

# 滇西地区近期强震前的波速比异常演化<sup>\*</sup>

李永莉, 毛慧玲, 苏有锦

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 利用云南地区地震波记录资料, 对滇西地区 1998 年以来 5 次  $M_s \geq 5.8$  强震前的波速比异常进行了动态追踪, 结果表明: 滇西地区强震前 1~3 年会形成一个长 60~160 km 的椭圆形低波速比异常区, 强震通常发生于异常区边缘、异常交错部位或低波速异常区外围 60 km 范围内。低波速比异常区出现的高波速比 ( $\geq 1.90$ ) 点, 除 2001 年施甸 5 级震群外, 对应的强震孕育时间的长短与强震震中距的大小有类似反比的关系。

关键词: 滇西地区; 强震; 波速比异常

中图分类号: P315.3<sup>++1</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2009)01-0006-06

## 0 引言

自 1997 年起云南地区一直处于 7 级大震平静期, 但发生了多次 5~6 级中强地震, 特别是滇西地区 5 年内连续发生了 1998 年 11 月宁蒗 6.2 级, 2000 年 1 月姚安 5.9~6.5 级, 2001 年 4~6 月施甸 5.2、5.9、5.3 级, 2001 年永胜 6.0 级, 2003 年大姚 6.2~6.1 级等强震(群), 呈现出强震时空密集的情况。1996 年, 云南地区开始架设数字地震台站, 至 1998 年云南区域数字地震台网已有 22 个子台, 全面控制了云南地区 2 级以上地震, 其中滇西地区有 8 个子台。到 2004 年台网增至 31 个子台, 其中滇西地区有 13 个子台, 是台站布设较密集的区域, 这为研究该区域的波速变化提供了较好的基础资料。

本文中, 我们利用云南区域数字地震台网记录资料, 对滇西地区 ( $24^\circ \sim 28^\circ \text{N}$ ,  $97.5^\circ \sim 101.5^\circ \text{E}$ ) 1998 年以来波速比演化进行动态追踪, 分析滇西地区  $M_s \geq 5.8$  强震前的波速比异常变化特征, 并对异常区内的地震波速比作数值分析, 探讨 7 级大震平静期内滇西地区密集发生的强震的波速比演化特点及波速比与地震孕育的关系。

## 1 资料和计算

### 1.1 资料的选取

选取云南台网 4 个以上子台记录到的清晰 Pg

Sg 直达波到时, 选用台站到震中的距离为到时差在 20~25 s 的远台和小于 0.5 s 的近台, 用多台法计算滇西地区地震的波速比  $V_p/V_s$ 、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, 对于能计算出波速比的地震, 用不同台站组合进行计算, 在差异较大时, 采用与孕震区尺度大致相当的小台网或近台计算的数据, 尽量排除由于非孕震原因引起的波速变化。波速比误差大于 0.03 和相关系数小于 0.9 的数据均舍弃。经计算得到 1998~2006 年滇西地区数字地震波波速比数据 1 436 个。

### 1.2 计算方法

根据 Pg Sg 波的到时  $T_p$ 、 $T_s$  用最小二乘法计算波速比

$$V_p/V_s = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta T_i^2 - (\sum_{i=1}^n \Delta T_i)^2}{n \sum_{i=1}^n (\Delta T_i T_{pi}) - \sum_{i=1}^n T_{pi} \sum_{i=1}^n \Delta T_i} \quad (1)$$

式中  $n$  为台站个数, 本文取 4~9,  $\Delta T_i = T_{si} - T_{pi}$ , 相关系数

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

乘余标准差

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

\* 收稿日期: 2008-10-23

基金项目: 国家科技支撑计划 (2006BAC01B03-04-01) 资助

其中  $\overline{T_p} = (1/n) \sum_{i=1}^n T_i$ ,  $\overline{\Delta T} = (1/n) \sum_{i=1}^n \Delta T_i$

## 2 异常的确定

将滇西地区 1990 ~ 2006 年的地震波波速比为两个时间段: 1990 ~ 1997 年与 1998 ~ 2006 年, 并给出后一时段波速比的月均值 (图 1)。图 1 中的虚线表示波速比均值。1990 ~ 1997 年基本上为模拟记录地震波资料处理结果, 在以往的强震震例中曾有很好的表现 (蔡静观和张喜玲, 1999 a; 1999 b), 本文重点分析 1998 年以后波速比月均值的时间进程。

