

云南地区强震前波速比、震源深度 及中小地震活动的特征^{*}

李永莉, 毛慧玲, 王世芹, 秦嘉政

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 分析了云南地区第四强震跃期内波速比的变化规律, 探讨了强震孕育过程与波速变化、震源深度变化、中小地震活动的关系, 结果表明: 波速比异常、震源深度变化异常与 3—4 级中小地震活动的异常, 最早出现于云南 7 级地震前 4 年左右, 大多数异常集中出现于震前 2 年左右, 表现为波速比、震源深度异常增多, 震前 1 年左右异常则逐步减少; 伴随着云南第四强震活跃期的开始—结束的过程, 云南地区的波速比也经历了下降—恢复的准同步过程。

关键词: 波速比; 震源深度; 中小地震; 强震活跃期; 云南

中图分类号: P315.72 文献标识码: A 文章编号: 1000—0666(2010)03—0259—06

0 引言

苏有锦等 (2001) 认为, 1900 年以来云南地区的强震活动可分为 4 个活跃期和 4 个平静期。1996 年丽江 7.0 级地震是第四强震活跃期结束的标志, 至今已进入第四强震平静期的第 13 年, 下一个强震活跃期逐步逼近, 提取强震前的震兆异常特征, 预测未来的强震已成为当前刻不容缓的工作。

本文剖析了云南地区强震前波速比和震源深度的变化及中小地震的活动特征, 动态追踪 7 级地震前的异常信息, 寻求可预测 7 级大震的发震时间的依据; 分析了云南第四强震活跃期前后, 云南地区波速比显著低值与强震活动的关系, 并初步探讨了波速变化、中小地震活动与强震孕育之间的机理。

1 资料及思路

云南地区于 1982 年建立区域地震台网, 1986 年前云南部分地区的地震监控能力达 $M \geq 2.5$ 1986 年后云南全省的地震监控能力达 $M \geq 2.5$ 同时也有比较完整的地震波形记录资料。为减少干扰, 保证所

用基础资料的可靠性, 笔者采用云南遥测台网 $M \geq 2.5$ 地震的波形记录及 $M \geq 3$ 地震的定位结果。

大地震的发生具有一定的复杂性及必然性, 其孕育过程中一定范围内的地壳应力会增强, 地下介质也会出现不稳定变化, 并常伴随着中小地震活动的增强或平静异常。波速比、震源深度从不同的角度反应了地下介质的地壳速度结构变化, 提供了未来强震的孕震信息 (傅征祥, 1997)。因此, 本文基于地震孕育过程中反映地下介质特性的波速比、震源深度及中小地震的变化特征, 从时间上追踪大震孕育的变化规律, 寻求大震孕育的前兆信息, 为预测未来大震的发震时间提供依据。

2 云南 7 级地震前的异常特征

2.1 波速比异常

从 1986~2008 年云南遥测台网地震波形记录资料中, 选取 4 个以上地震台记录到的云南地区中小地震的清晰的直达波 P_g 、 S_g 的到时, 选用 $(T_s - T_p)$ 在 20~25 s 之间的远台和小于 0.5 s 的近台, 用多台法计算云南地区的中小地震波速比 V_p/V_s 、剩余标准差 S 和相关系数 R 为减小介质横向不均匀性的影响, 误差大于 0.03 和相关系数小于 0.9 的波速比均舍弃。对云南地区多年波速比

* 收稿日期: 2009—10—12.

基金项目: 云南省人民政府十项重大措施“云南强震活动与板缘动力学机制研究”与中国地震局震情跟踪合同制定向工作任务“云南东部地区强地震短临动态跟踪研究”(2009010204)联合资助。

数值计算得波速比的均值为 1.70 (李永莉等, 2008)。考虑到资料的误差, 取 1.70 ± 0.05 为云南地区波速比正常值, 将偏离正常标准值范围的数作为异常波速值, 波速比异常 (高、低异常) 数量反映了地下介质的变化状态, 数量多表明介质处于“不稳定”状态, 以往云南强震震例已证明波速比异常密集区为强地震孕育的区域 (蔡静观等, 1999; 李永莉等, 2009)。

