

云南地区波速变化与强震孕育*

杨润海, 王 彬, 郑定昌, 庞卫东, 闵照旭, 秦家政, 吴国华, 许亚吉

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 利用2007年11月至2010年5月云南测震台网46个台站共31个月的连续测震记录, 采用背景噪声瑞利面波层析成像方法得到云南地区不同周期瑞利面波的相速度背景图像; 用滑动时窗得到当前不同时段瑞利面波相速度图像, 将当前速度图像减去背景速度图像, 得到当前速度扰动图像; 将不同时段的速度扰动图像与云南中强地震作对比研究, 发现在该区域中强地震发生前, 在10~25 s周期的相速度扰动图像中, 川滇菱形块体中段瑞利面波波速都有明显升高现象。

关键词: 背景噪声; 格林函数; 波速变化; 强震孕育; 云南地区

中图分类号: P315.3⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)04-0420-08

0 引言

地震是在地应力作用下在地壳或者地幔中岩层突发的破裂过程。既然地震是应力持续积累和突然释放的过程, 那么地震发生前后和地震发生过程中应力状态的测量就尤为重要。然而, 对地应力的直接测量比较困难, 特别是当地震发生在地下深部, 通常只能通过穿透地下介质的地震波进行间接测量。地震波波速的精确测量, 是实现应力测量的一个重要途径。在过去几十年里, 许多研究都证明地壳岩石中波速对应力存在 $10^{-9} \sim 10^{-8}$ Pa的敏感度 (Birch, 1960, 1961; Simmons, 1964), 并被公认是由于岩石孔隙的张合引起的。原理上, 我们完全可以通过求波速的变化来求应力的变化; 众多科学家都为此做出了很大贡献 (De Fazio *et al.*, 1973; Reasenber, Aki, 1974; Leary *et al.*, 1979; Yukutake *et al.*, 1988; Yamamura *et al.*, 2003; Silver *et al.*, 2007)。

测量地球内部的波速, 需要地震射线穿透地球内部。天然地震是一种选择, 但由于天然地震时空分布不均匀, 而且定位精度不能达到精确测量波速的精确变化, 前人对此进行了艰苦的探索 (Nersesov *et al.*, 1969; Aggarwal *et al.*, 1973; Mcevilley, Johnson, 1974; Kanamori, Fuis, 1976)。高精度观测系统和计算机技术的发展, 使人们能够以更高的分辨率来观测伴随地震孕育过程发生

的地震波走时变化 (Ratdomopurbo, Poupinet, 1995; Schaff, Beroza, 2004)。国内外许多学者利用不同的主动源, 在不同的观测环境下, 观测到了波速与固体潮、大气压力和降雨等的关系 (Yukutake *et al.*, 1988; Silver *et al.*, 2007; Niu *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2008)。我国许多研究人员结合实际震例, 对地震发生前后波速变化或波速比异常开展了相关研究, 并与实际地震预报工作紧密结合, 取得了一些成果和经验, 并尝试归纳波速比变化的时间、幅度、形态与强震的关系 (刁桂苓等, 2005; 张学民等, 2004; 秦保燕, 张元生, 2000; 蔡静观等, 1997, 1999, 2000)。

我们可以利用人工震源主动探测地球介质的波速变化, 但这是一种耗时且成本极高的方法。近几年出现的从地震背景噪声中提取格林函数的方法为人们利用测震台网数据连续监测地壳介质波速的微弱变化提供了可能。从背景噪声中提取出来的具有面波性质的格林函数不仅能反演地壳速度精细结构, 而且能反映地质构造单元波速随时间的变化, 这就为我们了解地震发生和进行地震预测提供了很好的思路。更重要的是, 利用背景噪声还有其它方法所不具备的特殊优势: 背景噪声时刻都存在; 台站的位置是固定的; 格林函数的提取具有可重复性。正是因为这3个优势, 有效地降低了以往研究中的不确定因素, 让我们能够准实时地研究波速的变化规律。

Campillo 和 Panl (2003) 利用多重反射尾波提

* 收稿日期: 2011-07-25.

