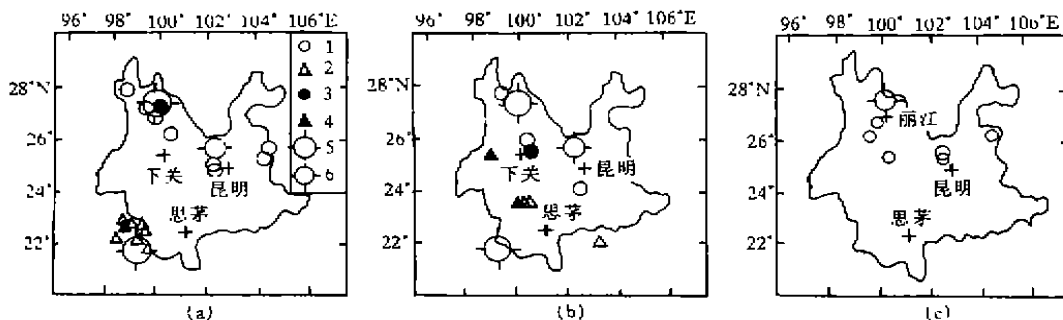


图4 强震前震级差 $M_D - M_L$ 的空间分布图像

Fig. 4 Distribution of difference between near-shock magnitude M_L and continued-time magnitude M_D before strong earthquakes.

(a) 1992 年; (b) 1993~1994 年; (c) 1995 年; 1 $0.3 \leq M_D - M_L \leq 0.8$; 2 $0.3 \leq M_L - M_D \leq 0.8$; 3 $0.9 \leq M_D - M_L \leq 1.1$; 4 $0.9 \leq M_L - M_D \leq 1.1$; 5 强震震中; 6 中强震震中

月出现高值异常。文献[9]中展示的5个单台波速比中出现明显高值异常的菏泽、梁山和嘉祥3个地震台位于震中东10 km和震中东北90 km左右,高值异常不明显的邹县和泰安地震台分别距震中150 km和188 km,在高值异常区的外围(图6(a))且波速比的振荡幅度随距离的增加而减小(图6(b))。

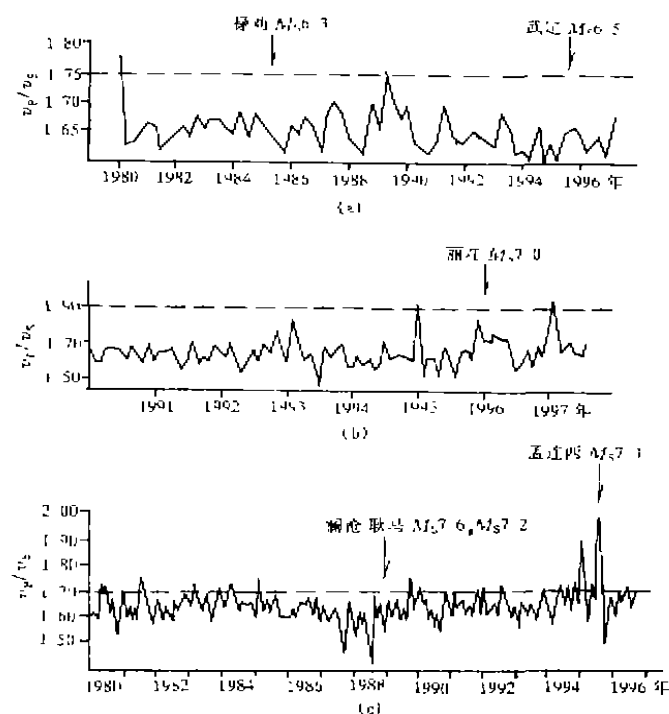


图5 巧家、洱源、澜沧地震台波速比的时间进程图像

Fig. 5 The time history patterns of v_p/v_s ratio at Qiaojia, Eryuan and Lancang stations.
(a) 巧家台; (b) 洱源台; (c) 澜沧台