笔者以半年为间隔统计波速比异常的次数 V_n , 其平均值为 10 次 (图 1), 具体分析了 1988 年以来云南地区 $M \geq 7.0$ 地震的波速比变化特征。

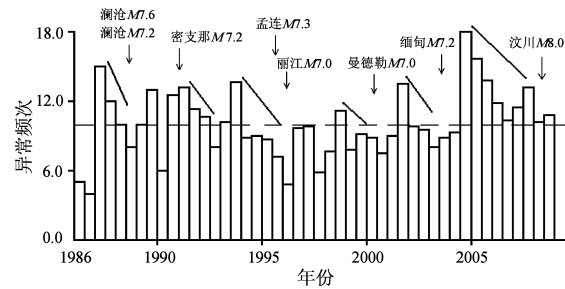


图 1 云南地区波速比异常次数时间进程曲线
Fig 1 Variation of the wave velocity ratio in Yunnan

(1) 1988 年 11 月 6 日澜沧—耿马 7.6、7.2 级地震

1987 年上半年和下半年的波速比异常频次 V_n 值为 15 次与 12 次, 1988 年上半年和下半年 V_n 值分别为 10 次和 8 次, 1988 年 11 月澜沧—耿马发生 7.6、7.2 级大震, 之后波速比的月最小值回升。

(2) 1991 年 1 月 5 日缅甸密支那 7.2 级地震
1989 年下半年波速比异常频次 V_n 值为 13 次, 1990 年上半年 V_n 值降为 6 次, 半年后缅甸密支那发生 7.2 级地震。

(3) 1995 年 7 月 12 日孟连 7.3 级地震和 1996 年 2 月 3 日丽江 7.0 级地震

1990 年下半年、1991 年上半年的波速比异常频次 V_n 值各为 12 次和 13 次, 1992 年下半年 V_n 值降为 8 次, 1993 年下半年又升至 14 次, 之后下降。1994 年 ~1995 上半年 V_n 值为 9 次左右, 1995 年下半年又降为 7 次, 1996 年上半年 V_n 值为 4 次, 其间发生了孟连 7.3 级地震和丽江 7.0 级地震。

(4) 2000 年 6 月 8 日缅甸曼德勒 7.0 级地震
1998 年下半年的 V_n 值为 11 次, 1999 年上半年降低为 8 次, 一年后的 2000 年 6 月 8 日, 缅甸

曼德勒发生 7.0 级地震。

(5) 2003 年 9 月 22 日缅甸 7.2 级地震
2001 年下半年 V_n 值高达 14 次, 2003 年上半年下降至 8 次, 3 个月后缅甸发生 7.2 级地震。

(6) 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震
2004 年下半年 V_n 值高达 18 次, 之后连续下降至 2006 年的 10 次, 2007 年下半年上升至 12 次, 2008 年上半年又下降至 10 次的低值, 下降过程中四川汶川发生 8.0 级地震。

综上所述, 云南地区 $M \geq 7.0$ 大震前 2 年, 波速比异常次数半年均值 V_n 出现高于 10 次的异常, 之后下降至均值线下, 3~6 个月后发生 $M \geq 7.0$ 地震; 其中有两组 V_n 值出现两次高一低值的变化过程: 1995 年孟连 7.3 级地震与 1996 年丽江 7.0 级地震。汶川 8.0 级地震前, V_n 高值最早出现于震前 4 年。可见云南地区在统计时间段出现波速比高频次异常 (约占 67%), 然后下降, 云南及周边随即发生 $M \geq 7.0$ 地震。波速比异常频次高值一般出现在震前 2 年。

2.2 震源深度变化异常

云南遥测台网震源基本参数的测定采用的是均匀介质模型, $M \geq 3$ 的地震定位结果资料精度均为 2、3 类, 这些地震为小区域范围的近震台网测定结果, 对震源深度精度的影响有限, 同时云南地区强震前均观测到中小地震震源深度加深的现象 (毛慧玲, 李永莉, 2004)。考虑到云南地区深部构造特点和观测深度的误差范围, 笔者选取震源深度 $h \geq 25$ km 的地震资料, 研究云南地区 7 级大震前中小地震震源深度的变化, 以年为单位统计震源深度大于等于 25 km 的频次 T (简称深度异常频次) 的时间进程曲线 (图 2), 分析 1988 年以来云南地区 6 次 $M \geq 7.0$ 地震及四川汶川 8.0 级地震前深度异常频次的变化特征, 具体分析如下:

1988 年 11 月 6 日澜沧—耿马 7.6、7.2 级地震前: 1984 年深度异常频次达 15 次, 为高值, 之后下降, 至 1987 年的 4 次, 为低值, 降幅为 70%。

1991 年 1 月 5 日缅甸密支那 7.2 级地震前: 1989 年深度异常频次为 6 次, 1990 年为 3 次, 降幅为 50%。

1995 年 7 月 12 日孟连 7.3 级地震、1996 年 2 月丽江 7 级地震前: 1992 年深度异常频次为 5 次, 1993、1994 年频次为 0。

2000 年 6 月 8 日缅甸曼德勒 7.0 级地震前:

1997、1998 年深度异常频次为 2 次、1 次，1999 年频次为 0

2003 年 9 月 22 日缅甸 7.2 级地震前：2000 年深度异常频次高达 14 次，之后下降，2002 年深度异常频次为 6 次，下降幅度为 57%。

2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震前：2005 年深度异常频次高达 17 次，之后下降，2006、2007 年频次均为 0

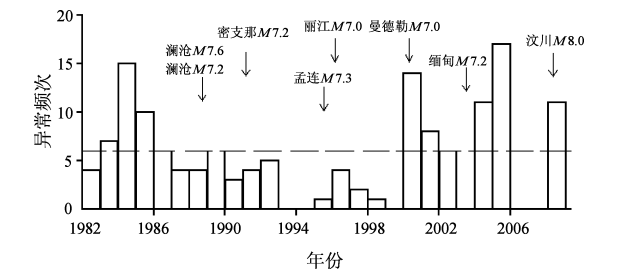


图 2 云南地区地震震源深度 $h \geq 25$ km 的年频次进程曲线

Fig 2 Annual frequency curve of the focal depth ($h \geq 25$ km) in Yunnan

综上所述，云南地区 $M \geq 7.0$ 地震前震源的深度异常频次有以下两个特征：（1）震前 3~4 年震源的深度异常频次高于均值（6 次），震前 1 年下降至均值以下；（2）深度异常频次连续 3 年低于均值，至震前 1 年降为 0。两种异常最早出现的时间均为震前 3~4 年，之后连续下降，至震前 1 年下降幅度均为最高值的 50% 以上。

2.3 中小地震活动

云南地区的地震监测范围为 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}N$ $96^{\circ} \sim 107^{\circ}E$ 。地震记录资料中包含了以省界为分界线的云南省内及省外地震。而一定区域的中小地震活动具有一定的活动规律，在大震孕育过程中常出现偏离其活动规律的变化。为突出大震前云南省内的中小地震活动偏离正常活动水平的状态，提取云南省内的 $M \geq 3$ 地震与省外的 $M \geq 3$ 地震并作归一化处理，即省内 $M \geq 3$ 地震与省外 $M \geq 3$ 地震的月频度比 S （简称省内外月频度比）。图 3a 为 1982 年以来云南地区的省内外月频度比。取其 2 倍方差值为异常线，即 $0.85 \leq S \leq 0.18$ 。统计时将同一年内出现的异常点看作 1 次，从图 3a 中可见：

（1）高异常点有 4 次：1982 年 5 月为 0.92，1 年后的 1983 年 6 月越南莱州发生 7.1 级地震。1994 年 7 月为 0.9，1 年后的 1995 年 7 月孟连发生

7.3 级地震，1 年半后即 1996 年 2 月丽江发生 7.0 级地震。1998 年 1 月为 0.85，11 月为 1.0，两年后的 2000 年 6 月缅甸曼德勒发生 7.0 级地震。

