

云南地区数字地震波波速比的区域特征^{*}

李永莉, 毛慧玲, 赵小艳, 苏有锦

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 从 1998~2006 年间云南地区数字地震台网记录中, 选用有 4 个以上台记录到的震相清晰的直达 P_g波、S_g波的到时 (包含 P_g S_g的到时差在 20~25 s 的远台和小于 0.5 s 的近台), 计算出云南地区数字地震波的波速比 (V_p/V_s) 并分析了其区域分布特征。结果表明: 1998~2006 年云南地区波速比月均值为 1.685 滇西南地区的月均值高于云南地区的月均值; 滇西地区的月均值变化幅度相对较小, 2002 年 10 月至 2004 年 11 月间的月均值低于云南地区的月均值。2005 年云南地区的波速比整体偏高, 平均值达 1.74 高于多年均值, 可能是 2004 年印尼 8 级大震后云南地区波速比的一种新变化。

关键词: 数字地震波, 波速比, 直达波, 云南地区

中图分类号: P315.3⁺1 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2008)03-0203-06

0 前言

地震波通过未来地震的震源区时, 由于应变在该处的积累, 波速会发生改变, 其变化可利用波速比值的变化来测定。过去相当一段时间内, 研究人员在强震前未观测到波速的异常变化, 这可能与震相的读取精度、波的传播路径有关。随着地震台网的扩大和仪器的改进, 测震精度得到了提高, 特别是数字地震仪的普遍使用, 使检测到波速改变成为可能。

早在“八五”攻关时, 人们就利用云南长达 10 多年的模拟地震记录的波速比资料, 对强震孕育过程的波速比时空演化进行了详细的震例剖析 (蔡静观等, 1999; 中国地震局预测预报司, 1998)。1998 年后云南地区普遍采用了数字地震记录, 笔者利用 1998 年以来云南省数字台网记录, 按区域分析了云南地区数字地震波波速比的区域分布特征, 并初步讨论了 2007 年宁洱 6.4 级地震前波速比 (V_p/V_s) 的异常变化及波速比高值异常与强震孕育的关系。

1 资料和计算方法

1.1 资料的选取

云南地区地震监测台网于 1996 年 4 月启用昆明

台 FBS3A 数字地震仪, 至 1998 年已有 22 个数字地震台, 对云南地区 (21°~29°N, 97°~106°E) 地震控制能力达 2.5 级以上, 其中滇西地区为永胜、丽江、云龙、鹤庆、下关、保山、中甸与畹町 8 个台; 2001 年云南的数字地震台增至 25 个, 其中滇西地区增加了洱源与腾冲两个台; 2004 年云南的数字地震台达 31 个, 滇西地区新增维西、南涧与大姚 3 个台。滇西地区的数字地震台占全省总台数的 42%, 为云南数字台网布台较密集的区域 (图 1)。笔者利用 1998 年以来较为完整的数字记录资料, 用多台法计算了云南地区的地震波速比。

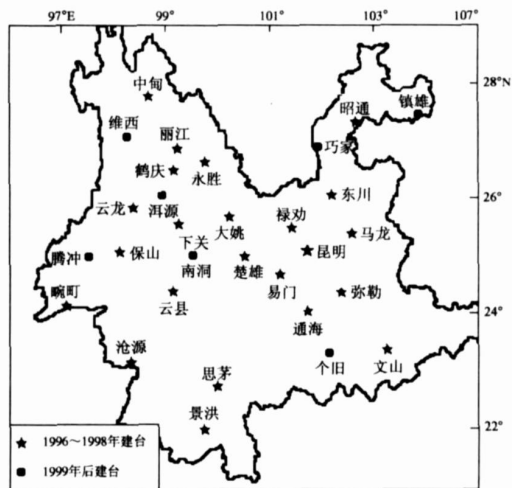


图 1 云南地区数字台网台站与建台时间分布

* 收稿日期: 2007-08-15.