基金项目: 云南省基金项目 (2009ZC179M, 2010ZC143), 云南省“十项措施”(强震动力学研究)联合资助。

取了格林函数。Shapiro 等 (2004, 2005) 用背景噪声做相关性研究, 提取了格林函数。Ratomopurbo (2005)、Pandolfi 等 (2006) 和 Wegler 等 (2006) 对火山活动区的地震记录应用了背景噪声方法, 得到了该地区速度的微弱改变。Poupinet 等 (1984), Nishimura 等 (2000), Peng 和 Ben-Zion (2006) 也运用了自相关技术, 得到了台站邻近地区在地震发生后地震波速相应下降的结果。Brenguier 等 (2008) 利用超过 18 个月的背景噪声记录提取格林函数, 并计算出相对的地震速度扰动, 用来研究火山的波速变化, 研究结果显示: 每次火山喷发前能够清晰地识别到地震波速度降低。这项新的观测提高了预报火山喷发及先验地估计火山喷发的强度和对环境影响的能力。Sens-Schönfelder 和 Wegler (2006) 用背景噪声数据连续监测 Merapi 火山附近地震波速度的微弱变化, 每天的速度变化测量精度达到 0.1%。Wegler 等 (2006) 和 Sens-Schönfelder 等 (2006) 用背景噪声做自相关函数来监测断层区波速在地震前后的变化, 用自相关的方法研究一个地震台背景噪声数据, 发现了 MiNiigata M_w 6.6 地震前波速变化了 0.6%。Xu 和 Song (2009) 利用背景噪声方法观察到苏门答腊岛在 2004、2005 和 2007 大地震过后瑞利波走时的变化。

李军等 (2009) 利用福建测震台网连续背景噪声记录, 得到了 2007 年 8 月 14 日至 2008 年 7 月 1 日福建地区瑞利波波速的相对变化时空动态图像, 结果表明, 在台网内多次中等强度的地震或震群 ($M_L > 3.0$) 中福建地区瑞利波波速均表现出震前升高, 震后下降并恢复的变化趋势。刘志坤和黄金莉 (2010) 研究发现 2008 年汶川 8.0 级地震造成了震源区地震波速度的急剧降低, 最大降幅达 0.4%;

上述研究表明, 利用从背景噪声中提取的格林函数, 能够准实时地监测地壳介质的波速变化。云南地区是一个地震多发区域, 有可靠的地震监测台站和良好的数据, 是利用地震背景噪声研究中强地震前后地壳波速变化的良好区域。

1 方法与数据处理

1.1 处理方法

笔者采用的数据处理方法同 Bensen 等 (2007) 描述的基本一致:

(1) 格林函数的提取: 单台资料预处理, 包括对数据进行重采样, 消除仪器响应及趋势项,

带通滤波, 谱白化, “one-bit” 处理; 对经过单台处理后的台站数据作台站对间互相关计算, 提取台站对间每一天的格林函数; 最后对格林函数进行叠加处理。

(2) 相速度求取: 基于 Levshin 等 (1989) 提出的自适应时频分析技术 (FTAN) 对数据进行相速度的测量。

(3) 面波成像: 用 Ditmar 与 Yanovaskya (1987) 面波层析成像反演方法分别对 8 ~ 40 s 范围内的 15 个中心周期反演, 得到云南地壳的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格各个周期的相速度分布图像。

(4) 波速场扰动: 分别将研究时段内所有台站对间的格林函数叠加, 并反演成像, 得到研究区域背景速度场; 滑动叠加三个月台站间的格林函数, 反演成像, 得到当前 (第 3 个月) 速度场; 将当前速度场减去背景速度场, 得到当前速度扰动场。

1.2 数据处理

首先, 笔者收集了 2007 年 11 月至 2010 年 5 月云南测震台网 46 个固定台站 (图 1) 共 31 个月的连续地震噪声记录。原始数据采样率为 100 Hz, 经重采样采样率变 1 Hz, 经格林函数提取, 相速度计算, 面波层析成像, 得到不同相速度的背景速度图像。成像结果显示, 在地质构造块体边界有明显的速度梯度带, 速度结构与深大断裂和地质块体对应关系良好, 尤其是扬子板块边界十分清晰 (图 2)。