（2）低异常点有 7 次：1984 年 7 月为 0.14，1987 年 4 月、6 月为 0.18、0.13，1988 年 11 月 6 日澜沧—耿马发生 7.6、7.2 级地震，1992 年 7 月为 0.22，3 年半后的 1995 年 7 月孟连发生 7.3 级地震。2000 年 4 月、11 月分别为 0.11 和 0.18，2000 年 6 月缅甸曼德勒发生 7.0 级地震。2002 年 4 月为 0.17，1 年后的 2003 年 9 月缅甸发生 7.2 级地震。2007 年 2 月为 0.14，1 年后的 2008 年 5 月四川汶川发生 8 级地震。2008 年 6 月又为 0.18。

4 级双震在云南地区为相对较少的地震事件，其活动数目的多少与区域地震活动水平密切相关。图 3b 为 1982 年以来云南地区 4 级双震的年频次 N_4 。

由图 3b 可见，1982~1985 年 4 级双震的年频次连续为 0，其中 1983 年越南莱州发生 7.1 级地震；1986 年的年频次为 3，两年后的 1988 年 11 月的澜沧—耿马发生 7.6、7.2 级地震；1989 年的年频次为 3，2 年后的 1991 年 1 月缅甸密支那发生 7.2 级地震；1993 年为 3 次，1994 年为 4 次，1995 年为 4 次，之后 2 年内，分别发生了 1995 年 7 月

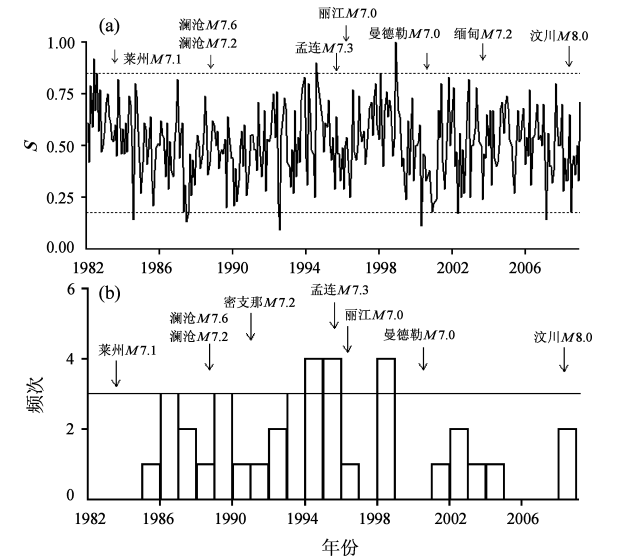


图 3 云南地区中小地震时间进程曲线

(a) 省内外 3 级地震月频度比；(b) 4 级双震的年次数

Fig 3 Curve of medium-small earthquakes in Yunnan

(a) Monthly frequency of $M3.0$ earthquakes in Yunnan and the neighboring area (b) Annual frequency of $M4.0$ double earthquakes in Yunnan and the neighboring area

孟连 7.3 级地震、1996 年 2 月丽江 7 级地震；1998 年为 4 次，2 年后的 2000 年 6 月缅甸曼德勒发生 7.0 级地震，1999~2000 年 4 级双震的年频次连续 2 年为 0。2006~2007 年 4 级双震的年频次连续 2 年为 0。2008 年 5 月四川汶川发生 8 级地震。

综上所述，云南地区 4 级双震的年频次超过 3 次，则云南可能发生 7 级地震。若省内外 3 级地震月频度比 S 出现高值或低值异常，1~2 年内云南可能发生 7 级地震；若 4 级双震的年频次连续 2 年以上为 0，同时省内外 3 级地震月频度比 S 出现低值异常，则 1~2 年内省外可能发生 7 级甚至 8 级地震。即云南省内 7 级地震前 1~2 年内 4 级地震以活跃异常为主，3 级地震则呈活跃或平静异常；云南省外 7 级地震前以 3、4 级地震的平静异常为主。