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

1.2 计算方法

根据 4 个以上数字地震台记录到的清晰直达波 Pg S 震相的到时 T_p 、 T_s 用最小二乘法计算波速比

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

式中 n 为台站个数, $\Delta T_i = T_{si} - T_{pi}$ 同时还计算了剩余标准差 S 和相关系数 R

计算中采用的地方震资料震相初动清晰, 易于分辨, 所选台站包含 $V_s - V_p$ 在 20 ~ 25 的远台和小于 0.5 的近台, 未选用 $V_s - V_p$ 大于 25 的台站, 以减少传播路径上的介质对波速比的影响。在能计算出波速比的地震中, 波速比误差大于 0.03 和相关系数小于 0.9 的均不采用。1998 年以来云南地区参与统计波速比的地震共 2 985 个, 占可计算波速比总数的 85%, 具有相当数量的统计样本。

2 云南地区地震波波速比的时间曲线

2.1 云南地区波速比的时间进程

将计算出的波速比值按时间顺序分别作全省、分区域波速比时间月频度曲线, 及部分时段波速比逐点时间进程曲线 (图 2)。图中点划线表示波速比月均值或逐点值的平均值, 点线表示波速比月均值或逐点值的一倍方差。

从图 2 可见, 1998 ~ 2006 年, 云南地区的波速比月均值曲线处于 1.65 ~ 1.80 之间, 平均值为 1.685 一倍方差线为 1.653 与 1.717, 从图中可见 2002 年 10 月至 2004 年 11 月波速比月均值均低于平均线, 而 2004 年 12 月突升至 1.75 之后 2005 ~ 2006 年均在高值 1.74 上下波动。

将 2002 与 2005 年的波速比数值以点为单位作时间曲线 (图 2b、c), 可见, 2002 年云南地区的波速比值在 1.55 ~ 2.08 之间, 最大与最小值差为 0.53 均值为 1.67 比云南地区多年月均值稍低, 一倍均方差为 1.548 与 1.792 而 2005 年的波速比起伏于 1.38 ~ 2.4 之间, 最大与最小值差为 1.02 波速比的波动较大, 平均值为 1.816 高于多年波速比月均值的一倍方差线。

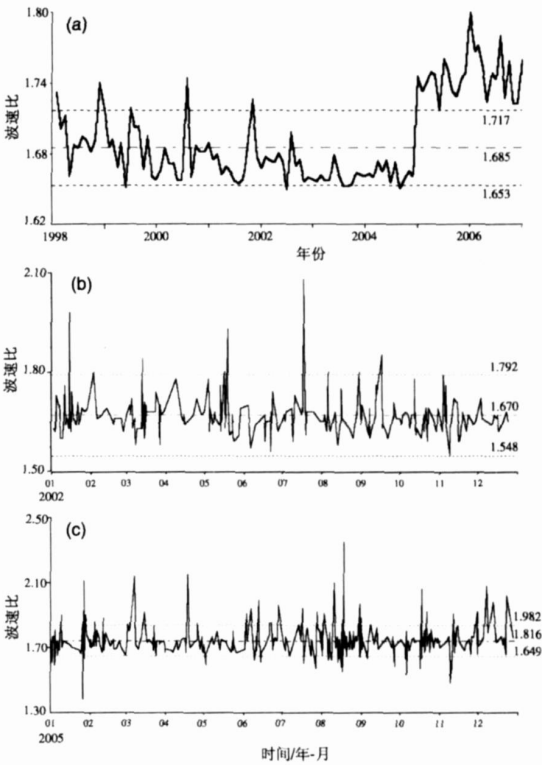


图 2 云南地区波速比时间进程曲线
(a) 月均值曲线; (b) 2002 年逐点值曲线;
(c) 2005 年逐点值曲线

2.2 分区域的波速比时间进程

云南地区主要有程海、红河、小江与怒江—澜沧江等断裂, 它们将区域划分为多个构造单元。结合强震活动的格局, 云南地区常被分为 3 个地震活动区域: 滇西地区 (24° ~ 29.5°N 97.5° ~ 101°E), 滇东地区 (23.5° ~ 29.5°N 101° ~ 105°E) 和滇西南地区 (21.5° ~ 24°N 97.5° ~ 103°E)。下面对各区域进行分析。

(1) 滇西地区。1998 ~ 2006 年间该区域的波速比月均值最低为 2003 年 1 月的 1.64 最高值为 2000 年 6 月的 1.81, 平均值为 1.686 一倍方差为 1.653 与 1.718。如图 3a、b 所示, 2004 年 12 月至 2005 年 12 月波速比明显高于月均值的平均线, 2001 年 1 月至 2004 年 11 月间相对较低, 在月均值的平均线以下一倍方差线内波动。将 2005 年滇西地区的波速比逐点展开, 其值在 1.48 ~ 2.11 之间, 最大与最小值差为 0.63 平均值为 1.737。波速比值超过 2.0 的有 2 次: 2005 年 1 月 26 日宾川 2.5 级地震的 2.11; 12 月 22 日龙陵 2.5 级地震的 2.02 最小值为 11 月 9 日凤庆 2.6 级地震的 1.48。