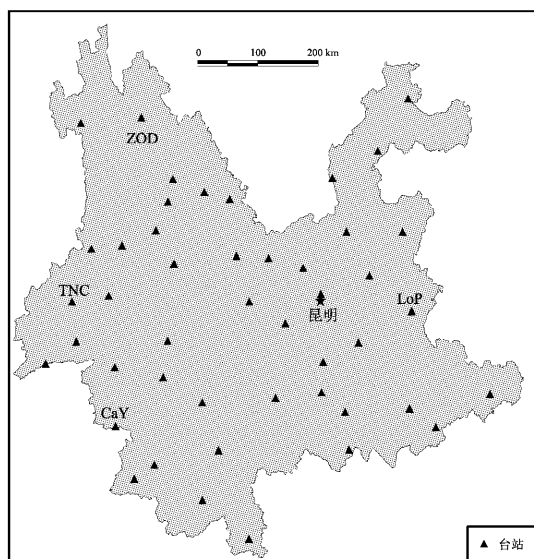


图 1 云南测震台网子台分布图

Fig. 1 Location of the stations of the Yunnan digital seismic network

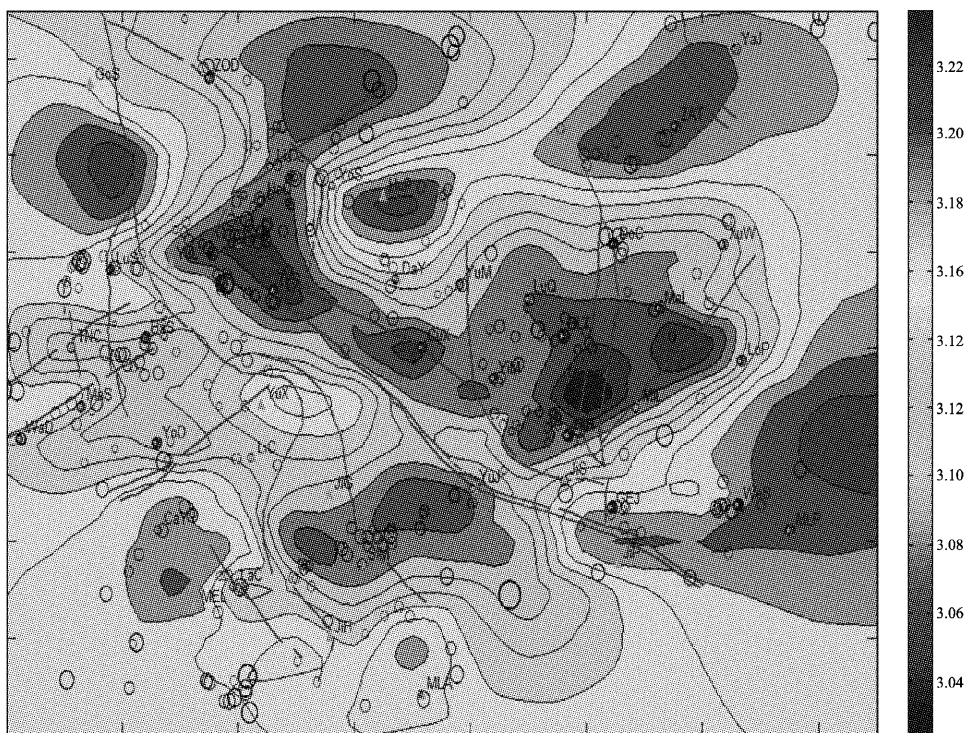


图2 云南地区 20 s 周期相速度分布图 (单位: km/s)

Fig. 2 Image of 20-second phase velocity in Yunnan area

以3个月为滑动窗口窗长,1个月为步长,分别叠加台站间格林函数,并反演成像,得到29个月的随时间变化的瑞利波波速图像。将这29个月的图像与背景波速相减,得到29个月的当前波速扰动图像(图3)。将前三个月的格林函数叠加后作成像处理,作为最后一个月(即第三个月)的速度扰动图像,得到2008年1月至2010年5月共29个月的不同周期相速度扰动图像。笔者研究该时段内中强地震发生时间与速度变化率图像,试图寻找中强地震与速度变化图像之间的关系。

2 数据处理结果

按照数据处理方法,得到周期分别为10 s、12 s、14 s、16 s、20 s和25 s共29个月的瑞利面波相速度扰动图像。8 s、30 s、35 s和40 s周期因射线数较少未做扰动图像分析。

对比不同相速度扰动图像(图3),可以发现速度扰动图像变化规律总体上一致,最明显的特点是成像区域北部(川滇菱形块体中段)在不同时段有明显的速度升高现象。图3为16 s周期瑞利面波相速度扰动图像随时间的变化,对比研究区域内中强地震发生时间,可以看出在中强地震

