第 55 卷 第 1 期
2012 年 1 月

地 球 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS

Vol. 55, No. 1
Jan., 2012

赵盼盼,陈九辉,刘启元等.汶川地震区地壳速度相对变化的环境噪声自相关研究.地球物理学报,2012,**55**(1): - ,doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2012.01.001

Zhao P P, Chen J H, Liu Q Y, et al. Crustal velocity changes associated with the Wenchuan *M*8.0 earthquake by auto-correlation function analysis of seismic ambient noise. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, **55**(1): - ,doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2012.01.001

汶川地震区地壳速度相对变化的环境噪声自相关研究

郭飚

赵盼盼,陈九辉*,刘启元,李 昱,李顺成,郭 飚,王 峻,齐少华

中国地震局地质研究所,地震动力学国家重点实验室,北京 100029

摘 要 2006 年中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室在川西地区(100°E～105°E, 26°N～32°N)布设了由 297 个宽频带地震台组成的密集流动地震观测台阵.本文利用川西流动地震台阵 29°N 以北地区的 137 个台站 2007 年 1 月至 2008 年 10 月的连续三分量地震环境噪声记录研究了汶川地震震前震后地壳速度变化特征.借助川西台阵的密度优势,我们针对单台三分量噪声自相关函数和单台不同分量间的互相关函数,利用互谱移动窗技术,在 0.33～1 Hz 频带范围内测量了经过 50 天滑动平均的相关函数与长时间平均参考相关函数的走时变化率,进而求得地壳浅部速度随时间的相对变化,并得到其空间分布特征.本文结果表明,利用环境噪声自相关方法可以得到与互相关方法基本一致的同震速度变化分布图像,同震速度变化分布与同震体应变具有明显相关性.具有更高空间分辨率的噪声自相关研究进一步发现,在鲜水河断裂和龙门山断裂交汇区存在同震速度增加区,这个区域与同震库伦应力变化和地表形变观测预测的周边断层库伦应力增加区一致.我们的研究发现,同震库伦应力增加效应的持续时间大约为 2 个月左右,在此之后,区域应力场逐渐恢复为普遍的应力下降.

关键词 环境噪声,自相关函数,地震波速变化,汶川地震,川西台阵

doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2012.01.001 **中图分类号** P631 **收稿日期** 2011-04-06,2011-06-28 收修定稿

Crustal velocity changes associated with the Wenchuan *M*8.0 earthquake by auto-correlation function analysis of seismic ambient noise

ZHAO Pan-Pan, CHEN Jiu-Hui*, LIU Qi-Yuan, LI Shun-Cheng, GUO Biao, LI Yu, WANG Jun, QI Shao-Hua

State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, Chinese Earthquake Administration, Beijing 100029, *China*

Abstract A temporal seismic array consisted of 297 broadband seismographs was deployed in Western Sichuan (100°～105°E, 26°～32°N) in 2006, and the observation covered the great 2008 Wenchuan earthquake. We used the continuous three-component ambient noise data from January, 2007 to October, 2008, recorded at the 127 stations north of 29°N, to study the crust seismic velocity changes before and after the earthquake. For every single station, three autocorrelation functions (ACF) and three cross correlation functions (CCF) are calculated and stacked in 10 days for three components of noise data respectively. Then we estimated the relative

基金项目 国家自然科学基金项目(40974023),国家重点基础研究发展计划项目(2004CB418402)资助.

作者简介 赵盼盼,男,1987 年生,硕士研究生,主要从事宽频带地震学研究.E-mail:panpanzhao@live.cn

* **通讯作者** 陈九辉,男,1969 年生,研究员,主要从事宽频带地震学和深部探测研究.E-mail:chenjh@ies.ac.cn

velocity changes by measuring travel time shifts between the 50-day-moving-average stacks and the reference empirical correlation functions. We obtained the characteristic of spatial distribution of relative velocity changes caused by Wenchuan earthquake. Our results indicate that ACF analysis can get similar coseismic velocity changes pattern with the CCF method, and the distribution of coseismic velocity changes is closely correlated with the volumetric strain changes during the Wenchuan earthquake. We also found an area of velocity increase in the region where the Longmenshan Fault zone adjoins the Xianshuihe Fault zone. This area is consistent with the faults that the Coulomb stress increased by the occurrence of the Wenchuan earthquake as predicted by the source mechanism and surface deformation. We also found that the crustal velocity increase lasted for about 2 months and then decreased with ubiquitous stress release in the studying region.