(2) 滇东地区。1998 ~ 2006 年间该区域的波

速比月均值最低为 1998 年 5 月的 1.62 最高值为 2005 年 12 月的 1.84 平均线为 1.68 一倍方差为 1.642 与 1.718 如图 3^③ (c) 所示, 2004 年 12 月波速比突升至 1.81 之后的波速比月均值明显高于平均线, 1998~1999 年的月均值波动较大, 其余时段内波速比值相对稳定。将 2005 年滇东地区的

波速比逐点展开, 可见 2005 年的波速比起伏于 1.38~2.15 之间, 最大与最小值差为 0.77 平均值为 1.73 波速比值超过 2.0 的仅有两次: 2005 年 4 月 18 日弥勒 2.5 级地震的 2.15 12 月 7 日元江 2.5 级地震的 2.08 波速比最小值为 1 月 26 日文山 2.5 级地震的 1.38

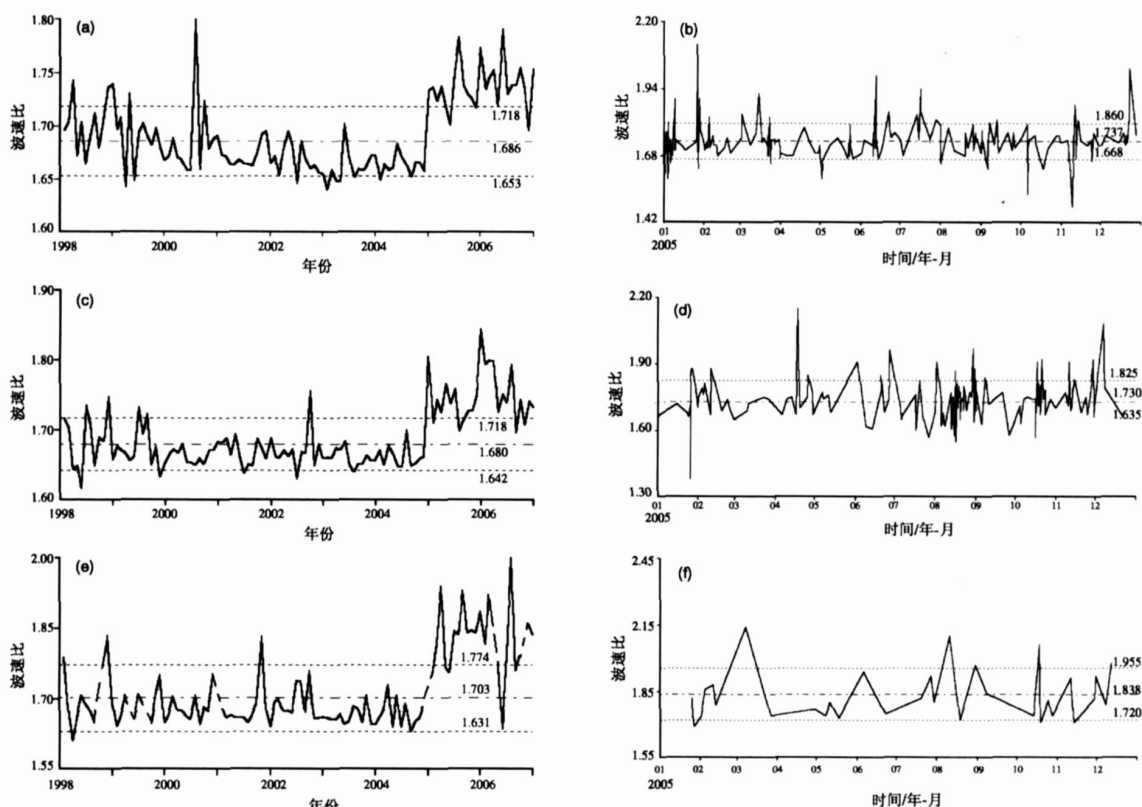


图 3 各地区波速比时间进程曲线

(a) 滇西月均值; (b) 滇西 2005 年逐点值; (c) 滇东月均值;
(d) 滇东 2005 年逐点值; (e) 滇西南月均值; (f) 滇西南 2005 年逐点值