发生前,该区域速度皆有显著升高。

从图3可看出,2008年1月和2月地震波速在成像区域北部中间(川滇菱形块体中段)速度升高,2008年3月21日云南盈江发生5.0级地震,随后该区域地震波速度降低,接近正常水平;2008年6~7月波速又升高,2008年8月21日云南盈江发生5.9级地震,2008年8月30日四川攀枝花发生6.1级地震,随后波速接近正常水平;2008年11月该区域波速又开始升高,并一直持续到2009年6月,2009年7月9日云南姚安发生6.0级地震;2009年11月2日云南宾川5.0级地震前当月该区域波速又一次明显升高;在2010年2月15日云南元谋5.1级地震前1月,波速也有明显升高。在这七次地震中,虽然两次盈江地震都远离波速异常区,但在2008年3月21日盈江5.0级地震前的1月和2月,川滇菱形块体中段出现明显波速升高异常,2008年8月的盈江地震与攀枝花地震时间相互重叠,未能区分开来。而其它几次地震发生在波速异常区域附近,说明强震前,在某些构造敏感部位,存在可以探测的波速异常。

结果表明:周期在10~25 s的瑞利面波相速度的速度变化率差异最大可达 $\pm 2\%$,在强震($M > 5.0$)

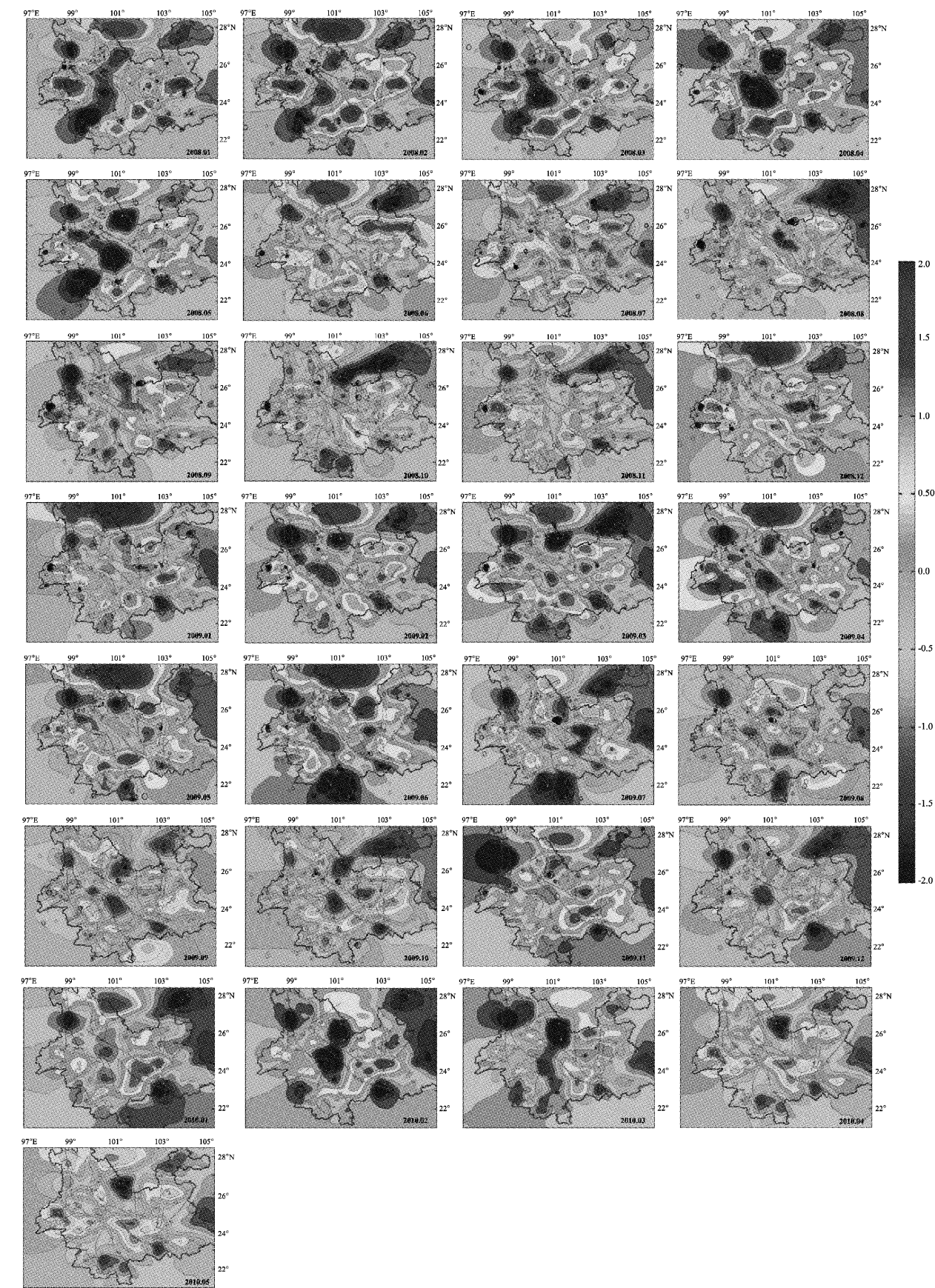


图 3 16 s 周期 29 个月的相速度扰动图 (%)
Fig. 3 Images of 16 – second velocity perturbation for 29 months