Keywords Ambient noise, Auto-correlation function, Seismic velocity change, Wenchuan earthquake, Western Sichuan seismic array

1 引 言

2008年5月12日,四川龙门山断裂带发生M_w7.9级地震,造成巨大伤亡与损失[1,2].地表地质考察发现了汶川地震造成长达240 km的断裂带[3],地表破裂过程反演发现汶川地震起始于龙门山断裂带南段,并沿龙门山东北方向单向传播超过320 km[4~6],余震定位结果[7]发现龙门山断裂带在近地表倾角达70°~80°,而在接近地震起始破裂的深度(14~19 km)倾角仍有30°~60°.利用GPS观测结果反演得到的汶川地震震源过程反演结果[8]进一步证实了这一观测结果.以上观测结果均说明汶川地震是迄今为止在高角度逆冲断裂上发生的强度最大的内陆地震[9].地震的孕育和发生通常伴随着应力场变化、地下流体迁移、地壳浅层破坏等事件的发生,从而导致地壳介质物理性质的变化.对地壳介质物理性质在强震前后的变化进行研究,将有助于理解强震孕育、发生和震后恢复过程,有助于地震动力学过程的研究.研究汶川地震前后区域介质和应力场变化对具有特殊发震构造的汶川地震尤为重要.

地壳介质的物理性质变化一般可以通过主动源或被动源重复观测得到[10~12].近年来,对环境噪声研究的最新进展允许我们可以在不采用重复震源的情况下,对地壳介质性质进行长期的重复监测.Shapiro等[13]对地震台站长时间的地震噪声记录进行互相关计算,提取出了台站间的面波格林函数,阐明了由地震环境噪声获得台站间地球内部介质响应的可行性.Sens-Schönfelder等[14]建议将环境噪声方法与传统的由重复地震测量地球内部速度相对变化的尾波干涉测量法[15]相结合.由此,Wegler等[16]利用自相关函数尾波,Brenguier等[17]、Chen等[18]、刘志坤等[19]利用互相关函数的尾波,Xu等[20]利用互相关函数的面波分别研究了2004年中越地震、2004年帕克菲尔德地震、2008年汶川地震和2004~2007年苏门答腊强震群地震区同震速度相对变化.与利用重复地震和主动源研究地球内部速度相对变化相比,地震环境噪声方法具有明显的优势:首先,连续的噪声数据可以从广泛分布的固定和流动地震台网很容易地获得,而重复地震的发生则具有不可控制的随机性;其次,在环境噪声方法中,将某一台站视为表面点源,它不随时间变化,而重复地震的位置和震源机制都只是近似为一致;最后,环境噪声方法长期监测地壳结构变化具有其他方法无法比拟的成本优势.

自2006年10月开始,中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室在中国川西地区(100°E~105°E, 26°N~32°N)布设了由297个宽频带地震台组成的密集流动地震观测台阵.川西地震台阵覆盖了川滇块体、松潘—甘孜地块及华南地块的四川盆地地区,涵盖了汶川地震破裂带约2/3区域,跨越汶川地震震前到震后进行了持续观测.利用该台阵观测取得的数据,中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室从地壳上地幔速度结构和汶川地震构造背景[21~23]、区域地壳各向异性方向和应力场分布[24]、汶川地震余震分布和地震构造[6]以及川西台阵覆盖区场地响应[25]等各个不同方面对汶川地震区、青藏高原东缘结构和动力学进行了深入研究.本文将使用川西地震台阵的地震噪声数据研究汶川地

震区同震波速相对变化及其区域分布特征.