(3) 滇西南地区。该区域 1998~2006 年间中、小地震相对较少, 有的月份无波速比值, 月均值曲线中以虚线表示, 该区域的波速比月均值最低为 1998 年 3 月的 1.61 最高值为 2005 年 12 月的 1.95 平均线为 1.70 一倍方差分别为 1.63 与 1.77 如图 3^③ 所示, 波速比从 2004 年 11 月的 1.69 突升至 2005 年 1 月的 1.81 2005 年的波速比月均值在一倍方差线以上波动, 除 2006 年 5 月出现一低值点外, 其余时段内波速比值相对稳定。将 2005 年滇西南地区的波速比逐点展开, 可见 2005 年的波速比起伏于 1.65~2.35 之间, 最大与最小值差为 0.7 平均值为 1.838 波速比值超过 2.0 的有 4 次: 2005 年 3 月 7 日勐腊 3.6 级地震

的 2.14 8 月 10 日绿春 2.7 级地震的 2.1; 勐腊 10 月 17 日 3.4 级地震的 2.02 18 日 3.2 级地震的 2.06 波速比最小值为 1 月 27 日景洪 3.3 级地震的 1.69

总之, 1998~2006 年云南地区波速比月均值为 1.685 2002 年无中强地震活动背景下月平均值为 1.67 比值在 1.55~2.1 之间, 2005~2006 年的平均值为 1.74 滇西、滇东地区的均值线接近全省的 1.685 滇西南地区的均值线为 1.703 高于其余两区域, 滇西地区月均值变化幅度 (最大值与最小值差) 为 0.65 较另两区域小。2005 年在全省波速比整体较高的背景下, 滇西南地区的波速比均值线为 1.84 远远高于全省与其余两区

域的平均值。

3 2005年后云南波速比与强震的关系

在以往的震例中，地震前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，成为地震的前兆信息（梅世蓉，1993）。但有部分中强地震震前波速比异常呈现高值现象（蔡静观等，1999；周焕鹏，1989），表明地震孕育是一个十分复杂的物理过程。

3.1 云南地区高波速比与中强地震

为讨论 2005年后云南地区波速比偏高背景下，波速比与地震孕育的关系，将 2005~2006年单点波速比 ≥ 2.0 的高值点与 $M \geq 5.0$ 地震列入图 4 中。其中波速比高值点以符号“▲”表示， $M \geq 5.0$ 地震以符号“●”表示。如图 4 所示，共有 12 次波速比高值点，其中滇东—滇西南地区出现的 9 个波速比高值点在其后的 3~15 个月内，高值点附近 150 km 范围内均发生了 5~6.6 级地震。如 2005 年 4 月 18 日弥勒的高值点，在与其相距 150 km 与 80 km 处分别发生了 2005 年 8 月 5 日会泽 5.3 级与 8 月 13 日文山 5.3 级地震；2005 年 8 月 10 日绿春高值点距 8 月 13 日文山 5.3 级地震 150 km。墨江 2006 年 1 月 12 日发生的 5.0 级地震，距 2005 年 10 月 17 日、18 日勐腊的高值点 150 km，距 2 月 7 日元江地震高值点 50 km。2005 年 3 月 7 日与 2006 年 7 月 22 日勐腊的高值点与 2007 年 5 月 16 日老挝 6.6 级地震相距约 125 km，2006 年 3

月 14 日与 5 月 4 日墨江的高值点与 2007 年 6 月 3 日宁洱 6.4 级地震相距 100 km。其余 3 个高波速比值点：2005 年 1 月 26 日宾川、2005 年 12 月 22 日龙陵与 2006 年 1 月 1 日文山都处于 2.0 高值点，但至今其附近 150 km 范围内尚无 5 级以上地震发生。未来 1 年左右波速比高值点附近 150 km 内发生中强地震的对应率为 75%。