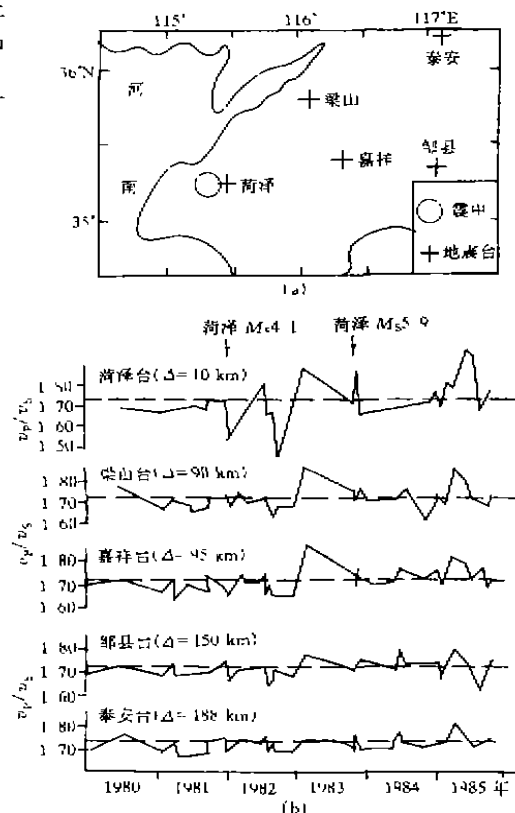


图6 山东菏泽5.9级中强震前波速比时空图像

Fig. 6 The time-space pattern of v_p/v_s ratio before the Heze $M_{5.9}$ earthquake in Shandong
(a) 震中和台站分布;
(b) 单台波速比时间进程曲线

在华东地区也存在高波速比异常的震例,说明震前高波速比的异常也可能适用于其它地区。

通过对云南地区第4强震活跃期6.3级以上强震前波速比异常图像的动态追踪,表明滇西南的1988年11月6日澜沧-耿马7.6、7.2级和1993年1月27日普洱6.3级强震发生在低波速比异常区内;中缅边界上发生的1992年4月23日6.7、6.8级和1995年7月12日孟连西7.2级强震均位于低波速比异常区边缘;而滇西北1996年2月3日丽江7.0级、1976年11月7日、12月14日宁蒗6.7、6.4级和滇东1995年10月24日武定6.5级强震则发生在高波速比异常区内。

强震前近震震级 M_L 和持续时间震级 M_D 的震级差作为一种简单的地震波方法,虽不能明确区分是振幅的变化还是地震波持续时间的变化,但强震前的南北差异也是明显的,进一步证实了波速比异常的南北差异。

[参考文献]

- [1] 梅世蓉. 中国地震预报概论[M]. 北京:地震出版社, 1993. 78~81.
- [2] 冯德益. 地震波理论和应用[M]. 北京:地震出版社, 1988. 420~421.
- [3] 梅世蓉. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(一)——— 固体孕震模式的由来与证明[J]. 地震学报, 1995, 17(3): 273~282.
- [4] 梅世蓉. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(二)——— 强震孕育时应力、应力场的演化与地震活动[J]. 地震学报, 1996, 18(1): 1~10.
- [5] 梅世蓉. 地震前兆场物理模式及前兆分布特征与机制研究进展[J]. 地震, 1995, (增): 2~22.
- [6] 蔡静观. 试说丽江地震高波速比的时空演化过程和孕震模式[J]. 地震研究, 1999, 22(2): 122~129.
- [7] 王彬, 等. 含硬包体试样在破裂孕育过程中波速场的变化[J]. 地震研究, 1997, 21(2): 256~260.
- [8] 蔡静观, 等. 丽江 7.0 级强震前波速比时空演化过程和数值分析[J]. 中国地震, 1999, 15(1): 75~84.
- [9] 周焕鹏. 菏泽 5.9 级地震前后地震波的异常特性[J]. 地震研究, 1989, 12(3): 226~233.

THE DIFFERENCE OF PATTERNS OF v_p/v_s RATIO ANOMALY IN SOUTH AND NORTH OF YUNNAN AREA

CAI Jing-guan, ZHANG Xi-ling, LI Yong-li

(Seismological Bureau of Yunnan Province, Kunming 650041, China)

Abstract

The pattern of v_p/v_s ratio anomaly for $M \geq 6.5$ earthquakes in the fourth activity period in Yunnan area was dynamically traced, it clearly showed the difference in south and north. The Lancang-Gengma $M 7.6$ and $M 7.2$ earthquakes on November 6, 1988 and the Puer $M 6.3$ earthquake on January 27, 1993 in southwest Yunnan occurred in low v_p/v_s ratio anomaly area, the China-Burma border $M 6.7$ and $M 6.8$ earthquakes on April 23, 1992 and the west Menglian $M 7.3$ earthquake on July 12, 1995 occurred along the margin of this area, while the Lijiang $M 7.0$ earthquake on February 3, 1996, the Ninglang $M 6.7$ and $M 6.4$ earthquakes on November 7 and December 13, 1976 and the Wuding $M 6.5$ earthquake on October 24, 1995 occurred in high v_p/v_s ratio anomaly region.

Before strong earthquakes, the north-south difference between near-shock magnitude M_L and continued-time magnitude M_D demonstrated further the difference of v_p/v_s ratio.

Key words: v_p/v_s ratio anomaly; Yunnan; North-south difference