2　数据与方法

2.1　台站与观测数据

本文使用了川西宽频带流动地震台阵龙门山断裂带附近的 137 个观测台站(图 1)的三分量连续波形资料(Z、E、N). 所用资料的时间范围为 2007 年 1 月到 2008 年 10 月. 所用台站平均间距 20～30 km，所有台站都安装了 Reftek130B 数据采集器和 Guralp CMG-3ESP/C 地震计，连续记录波形采样率为 40 sps.

2.2　速度相对变化的噪声自相关测量

研究表明[26～31]，由散射波场(例如环境噪声、散射尾波)的互相关函数可以提取出台站间的格林函数. 假设两个台站分别位于 A，B 两点，则有如下关系成立：

-dCab/dt=-Gab(-t)+Gba(t)

$$\frac{\mathrm{d}C_{AB}(t)}{\mathrm{d}t} = -G_{AB}(t) + G_{BA}(t)$$

$$\approx -G_{AB}(t) + G_{BA}(t),$$

其中，$C_{AB}(t)$ 是两个台站间的互相关函数，

$$C_{AB}(t) = \int_0^{t_C} v_A(\tau) v_B(t+\tau)\mathrm{d}\tau,$$

$v_A(t)$ 和 $v_B(t)$ 是持续的台站记录，t_C 是互相关时间，$\tilde{G}(t)$ 是由台站噪声互相关函数微分得到的经验格林函数，$G(t)$ 是台站间真实格林函数，$G_{AB}(t)$ 是以台站 A 为假想震源在台站 B 所得的格林函数，$G_{BA}(-t)$ 则是地震波以相反方向从台站 B 向台站 A 传播的格林函数. 当两个台站逐渐靠近合并为一点时，噪声互相关函数退化为单台自相关函数 $C_A(t)$，由其对时间的导数得到的是虚拟震源和接收点同在台站位置的格林函数.

ö

Sens-Schönfelder 等[14]证实由环境噪声互相关得到的格林函数中，除包含直达波[13,32]外，还包括散射波(格林函数的尾波部分). 格林函数尾波包含了台站间不同散射路径的信息，它是对台站间介质比较全面的采样，相较于直达波对介质性质变化更加敏感，因此可以用来监测介质的微弱变化. Hadziioannou 等[33]则通过超声波实验证实了直接利用噪声互相关函数尾波即可达到监测介质速度微小变化的目的. 这些结论同样适用于自相关函数尾波，不同的是它反映了信号的发射和接收在同一点的情况. 相较于采用互相关函数尾波的方法，自相关函数尾波由于虚拟震源与接收点为同一台站，从而避免了仪器钟差的影响；另外自相关函数尾波的敏感区域更靠近台站附近，能够得到较浅层介质变化的响应.

在利用自相关函数尾波测量速度相对变化时，采用了互谱移动窗技术(CSMWT)[34]：在以 τ 为中心的窄窗内，计算参考相关函数与当前相关函数的互谱并测量其在不同频率 f 的波谱相位偏移 Δf，由二者的线性拟合得出参考相关函数与当期相关函数的时间偏移：$\Delta\tau = \Delta f/(2\pi \times f)$. 假设在各台站对的采样区域内，波速相对变化率相同($\Delta v/v$ = 常数)，那么散射波通过的路径越长所积累的时间偏移 $\Delta\tau$ 越大，$\Delta\tau$ 与 τ 成线性关系. 因此，由一系列连续的以不同时间为中心的窄窗计算出相应的时间偏移，取其线性拟合斜率为时间相对变化 $\Delta\tau/\tau$，那么由其相反数便得到速度相对变化[17]：$\Delta v/v = -\Delta\tau/\tau$.

以往利用相关函数尾波测量速度相对变化时，通常仅使用垂直分量记录，忽略了两个水平分量记录. 而实际观测中，相关函数路径数量的多少直接影响到测量结果的稳定性和精确性. Roux 等[35]在噪声层析成像中利用双台三分量记录的 9 个互相关函数分量分别提取了 Rayleigh 波与 Love 波格林函数. 当考虑以散射波成分为主的相关函数尾波时，不管其波场为何种特性的波动，不同分量相关函数尾波对介质性质变化的响应都是一致的. 本文延续这一思路，采用垂直(Z)、东西(E)、南北(N)三分量的自相关函数尾波与单台不同分量的互相关函数尾波相结合的方法，更大限度地利用了台站数据记录信息，提高了结果的稳定性.