前 1~7 个月,在成像区域北部中间(川滇菱形块体中段)波速变化率逐渐升高,在震前约 1 个月达到最大值,中强震发生后,该区域的速度升高现象消失。这种现象在研究时间段内都有明显反映,表明利用背景噪声得到波速变化率,再绘制得出的波速变化率动态图像对云南强震预测有一定意义。

3 讨论

3.1 异常的成像位置

从图 3 看出,中强震前的异常位置在成像区域

的边缘,因台网子台分布不均匀,这一区域的射线密度比较低,那么本文得出的结论是否可靠呢?为此,笔者将能覆盖这一区域的台站对中甸—盐津台站对和丽江—昭通台站对利用采样率为 100 Hz 的数据计算格林函数,叠加所有格林函数,得到参考格林函数,并以 90 天为窗长,1 天为滑动步长,分别叠加格林函数,得到当前格林函数。将当前格林函数与参考格林函数作相关性计算,求取两格林函数间的时延。图 4 和图 5 分别为中甸—盐津和丽江—昭通台站对的参考格林函数的时间变化图,图 4、5 中横坐标是从 2008 年 1 月 1 日开

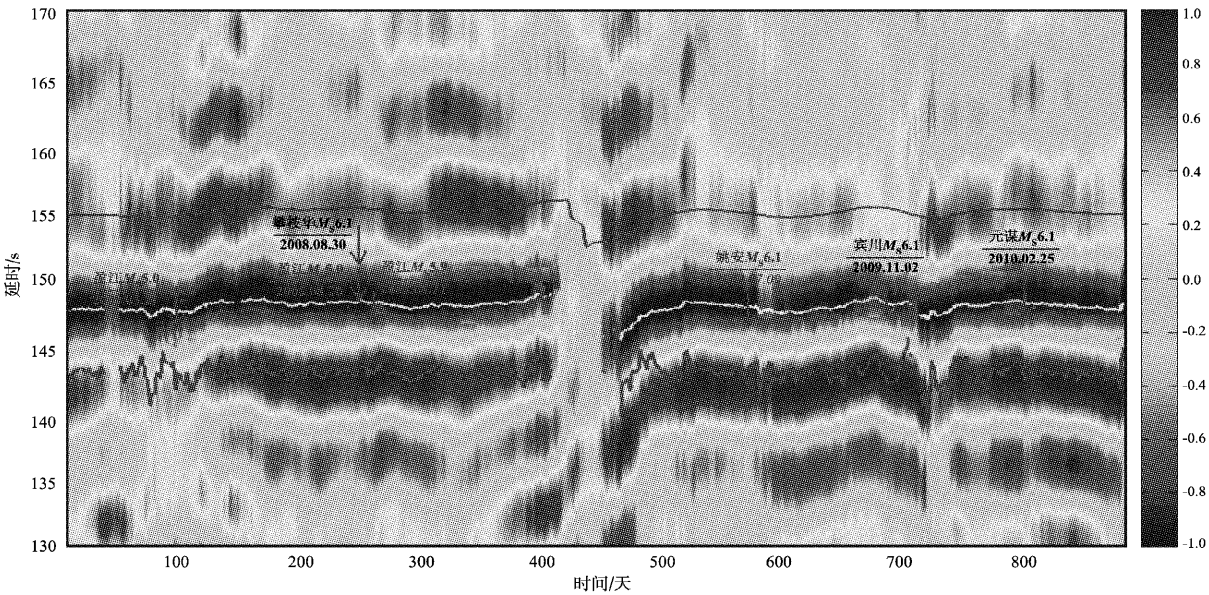


图 4 中甸—盐津台站间格林函数随时间变化
Fig. 4 The empirical Green's function change with time for station pair ZOD - YaJ