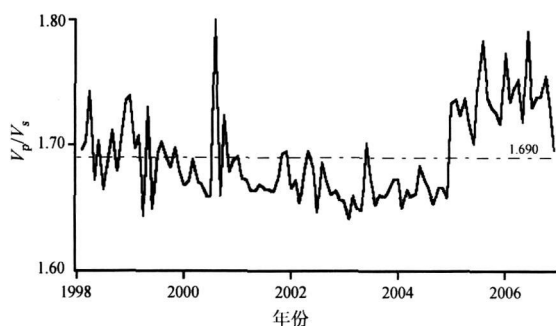


图 1 1998 ~ 2006 年滇西地区地震波波速比月均值曲线

1990 ~ 1997 年波速比月均值的平均值为 1.715 (蔡静观等, 1999), 1998 ~ 2006 年波速比月均值的平均值为 1.690 两者之间相差 0.025。1998 ~ 2006 年该区域的波速比月均值最低为 2003 年 1 月的 1.64, 最高为 2000 年 6 月的 1.81, 一倍方差为 1.653 和 1.718。2004 年 12 月至 2005 年 12 月波速比明显高于平均值, 2001 年 1 月至 2004 年 11 月波速比相对较低, 在平均值与其下一倍方差线内波动。

由于波速比月均值是动态变化的, 为方便资料的统一分析与突出波速比, 我们取滇西地区波速比等于  $(1.70 \pm 0.05)$  时为正常值, 大于 1.75 则为高值异常, 小于 1.65 为低值异常。对滇西地区波速比数值采用逐月追踪的方法, 对强震前发生的高波速比数据逐个追踪, 对一些变化不明显的波速比异常图像以年度重叠。为使波速比异常空间分布图像更加清晰, 仅给出高、低波速比异常值的地震震中。

## 3 波速比的动态演化图像

1998 年以来, 滇西地区的  $M_s \geq 5.8$  地震主要

发生于宁蒗、永胜、大姚、施甸等地, 波速比异常的分布在时间上以强震发生的时间来划分, 在空间上以异常的位置来划分, 对于震群, 则以最大地震发生的时间来划分。

图 2 为 1997 年 9 月至 2006 年滇西地区部分中小地震的波速比异常空间分布图像。图中实心圈表示低波速比异常, 空心圈表示高波速比异常, “+” 表示后续强震的震中位置。

(1) 1997 年 9 月至 1998 年 9 月, 滇西地区以高波速异常为主, 在丽江以北形成一个 NE 向、长约 100 km 的低值异常集中区, 1998 年 11 月宁蒗 6.2 级地震就发生于低值异常区的边缘, 异常时间为震前 1 年 (图 2 a)。

(2) 1998 年 3 月至 1999 年 12 月, 滇西地区形成 2 个波速比低值异常集中区, 宁蒗附近的异常在时间上与 1998 年宁蒗 6.2 级地震的异常时间段重合; 另一个异常区在剑川、下关一带形成长约 160 km 的椭圆形, 1 年零 10 个月后, 距异常区的边缘约 40 km 处发生了 2000 年 1 月姚安 5.9、6.5 级地震 (图 2 b)。

(3) 1998 年 12 月至 2001 年 4 月 (图 2 c), 在剑川、下关一带形成一个长约 160 km 的 NE 向椭圆形低波速比异常区。1998 年 10 月至 2001 年 9 月, 在低波速比异常区的右上角, 形成一个 EW 向、长约 100 km 的低值异常区, 异常时间长达 3 年 (图 2 d)。2001 年 10 月永胜 6.2 级地震发生在两个集中区的交错部位。

宁蒗、丽江、永胜等地在 1998 年 10 月至 2001 年 9 月和 1998 年 12 月至 2001 年 4 月两个时段均形成两个长约 60 km 的低波速比异常集中区, 2001 年 5 月 24 日宁蒗 5.8 级地震发生于两区域之间, 地震距异常区边缘约 30 km 内。