3 云南第四强震活跃期前后波速比的趋势变化

众所周知，1900 年以来云南地区 $M \geq 6.8$ 地震活动呈现出显著的动、静相间的韵律特征。按此规律，苏有锦等（2001）把 1900 年以来云南地区的地震活动分为 4 个活跃期（图 4）。图 4 中 I、II、III、IV 分别代表云南地区 4 个强震活跃期时间段，各活跃期之间为强震平静期。云南遥测台网从 1982 年始有数字地震记录，依据图 4 中对云南强震活动规律的划分，上述分析中采用地震记录资料的时间段，仅包含了第四活跃期前后共 22 年的资料。在强震孕育过程中，区域的波速比显著低值异常与区域的介质特性变化密切相关，故选取每月波速比的最小值，按月为时间点绘制时间进程曲线，剖析第四活跃期前后，云南地区波速比与强震活动周期之间的关系（图 5），图中波速比最小值的平均值为 1.39。

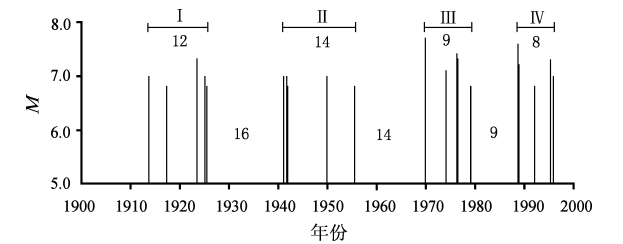


图 4 云南地区 $M \geq 6.8$ 地震 M-T 图
Fig 4 M-T diagram of the $M \geq 6.8$ earthquakes in Yunnan

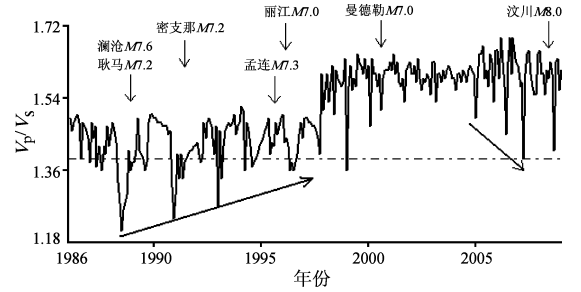


图 5 云南地区波速比最小值的趋势变化
Fig 5 Variation tendency of the minimum value of wave velocity ratio in Yunnan

从图 5 可见，云南地区波速比最小值在云南强震第四活跃期前后有明显的差异：1986~1997 年波速比最小值在 1.18~1.50 之间，而 1998~2008 年波速比最小值在 1.54 左右波动，出现明显的两段分布，且在云南及周边地区 7 级大震前均出现低于 1.39 的波速比值。从波速比变化过程看，1986~1988 年波速比呈下降趋势，澜沧—耿马 7 级大震前的 1988 年 6 月波速比为历史最低值（1.22），1988~1997 年波速比出现回升的态势，1997 年波速比的数值已经与 1986 年初的相近。2005~2007 年波速比又呈下降趋势，2007 年 3 月达到 1.39，该时段内波速比的波动较大，直到 2008 年汶川 8 级地震前波速比才回升。

4 中小地震活动、震源深度和波速比与强震孕育关系的机理分析

一次强烈地震的发生不是偶然的，地震前常伴随着大量中小地震活动事件，经过一定时间突发失稳，发生中强甚至大地震（梅世蓉等，1993）。而大震前一定区域内中小地震活动与大区域地震活动的背景值之比，反映的是强震孕育中地震活动的动态变化，而云南省内与省外地震频度比在强震孕育的过程中，表现为有规律的变化特征。

在测定震源基本参数时，使用的台网不同，计算结果就有所不同（Lee Stewart 1984），人工交切地震的范围大小和计算机定位的走时残差，反映的是计算精度而不是定位精度，残差小并不意味着震源位置就准确。在平面上，震中的周围有台站包围，变动范围小，而在垂直方向只是一维约束，所以震源基本参数的差别首先表现在震源深度上。若台站同在高（低）速区，震中位置相