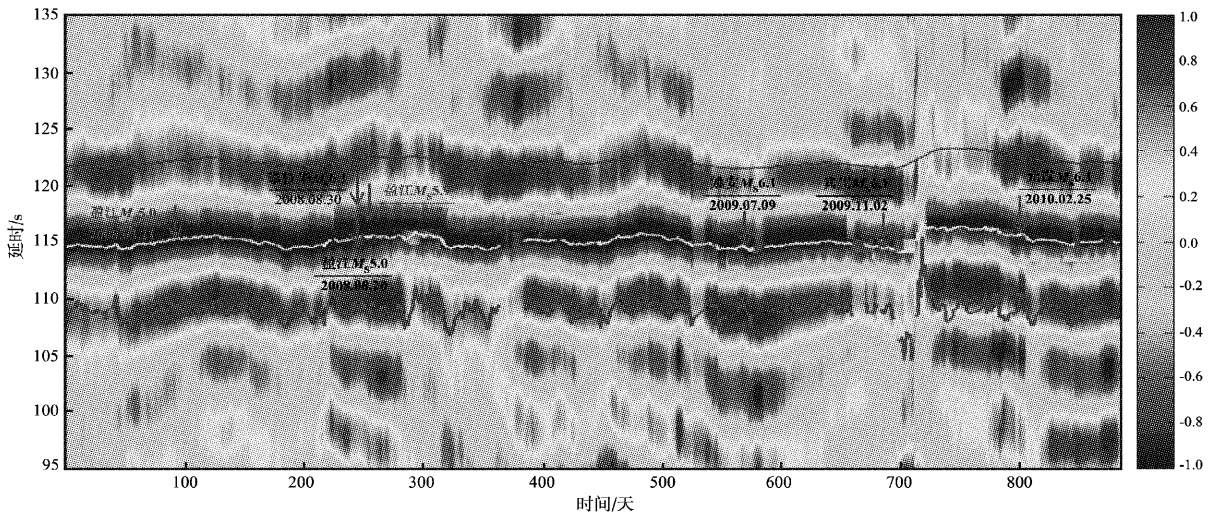


图 5 丽江—昭通台站间格林函数随时间变化
Fig. 5 The empirical Green's function change with time for station pair LiJ - ZAT

始的天数,纵坐标是格林函数延时,单位为 s (秒)。将得到的格林函数间的延时,作 90 天滑动平均,就得到延时变化的趋势项(图 4、5 中最上面的一条蓝线为延时变化的趋势项),下面一条蓝线是延时与趋势之差。格林函数间的延时变化为了与格林函数波形变化一致,都作了归一化处理,延时变化在 $\pm 1\%$ 以内,由互相关计算得到的速度变化 ($\pm 1\%$) 小于由成像得到的速度变化 ($\pm 2\%$)。图 4、5 中还标出了各次地震的位置,可看出,参考格林函数的同相轴随着时间变化而变化,说明波速是有变化的。仔细观察格林函数延时变化和同相轴变化,可以发现在中强地震前,都有波速增加的现象,说明虽然波速异常区域靠近成像区域边缘,但结果是可靠的。笔者已收集到四川台网的数据,将对异常区域作进一步的成像研究。

3.2 利用台站对间的格林函数是否能监测中强震

云南地区中强震频发,笔者利用穿过震源区的台站对(台站距 60 ~ 100 km),采用类似图 4、5 的数据处理方法,却没有得出明确的震源区震前、震后异常波速变化的可靠证据。这可能是因为震源区速度变化量比较小,需要进一步探索。而用成像的方法更有利于区域内异常的发现,说明成像方法可能有波速变化累积效应,利于区域波速异常的识别。我们的结果没有得出类似李军(2009)等在福建地区的研究成果——中强震前震源区附近没有明显的波速增高现象,这可能是福建台网的密度高于云南台网密度的缘故。

3.3 波速异常区域的动力学原因

如果波速升高的结论是可靠的,那么为什么云南地区地震波速度升高更明显呢?从地质构造上看,这一区域处于扬子板块西边缘,属于古康滇裂谷的北段,处在丽江—小金河断裂和安宁河断裂等活动断裂围限区域,现代构造活动强烈。同时它还属于 GPS 测量结果的运动矢量与现代构造区域应力场方向明显不一致的地方,有其明显的地球动力学背景。我们初步推测这种波速变化率升高的原因是川滇菱形块体向南南东楔入过程中受到扬子板块内相对稳定块体阻挡,同时和壳内拆离作用有关。

3.4 关于波速变化量

对比图 3 和图 4、图 5 的结果,在相似路径上,由当前格林函数和参考格林函数互相关得到

的延时变化率 $\pm 1\%$ (等价于符号相反的波速变化率)比由成像到速度得到的变化率小于 $\pm 2\%$,这可能是由于在频散曲线计算和成像过程引入了误差,放大了速度变化率,但变化趋势是相似的。