(4) 2001 年 11 月至 2003 年 6 月, 在剑川、下关、宾川一带形成一个长约 120 km NW 向分布的低波速比异常集中区, 异常时间为 1 年零 7 个月。2003 年 7 月、10 月, 大姚 6.2、6.1 级地震发生于异常区东边 60 km (图 2 g)。2001 年 11 月至 2002 年 6 月该区域仅在外围出现低值点, 2002 年 6 月后至震前 1 年形成了一个 80 km 长的异常区, 大姚 6.2 级地震位于异常区东边约 100 km 处 (图 2 h)。

(5) 1998 年 5 月至 2001 年 3 月保山、施甸一带形成了一个 NNE 向、长约 60 km 的低波速异常

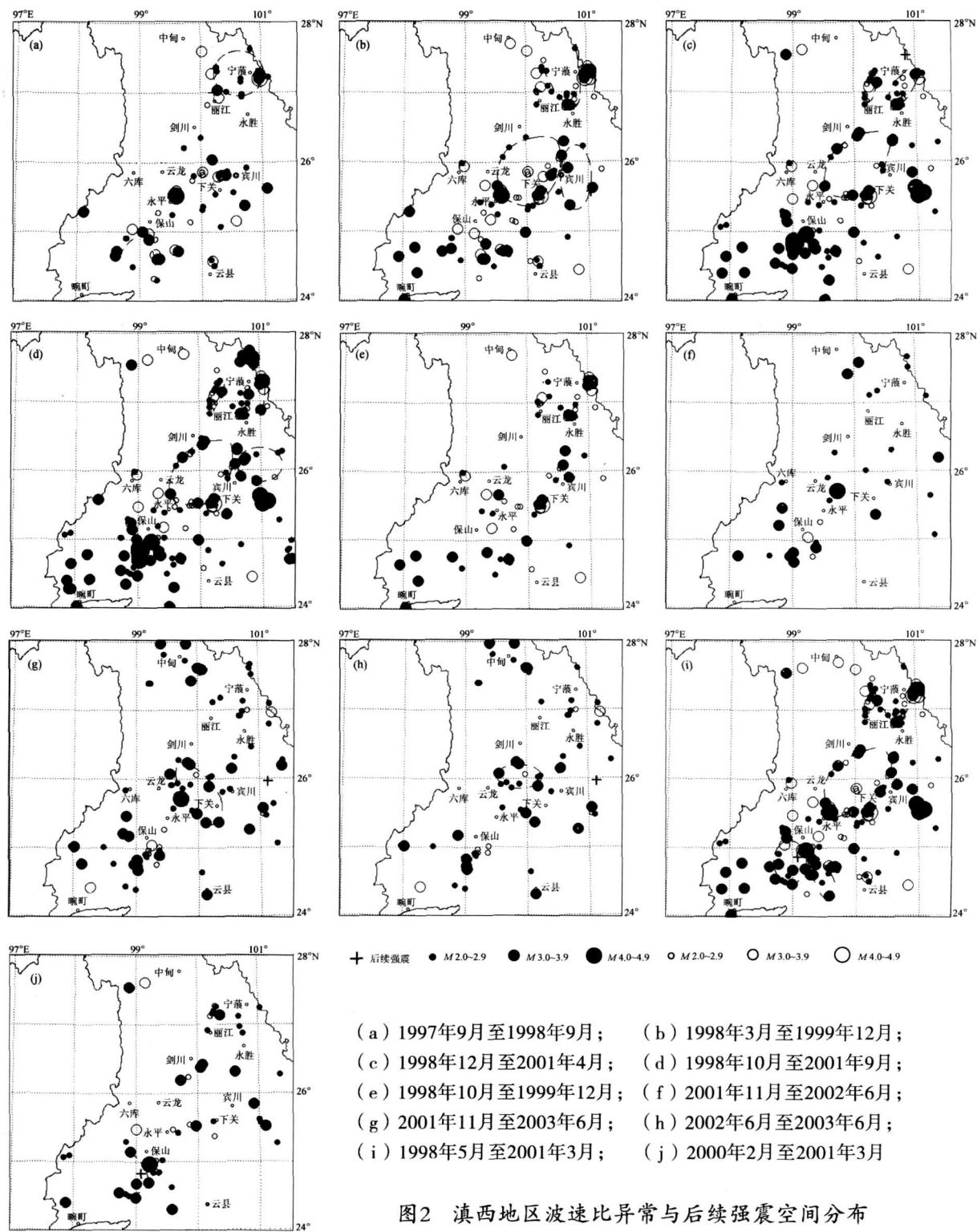


图2 滇西地区波速比异常与后续强震空间分布

区和一个 NW向、长约 80 km的低波速异常区 (图 2 i), 异常区形成时间长约 3年。2001年 4月 10日、12日和 6月 8日的施甸 5.2、5.9、5.3级地震发生在两个异常区的交错部分。2000年 2月至 2001年 3月施甸 5级震群前 1年形成 NE向的半圆形异常区, 其顶点为震群的震中位

置 (图 2 j)。

图 2 和图 2 为波速比无异常时间段。归纳起来, 滇西地区 1998年以来  $M \geq 5.8$ 地震前 1~3年形成长 60~160 km的椭圆形低波速异常区, 地震发生于异常区的边缘、异常交错区域或异常区外围 60 km范围内。

4 高波速比数值分析

4.1 高波速比异常与强震的关系

强震前，在低波速异常密集区及附近区域还出现了少数高波速比异常点，我们将进一步分析这些高波速异常的数值，讨论其与滇西地区后续  $M_s \geq 5.8$  地震的关系。

除 1998 年外，1997 ~ 2003 年滇西地区的波速

比异常均以低值异常为主，大于 1.9 的高波速比仅有 11 次（表 1），这些异常点分别集中于丽江—永胜、下关—宾川、保山—昌宁三个区域。其中 1998 年 11 月 13 日永胜出现高达 1.99 的波速比，与 1998 年 11 月 19 日宁蒗 6.2 级地震仅隔 6 天、相距 135 km。2000 年 7 月 28 日丽江出现高达 2.1 的波速比，与 2001 年 5 月 24 日宁蒗 5.8 级地震间隔 297 天、相距 63 km，与 2001 年 10 月 27 日永胜 6.0 级地震间隔 450 天、相距 120 km。

表 1 滇西地区高波速比 ( $V_p/V_s \geq 1.90$ ) 异常与后续强震关系

| 编号 | 波速比异常地震参数  |        |         |       |           | 对应地震参数     |        |         |    |       |          |           |
|----|------------|--------|---------|-------|-----------|------------|--------|---------|----|-------|----------|-----------|
|    | 发震时间       | 震中位置   |         | $M_L$ | $V_p/V_s$ | 发震时间       | 震中位置   |         | 地名 | $M_L$ | 对应时间 / d | 对应距离 / km |