3.2 滇西南波速比异常与 6 级地震

2005 年后滇西南为云南地区波速比最高的区域，也是 6 级强震较为集中的地区。由图 5 可见，在 2005 年以来波速比整体偏高的背景下，仅出现波速比值低于均方差值 1.45（2006 年 5 月 13 日江城 2.4 级地震距离 2007 年 6 月 3 日宁洱 6.4 级地震 95 km）；同时 2006 年 5 月滇西南地区波速比亦为小于方差线的低值 1.64。2006 年 7 月 22 日（7 月仅只一个点可算波速比）高波速比 2.16 时发生勐腊 3.3 级地震（与宁洱地震相距约 200 km，与 5 月 16 日老挝 6.6 级地震相距约 100 km）。2007 年 3 月 6 日波速比再次出现高值点 2.03，为勐腊 3.6 级地震的结果，该点与宁洱地震相距约 90 km。

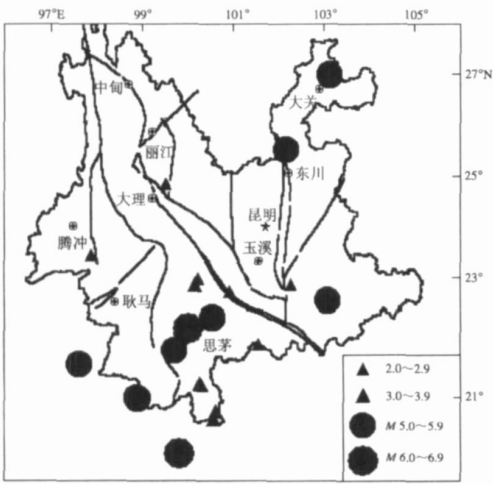


图 4 2005~2006 年云南地区波速比 ≥ 2.0 高值点与 $M \geq 5.0$ 地震震中分布

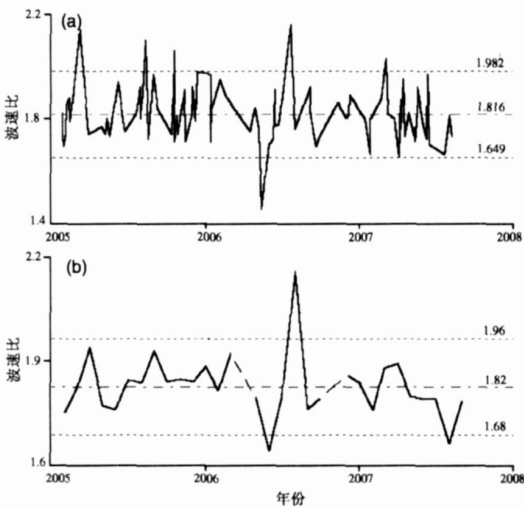


图 5 2005 年后滇西南地区波速比时间分布 (a) 逐点值；(b) 月均值

总之，2007 年 6 月 3 日宁洱 6.4 级地震前，在其附近 100 km 地区波速比于 1 年前出现单点、月值的低波速异常，而震前 3 个月则在其孕震区出现高值单点。

3.3 波速比与孕震机理

地震波速度分布是研究地球结构的主要资料，P 波变化反映的是介质体积形变特征，后续到达的

S波主要体现介质剪切应变特征, 微小裂隙的产生使地震波在穿越介质时波速比减小; 而 S波对于岩体的温度和包含的流体比较敏感, S波在碰到某些软流层或低阻层时, 速度下降很快, 其敏感性远大于 P波 (张学民等, 2004), 因此其波速比 (V_P/V_S) 表现为高值特征。

云南地区地壳具有多层结构, 厚度为 38~40 km (上地壳厚 15.5~17 km, 中地壳厚 18.5~19.5 km, 下地壳厚 8~10 km)。据放一马龙地学断面资料显示云南地区上地壳以高速层为主, 上地壳底部有一低速层, 厚 8~11 km, 顶部埋深仅 10~20 km, 速度 5.7~5.8 km/s (阚荣举等, 1992)。我们使用云南地区数字地震台网地震记录, 具有高分辨率到时数据的大多数地震的震源深度为 5~15 km, 地震波射线经过的路径从此深度到地表台站, 计算得到的平均波速比反映的是上地壳的状态, 当地震发生在软流层之上以脆性介质为主的上地壳时, 波速比体现为低值, 当地震发生于上地壳底部的低速层或碰到某些软流层时, 波速比体现为高值。