4 结论

从背景噪声中提取格林函数,并反演计算得到速度变化场的方法,不受噪声源的时间与空间分布影响的特性,使得地震工作者能够准实时地研究地壳介质的性质变化,也为地震工作者用地震波速变化研究中强地震的物理预测和强震动力学背景提供了良好的前景。

参考文献:

- 蔡静观,张喜玲,李永莉,等. 1997. 云南地区近期强震孕育过程中波速比突变的时空演化特征[J]. 地震学报,19(5):535-541.
- 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.
- 蔡静观. 2000. 波速比计算中的不确定因素和在地震预报中的应用[J]. 地震研究,23(1):51-56.
- 刁桂苓,周仕勇,刘杰,等. 2005. 岫岩地震序列的平均波速比前兆异常[J]. 华北地震科学,23(4):1-5.
- 李军,金星,周峥嵘,等. 2009. 利用地震噪声准实时监测短周期面波波速变化[J]. 地震学报,31(6):629-640.
- 刘志坤,黄金莉. 2010. 利用背景噪声互相关研究汶川地震震源区地震波速度变化[J]. 地球物理学报,53(4):853-863.
- 秦保燕,张元生. 2000. 波速比异常空间演化与主震位置预测[J]. 西北地震学报,22(1):6-10.
- 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):138-150.
- Aggarwal Y P, Sykes L R, Armbruster J, et al. 1973. Premonitory changes in seismic velocities and prediction of earthquakes[J]. Nature, 241(5385):101-104.
- Birch F. 1961. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, part 2 [J]. JGR, (7):2199-2224.
- Birch F. 1960. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, part 1 [J]. JGR, 65(4):1083-1102.
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, et al. 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements[J]. Geophys J Int, 169(3):1239-1260.
- Brenguier F, Shapiro N M, Campillo M, et al. 2008. Towards Forecasting Volcanic Eruptions using Seismic Noise[J]. Nature Geoscience, 1(2):126-150.
- Brenguier F, Campillo M, Hadziioannou C, et al. 2008. Postseismic relaxation along the San Andreas Fault at Parkfield from continuous seismological observations[J]. Science, 321(5805):1478-1481.
- Campillo M, Paul A. 2003. Long-range correlations in the diffuse seismic coda[J]. Science, 299, 547-549, doi:10.1126/science.1078551.