|    | 年—月—日      | 北纬     | 东经      |       |           | 年—月—日      | 北纬     | 东经      |    |       |          |           |
| 1  | 1998—03—21 | 24°54′ | 99°15′  | 2.9   | 1.95      | 2001—04—12 | 24°50′ | 99°01′  | 施甸 | 5.9   | 1 116    | 25        |
| 2  | 1998—05—27 | 25°03′ | 98°52′  | 3.1   | 2.03      | 2001—04—12 | 24°50′ | 99°01′  | 施甸 | 5.9   | 1 050    | 28        |
| 3  | 1998—11—13 | 26°03′ | 100°32′ | 2.6   | 1.99      | 1998—11—19 | 27°14′ | 100°59′ | 宁蒗 | 6.2   | 6        | 135       |
| 4  | 1998—12—02 | 25°31′ | 100°14′ | 4.3   | 2.02      | 2000—01—15 | 25°35′ | 101°07′ | 姚安 | 6.5   | 408      | 90        |
| 5  | 2000—07—28 | 27°17′ | 100°18′ | 2.7   | 2.10      | 2001—05—24 | 27°38′ | 100°48′ | 宁蒗 | 5.8   | 297      | 63        |
|    |            |        |         |       |           | 2001—10—27 | 26°14′ | 100°34′ | 永胜 | 6.0   | 450      | 120       |
| 6  | 2000—07—31 | 25°29′ | 99°00′  | 3.0   | 2.72      | 2001—04—12 | 24°50′ | 99°01′  | 施甸 | 5.9   | 252      | 73        |
| 7  | 2000—09—22 | 25°02′ | 99°19′  | 2.8   | 1.95      | 2001—04—12 | 24°50′ | 99°01′  | 施甸 | 5.9   | 200      | 38        |
| 8  | 2001—10—18 | 24°58′ | 99°25′  | 2.9   | 1.91      | 2001—10—27 | 26°14′ | 100°34′ | 永胜 | 6.0   | 9        | 182       |
| 9  | 2001—10—27 | 26°15′ | 100°35′ | 3.0   | 1.90      | 2003—07—21 | 25°57′ | 101°14′ | 大姚 | 6.2   | 632      | 73        |
| 10 | 2001—11—20 | 25°16′ | 99°27′  | 2.7   | 1.92      |            |        |         |    |       |          |           |
| 11 | 2002—05—18 | 24°55′ | 99°23′  | 2.5   | 1.93      |            |        |         |    |       |          |           |