依据岩石破裂实验结果, 当压力达 70~90% 破裂应力后, 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会回升 (赵晋明等, 1996)。这与文中提到的 2007 年宁洱 6.4 级地震前, 先出现波速比下降, 后出现高值的情况是一致的。其余中强地震临震前出现高波速比异常点也是同样道理。

4 讨论与结论

(1) 如图 2 所示, 1998~2006 年云南地区数字地震波波速比的均值为 1.685, 稍低于以往多年模拟地震记录的平均值 1.70 (蔡静观等, 1999a), 而两者所采用的计算方法基本相同, 前后之间的微小差异可能为地震仪记录改变所产生, 也可能是不同时段云南地区地壳介质的微变影响, 尚需做深入研究。由于差别很小, 以往根据模拟记录的地震波波速比获得的研究成果, 可延续用于数字地震波对地震预测预报的分析研究中。

(2) 2005 年云南地区的波速比数值均高于以往多年的背景值, 而且持续稳定长达 2 年之久。考

虑到 2004 年 12 月 27 日印尼 8.7 级地震后, 云南地区震时一震后 1 个月内发生多次 3~5 级地震, 同时从地下水位观测到大量的高水位的震时一震后效应, 我们初步认为 2005 年后云南地区的波速比高值变化为印尼大震对云南应力场的影响, 或为云南地区未来 7 级强震活跃期前的应力调整。

(3) 我们对 2007 年宁洱 6.4 级地震前滇西南地区的波速比值进行了初步分析, 给出了震前波速比的变化特征及相应的物理解释, 认为地震的平均波速比值较大幅度的突变, 在所选定的区域与台站相对固定的条件下, 虽受地震所经路径差异的影响, 但从一定程度反映出地下介质的动态变化。目前因研究和检验的实例尚少, 对地震孕育复杂的物理过程认识有限, 所以尚需不断积累, 反复实践和检验, 才能取得客观的认识。

综上所述, 1998~2006 年间云南地区数字地震波的波速比月均值为 1.685, 滇西、滇东地区的波速比均值与云南地区的平均值相近, 滇西南地区的均值偏高于云南地区的平均值, 滇西地区的月均值变化幅度相对小于滇东与滇西南地区, 2002 年 10 月至 2004 年 11 月的月均值低于月均值的平均值。2005 年云南地区的波速比整体较高, 平均值 1.74 高于多年均值线。云南地区波速比空间分布具有区域性、非均匀的特征。

参考文献:

- 蔡静观, 张喜玲. 1999a. 云南地区波速比预报效能的动态分析 [J]. 地震, 19 (4): 359-364.
- 蔡静观, 张喜玲. 1999b. 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, 梅世蓉, 张喜玲, 等. 1999c. 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.
- 阚荣举, 韩源. 1992. 云南遮放至马龙地学断面 (说明书) [M]. 北京: 地震出版社.
- 梅世蓉. 1993. 中国地震预报概论 [M]. 北京: 地震出版社.
- 张学民, 刁桂苓, 束沛钰, 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.
- 周焕鹏. 1989. 菏泽 5.9 级地震前后地震波的异常特性 [J]. 地震研究, 12 (3): 226-233.

Regional Characteristics of Digital Seismic Wave Velocity Ratio in Yunnan

LI Yong-li MAO Hui-ling ZHAO Xiao-yan SU You-jin

(Earthquake Administration of Yunnan Province Kunming 650224 Yunnan China)

Abstract

From the 1998-2006 records of Yunnan Regional Digital Seismic Network, we selected the arrival time data of direct wave Pg and Sg that were observed by at least four stations and with clear phase (including the data of the far stations with arrival time difference of 20-25 s and near stations with arrival time difference less than 0.5 s). Then we calculated the V_p/V_s ratio of the Yunnan area and analyzed its regional distribution characteristics. The results show that the monthly average of V_p/V_s ratio is 1.685 in Yunnan during 1998-2006, the monthly average of V_p/V_s ratio in Southwest Yunnan is higher than that in Yunnan, the monthly average changes little in West Yunnan and is lower than the average in Yunnan from Oct. 2002 to Nov. 2004. However, the V_p/V_s ratio in Yunnan has been high since 2005, about 1.685, higher than many years' average. We think it is a new change of V_p/V_s ratio in regional distribution after the 2004 Indonesia Ms 8.0 earthquake.

Key words: digital seismic wave, V_p/V_s ratio, regional characteristic, Yunnan area