差不大而震源深度变浅(深), 因而震源深度变化反映的是区域波速特征。赵晋明等(1996)通过岩石破裂实验发现, 在破裂孕育过程中, 随着压力的增大, 岩石微裂隙也在变化, 当压力达 70%~90% 破裂压力后, 微裂隙增多, R/S 波的波速下降, 且 P 波波速比 S 波波速下降快, 因而波速比 V_p/V_s 的值减小, 至岩石破裂时 R/S 波的波速会增大, 波速比 V_p/V_s 突升。因而地震的震源深度和波速比 V_p/V_s 显示的是区域介质在应力积累时地壳速度结构发生的变化, 两者与大震孕育、发生密切相关, 在大震孕育过程中常体现出有一定规律的动态变化过程。

5 讨论

(1) 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震和 1988 年澜沧—耿马 7.6、7.2 级地震前, 云南地区波速比异常和震源深度异常均出现大幅度的变化, 而汶川 8.0 级地震前的波速比异常和震源深度异常的变化幅度更为研究时段之最; 两次地震异常差异表现为震前 4 级地震的活动水平不同: 汶川 8.0 级地震前, 云南地区的 4 级地震表现为弱活动, 而澜沧—耿马 7.6、7.2 级地震前 4 级地震为强活动。从地震背景上看, 这两组强震均发生于云南甚至西南地区长期强震平静的背景下, 这说明波速比的变化更好地体现了区域应力活动状态, 与强震孕育过程密切相关, 而中小地震活动的区域性特征更突出。

由图 5 还可看出, 在这两组强震前波速比均出现下降的趋势, 汶川 8.0 级地震后波速比就很快回到了下降前的水平, 而澜沧—耿马 7.6、7.2 级地震后波速比仍然呈现低值异常, 体现出与强震活动的密切关系。由于目前震例仅此两例, 还需积累资料做深入分析。

(2) 1998 年下半年、2001 年下半年和 2008 年的波速比异常频次高达 10 次(图 1), 之后分别发生 1998 年 11 月宁蒗 6.2 级、2001 年 10 月永胜 6.0 级、2009 年 7 月大姚 6.0 级地震; 而 1990~1993 年与 2005~2008 年两个时段中均出现波速比异常频次高达 10 次以上的情况, 之后 4 年内虽发生了丽江、汶川 7 级以上地震, 但异常过程中还发生了 1993 年 1 月普洱 6.3 级与 2007 年 6 月宁洱 6.4 级地震。从震例结果看云南地区 6 级强震前一

至半年也会出现高波速比异常, 异常缺少恢复过程, 且时间较短。

从图 2、图 3 可以看出, 震源深度异常频次如以 4 次为异常指标, 4 级双震若以 2 次为指标, 同时省内与省外 3 级地震月频度比出现高、低值异常, 则在云南地区部分 6 级地震前 1 至半年异常均达指标, 如: 1993 年 1 月普洱 6.3 级, 1998 年 11 月宁蒗 6.2 级, 2001 年 10 月永胜 6.0 级, 2003 年 7、10 月大姚 6.2、6.1 级与 2007 年 6 月宁洱 6.4 级地震。波速比、震源深度、中小地震的活动在大多数 6 级地震前也出现了不同程度的异常, 表明中小地震的活动与 6 级和 7 级地震的孕育有着密切的关系。这与蔡静观和张喜玲(1999)、毛慧玲和李永莉(2004)、李永莉等(2007)对云南地区 6 级地震震例前的地震活动分析结论相一致。但云南地区 6 级与 7 级地震前, 中小地震活动异常在幅度、时间上有一定程度的差异, 因此预测不同强度的地震应考虑选用不同的异常指标。

(3) 云南地区的波速比以 1998 年为界分为两段(图 5), 1998 年云南遥测台网从模拟记录转为数字化记录, 2004 年完全采用数字化记录, 但 2004 年波速比未出现明显的分段现象。李永莉等(2008)的研究中发现云南地区长期的波速比均值约为 1.70, 因此可以认为遥测台网记录方式的影响可以忽略, 波速比的变化趋势值得认可。

(4) 本文虽然总结出了 1988 年云南及周边区域大震前的前兆现象, 为中长期、短期预测强震提供了时间依据, 但因所用观测资料从 1982 年才开始, 时间相对较短, 强震孕育过程又比较复杂, 文中所总结的异常特征外推时有局限性, 研究结果需在今后的地震预测工作中补充修正。