1998 年 12 月 2 日下关出现高达 2.02 的波速比，与 2000 年 1 月 15 日姚安 5.9 ~ 6.5 级地震间隔 408 天、相距 90 km。2001 年 10 月 27 日永胜出现高达 1.90 的波速比，与 2003 年 7 月 21 日大姚 6.2 级地震间隔 632 天、相距 73 km。

保山—昌宁一带共出现 6 次高波速比异常，2001 年 4 月施甸 5 级震群前有 4 次，最早高波速比异常值于 1998 年 3 月 21 日出现在保山，为 1.95，与 2001 年 4 月 12 日施甸 5.9 级地震相距约 25 km，时间间隔为 3 年零 21 天。最大波速比异常值于 2000 年 7 月 31 日出现在保山，为 2.72。地点与施甸 5.9 级地震相距约 73 km，时间间隔为 252 天。保山于 2001 年 11 月 20 日和 2002 年 5 月 18 日出现两个高值异常点，但滇西地区至今无强震发生。

滇西地区强震前波速比大于等于 1.90 的点因强震的位置而具有不同的时、空关系：在宁蒗、永胜、大姚、姚安地区，强震前异常区内大于等

于 1.90 的高波速比点对应的强震时间与对应的强震距离存在类似反比的关系。在施甸、保山地区的强震前 3 年，高波速比点对应的震中孕育时间的长短与对应的强震距离的大小存在类似反比的关系。而在强震前半年左右，高波速比点对应的强震孕育时间与对应的震中距离成正比。

4.2 高波速比与地震的孕育

滇西地区为强震多发区，其深部构造上地壳体现为以高速层为主，同时上地壳底部有一低速层（阚荣举和韩源，1992）。波速比数值因地震波所经途径的不同而不同，因此滇西地区在强震前出现的高、低波速比异常特征，与其地下构造是密切相关的。而张学民等（2004）在对华北地区地下介质波速比值进行研究后也得出：强震区的波速比要整体高于弱震区和过渡区，多震区下面往往是一个波速比高值层；强震区上地幔波速比较高。

岩石破裂实验表明：当压力达 70% ~ 90% 破

裂应力时, 波速会下降, 下降幅度在未来断裂面的垂直方向较大, 平行方向较小。若岩石特征刚度与压机系统刚度相近, 在逼近破裂时波速比就会回升(赵晋明等, 1996), 即临震时可能出现高波速比突变。这与在地震孕震过程中, 孕震区范围内后期出现的高波速比点的情形十分相似。

## 5 结论

(1) 我们计算得到的滇西地区波速比资料为该区域的平均波速比值, 在所选区域与台站相对固定的情况下, 地震波虽受所经路径差异的影响, 但还是能从一定程度上反映地下介质的动态变化, 因此, 地震波平均波速比较大幅度的突变, 可看作是地震前孕震区介质偏离平衡态的体现, 但目前实例尚少, 还需不断积累和检验, 才能客观地认识地震孕育的复杂过程。