- De Fazio T L, Aki K, Alba J. 1973. Solid earth tide and observed change in the in situ seismic velocity [J]. JGR, 78 (8) : 1319 – 1322.
- Dirmar P G, Yanovskaya T B. 1987. Generalization of Backus Gilbert method for estimation lateral variations of surface wave velocities [J]. phys Sobid Earth Izlestia Acad Sci USSR, 23 (61) : 470 – 477.
- Kanamori H, Fuis G. 1976. Variation of P-wave velocity before and after the Galway Lake earthquake ($M_L = 5.2$) and the Goat Mountain earthquakes ($M_L = 4.7, 4.7$), 1975, in the Mojave Desert, California [J]. BSSA, 66 (6) : 2017 – 2037.
- Leary P C, Malin P E, Phinney R A, *et al.* 1979. Systematic monitoring of millisecond travel time variations near palmdale, california [J]. Geophys Res, 84 (B2) : 659 – 666.
- Levshin A L, Yanovskaya T B, Lander A V, *et al.* 1989. Seismic Surface Waves in a Laterally Inhomogeneous Earth [M]. // Keilis-Borok, V I, Kluwer, Norwell, *et al.* Modern Approaches in Geophysics.
- McEvelly T V, Johnson L R. 1974. Stability of P and S velocities from central California quarry blasts [J]. BSSA, 64 (2) : 343 – 353.
- Nersesov I L, Semenova A N, Simbireva I G. 1969. Space-time distribution of the travel-time ratios of transverse and longitudinal wave in the Gram area [M] // The Physical Basis of foreshocks, Nauka, Moscow.
- Niu F L, Silver P G, Daley T M, *et al.* 2008. Preseismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site [J]. Nature, 454 (7201) : 204 – 209. doi: 10.1038/nature07111.
- Nishimura T, Uchida N, Sato H, *et al.* 2000. Temporal changes of the crustal structure associated with the $M_6.1$ earthquake on September 3, 1998 and the volcanic activity of mount Iwate, Japan [J]. Geophys Res Lett, 27 (2) : 269 – 272.
- Pandolfi D, Bean C J, Saccorotti G. 2006. Coda wave interferometric detection of seismic velocity changes associated with the 1999 $M = 3.6$ event at Mt. Vesuvius [J]. Geophys Res Lett, 33, L06306, doi: 10.1029/2005GL025355.
- Peng Z, Ben-Zion Y. 2006. Temporal changes of shallow seismic velocity around the Karadere-Düzce branch of the north Anatolian fault and strong ground motion [J]. Pure Appl Geophys, 163 (2 – 3) : 567 – 600.
- Poupinet G, Ellsworth W L, Frechet J. 1984. Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: an application to the Calaveras fault, California [J]. JGR, 89 (87) : 5719 – 5731.
- Ratdomopurbo A, Poupinet G. 1995. Monitoring a temporal change of seismic velocity in a volcano: application to the 1992 eruption of Mt. Merapi (Indonesia) [J]. Geophys Res Lett, 22 (7) : 775 – 778.
- Reasenber P, Aki K. 1974. A precise, continuous measurement of seismic velocity 453 for monitoring in situ stress [J]. JGR, 79 (2) : 399 – 406.
- Saito M. 1988. DISPER80: a subroutine package for the calculation of seismic normal – mode solutions, seismological algorithms [M] // Doornbos D J. Press Seismological Algorithms, New York, 293 – 319.
- Schaff D P, Beroza G C. 2004. Coseismic and postseismic velocity changes measured by repeating earthquakes [J]. JGR, 109 (B10302), doi: 10.1029/2004JB003011.
- Sens-Schönfelder C, Wegler U. 2006. Passive image interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi volcano, Indonesia [J]. Geophys Res Lett, 33, L21302, doi: 10.1029/2006GL027797.
- Shapiro N M, Campillo M. 2004. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise [J]. Geophys Res Lett, 31, L07614, doi: 10.1029/2004GL019491.
- Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, *et al.* 2005. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise [J]. Science, 307 (5715) : 1615 – 1618. doi: 10.1126/science.1108339.
- Silver P G, Daley T M, Niu F, *et al.* 2007. Active source monitoring of corsswell seismic travel time for stress induced changes [J]. BSSA, 97 (18) : 281 – 293.
- Simmons G. 1964. Velocity of shear waves in rocks to 10 kilobars 1 [J]. JGR, 69 (6) : 1123 – 1130.
- Wang B S, Zhu P, Chen Y, *et al.* 2008. Continuous subsurface velocity measurement with coda wave interferometry [J]. JGR, 113 (B12313), doi: 10.1029/2007JB005023.
- Wegler U, Lühr B-G, Snieder R, *et al.* 2006. Increase of shear wave velocity before the 1998 eruption of Merapi volcano (Indonesia) [J]. Geophys Res Lett, 33, L09303, doi: 10.1029/2006GL025928.
- Xu Z J, Song X D. 2009. Temporal changes of surface wave velocity associated with major Sumatra earthquakes from ambient noise correlation [C]. Proc Natl Aca Sci USA, 106 (34) : 14 207 – 14 212.
- Yukutake H, Nakajima T, Doi K. 1988. In situ measurements of elastic wave velocity in a mine, and the effects of water and stress on their variation [J]. Tectonophysics, 149 (1 – 2) : 165 – 175.
- Yamamura K, Sano O, Utada H, *et al.* 2003. Long – term observation of in situ seismic velocity and attenuation [J]. JGR, 108 (B6) : 2317, doi: 10.1029/2002JB002005.

Variation of Wave Velocity and Strong Earthquake Preparation in Yunnan Region

YANG Run-hai, WANG Bin, ZHENG Ding-chang, PANG Wei-dong, MIN Zhao-xu,
QIN Jia-zheng, WU Guo-hua, XU Ya-ji
(*Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

Abstract

Applying the Rayleigh Wave Tomography method to the processing of the continuous ambient data recorded by 46 broadband sub-stations of the Yunnan Seismological Network from November, 2007 to May, 2010, we obtain the background image of the phase velocity of the Rayleigh Wave with different periods in Yunnan area. Then, by removing the background phase velocity from the current phase velocity reconstructed by sliding time-window, we obtain the current velocity-perturbation images. Comparing the velocity-perturbation images with the distribution of moderate-strong earthquakes in Yunnan, we find that before moderate-strong earthquakes in the middle part of the Sichuan-Yunan Rhombic Block, Rayleigh-phase velocity increased significantly in the perturbation images of phase-velocity from 10s to 25s.

Key words: ambient noise; Green's Function; variation of wave velocity; strong earthquake genesis