至 2008 年, 这几项参数值均未出现明显的大震前的变化, 因此笔者推测云南 7 级大震的首发时间为 2010 年后, 但发震地点没有讨论。

6 结论

(1) 云南 $M \geq 7.0$ 大震前 3~4 年震源深度异常频次超过均值(6 次), 或连续 3 年低于均值, 至大震前 1 年下降幅度均为震前最高值的 50% 以上, 甚至降至 0 次。

(2) 波速比异常和中小地震活动异常主要出现于云南地区 $M \geq 7.0$ 大震前 2 年左右。若波速比

出现高频次异常，同时还出现 4 级地震活跃异常和 3 级地震活跃异常或平静异常，那么在云南省内可能会发生 7 级地震；若 3、4 级地震活动均呈现平静异常，就可能在省外发生 7 级甚至 8 级地震。

(3) 云南强震第四活跃期前 2 年至活跃期结束，云南地区波速比的月最小值整体相对较低，且在活跃期首发 7 级大震前半年左右出现最低点，强震活跃期结束时波速比回升至均值，即随着强震活跃期的开始至结束的过程，波速比也经历了下降至恢复的过程。

参考文献:

蔡静观, 梅世蓉, 张喜玲, 等. 1999. 从高波速比试论云南丽江 7 级地震的孕震模式 [J]. 地震研究, 22(2): 122—129.
蔡静观, 张喜玲. 1999. 丽江、宁蒗强震的波速比时空演化图象和数值分析 [J]. 中国地震, 15(1): 82—91.

傅征祥. 1997. 中国大陆地震活动性力学研究 [M]. 北京: 地震出版社.
梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 1993. 中国地震预报概论 [M]. 北京: 地震出版社.
李永莉, 毛慧玲, 付虹. 2007. 2007 年宁洱 6.4 级地震前地震学异常的动力演化 [J]. 地震研究, 30(4): 318—323.
李永莉, 毛慧玲, 赵小艳, 等. 2008. 云南地区数字地震波波速比的区域特征 [J]. 地震研究, 31(3): 203—208.
李永莉, 毛慧玲, 苏有锦. 2009. 滇西地区近期强震前的波速比异常演化 [J]. 地震研究, 32(1): 6—11.
毛慧玲, 李永莉. 2004. 云南地区强震前震源深度的时空展布 [J]. 地震地磁观测与研究, 25(3): 32—40.
苏有锦, 李忠华, 刘祖荫, 等. 2001. 20 世纪云南地区 $M_s \geq 5.0$ 级地震活动的基本特征 [J]. 地震研究, 24(1): 1—9.
赵晋明, 胡毅力, 王彬, 等. 1996. 在真三轴压缩条件下片麻岩破裂孕育过程中弹性波的特征变化 [J]. 地震地质, 18(3): 277—281.
LeeW H K StewartSW. 1984. 微震台网的原理及应用 [M]. 唐美华, 译, 北京: 地震出版社.

Characteristics of Wave-velocity Ratio Focal Depth and Medium-small Seismicity before Strong Earthquakes in Yunnan

LI Yong-li MAO Hui-ling WANG Shi-qin QIN Jia-zheng
(Earthquake Administration of Yunnan Province Kunming 650224 Yunnan China)

Abstract

We study the variation regularity of wave-velocity ratio in the 4th active period of strong earthquakes in Yunnan and discuss the relation between strong earthquake genesis and variation of wave velocity, medium-small earthquakes and variation of focal depth. The result shows that wave-velocity ratio focal depth and anomaly of $M3-4.9$ earthquakes appeared as early as 4 years before the $M \geq 7.0$ earthquakes. Most of them appeared about 2 years before the strong earthquakes and anomaly of wave-velocity ratio and focal depth increased and gradually reduced about one year before the strong earthquakes. Corresponding to the beginning and the ending of the 4th active period wave-velocity ratio in Yunnan experienced the quasi-synchronous declining and rising.

Key words wave-velocity ratio focal depth medium-small earthquake active period Yunnan