(2) 滇西地区的波速比月均值在 2004 年 12 月至 2005 年 12 月整体偏高, 这可能是 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊西北近海 8.7 级地震对云南地区介质应力状态产生影响的表现, 但从高波速比异常持续长达 1 年以上的情况看, 这样的解释似乎并不完善。类似的高波速比异常出现于 1994 ~ 1995 年间, 之后 1996 年丽江发生 7 级地震。因此, 2004 年 12 月至 2005 年 12 月滇西地区的高波速比异常可能表明滇西地区介质处于不稳定状态, 外界的微小扰动会引起偏离平衡态的明显涨落, 预示着该区未来存在发生大地震的危险。

(3) 在滇西地区发生的 5 次中强地震前, 均出现了波速比低值异常集中区, 但异常区形成的时间和异常区大小差异很大, 例如 2001 年施甸 5 级震群前, 研究区形成两个长为 60 ~ 80 km 的椭圆形波速比异常区, 时间长达 3 年, 其间曾出现多次低波速比异常“密集—消失—出现”的情况, 震前 1 年异常区变为一个半包围圈, 施甸地震就发生于异常区边缘; 1998 年宁蒗 5.8 级地震前, 仅 1 年时间内就形成一个长约 100 km 的低波速比异常区, 再往前追踪, 该区无波速异常, 但强震同样

发生于异常区边缘。这可能是由于地震孕育模式和过程的差异, 使波速比异常问题同样表现出一定的复杂性。波速比异常与强震孕育的关系, 还需作进一步的探讨。

(4) 由表 1 可知, 2001 年施甸 5 级震群前, 在不同的孕育阶段, 波速比大于等于 1.90 的高波速比点与强震的距离随时间变化而不同, 而 2001 年 11 月 20 日与 2002 年 5 月 18 日出现两个高值异常点后, 仅于 2004 年 10 月在保山发生 1 次 4.6 级地震, 该差异与强震的孕育过程有何关系, 是否小滇西的地震孕育有其独特性, 目前因震例相对较少, 需进一步积累和研究。

通过对滇西地区近期强震前波速比异常的动态追踪, 发现滇西地区  $M_s \geq 5.8$  地震前 1 ~ 3 年会形成一个长 60 ~ 160 km 的椭圆形低波速比异常区, 强震就发生于异常区的边缘、异常交错区域或低波速异常区外围 60 km 范围内。除 2001 年施甸 5 级震群外, 在宁蒗、永胜、大姚、姚安地区的强震发生前, 低波速比异常区出现的高波速比  $> 1.90$  异常点距发震时间越长, 其与强震震中的距离越短, 即高波速比点对应的强震发生时间的长短与对应的强震距离大小成类似反比的关系。

## 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 a 丽江、宁蒗强震的波速比时空演化图像和数值分析 [J]. 中国地震, 15 (1): 82—91.
- 蔡静观, 张喜玲. 1999 b 云南地区波速比预报效能的动态分析 [J]. 地震研究, 19 (4): 359—364
- 阎荣举, 韩源. 1992 云南遮放至马龙地质断面(说明书) [M]. 北京: 地震出版社.
- 张学民, 刁桂苓, 束沛镒, 等. 2004 华北地区地下介质波速比值 ( $V_p/V_s$ ) 研究 [J]. 地震地质, 26 (2): 305—317.
- 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, 8 (3): 277—281.
- 中国地震局预测预报司. 1998 大陆地震预报的方法和理论 [M]. 北京: 地震出版社.

# Evolution of Wave Velocity Ratio Anomaly before Current Strong Earthquakes in West Yunnan

LI Yong-li MAO Hui-ling SU You-jin

(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

## Abstract

Using the earthquake wave data recorded by Yunnan Regional Digital Network, we dynamically trace the anomalies of wave velocity ratio before 5 earthquakes with  $M \geq 5.8$  in West Yunnan since 1998. The results show that the anomalous areas formed as a ellipse about 60—160 km long 1—3 years before the earthquakes, and the earthquakes usually occurred at the edge and meeting area of anomaly areas, or the range of 60 km from the periphery of low-value anomaly area. There are 11 high-value points ( $\geq 1.90$ ) in the low-value areas of wave velocity ratio. We analyze the relation between the points and the strong earthquakes which they correspond to, and find the preparation time of the strong earthquakes, except the 2001 Shidian earthquake swarm, varies inversely with the distance of point to earthquake.

**Key words:** West Yunnan; strong earthquake; wave velocity ratio anomaly