2.3　地震波速度相对变化的计算

本文数据处理步骤主要包括：单台数据预处理；三分量长时间波形记录的自相关和互相关计算；使用互谱移动窗技术测量不同时段参考相关函数与当前相关函数时间相对变化 $\Delta\tau/\tau$，由此得到地震波速相对变化.

2.3.1　单台数据预处理

首先，对每个台站的三分量连续观测数据以 10 天为一个数据段进行重采样(5 Hz)、去均值、去倾斜分量、带通滤波(0.5～60 s)处理. 然后通过滑动绝对平均方法[36]进行时间域归一化处理，以去除噪声数据中地震信号以及台站附近非平稳噪声的影响.

2.3.2　相关函数计算

单台数据预处理后，将各台站每 10 天的三分量数据在 0.33～1 Hz 频带内分别作自相关及互相关运算. 为提高信噪比，将各台站各分量当前 10 天及

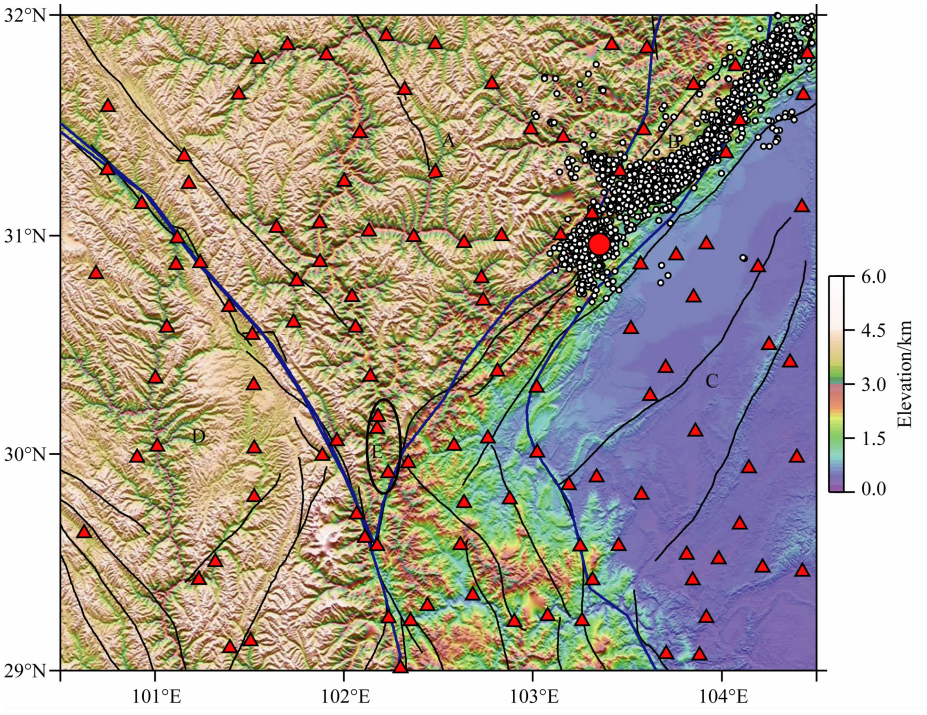

图 1 川西台阵台站分布图.红色三角表示地震台站,红色圆圈表示汶川地震主震,白色圆圈表示余震,黑色实线表示断层,蓝色实线表示块体边界;A:松潘—甘孜地块,B:龙门山断裂破裂带,C:四川盆地,D:川滇地块,E:龙门山断裂与鲜水河断裂交汇附近同震波速相对增加区域

Fig. 1 Station map of western Sichuan seismic array. Red triangles represent the stations, red circle represents the main shock of Wenchuan earthquake, white circles represent aftershocks, black solid lines represent the fault, blue solid lines represent boundaries of different blocks. A: Songpan-Garze block, B: Longmenshan fault, C: Sichuan basin, D: Chuandian block, E: The area of the intersection of LMS fault and Xianshuihe fault where coseismic velocity increase

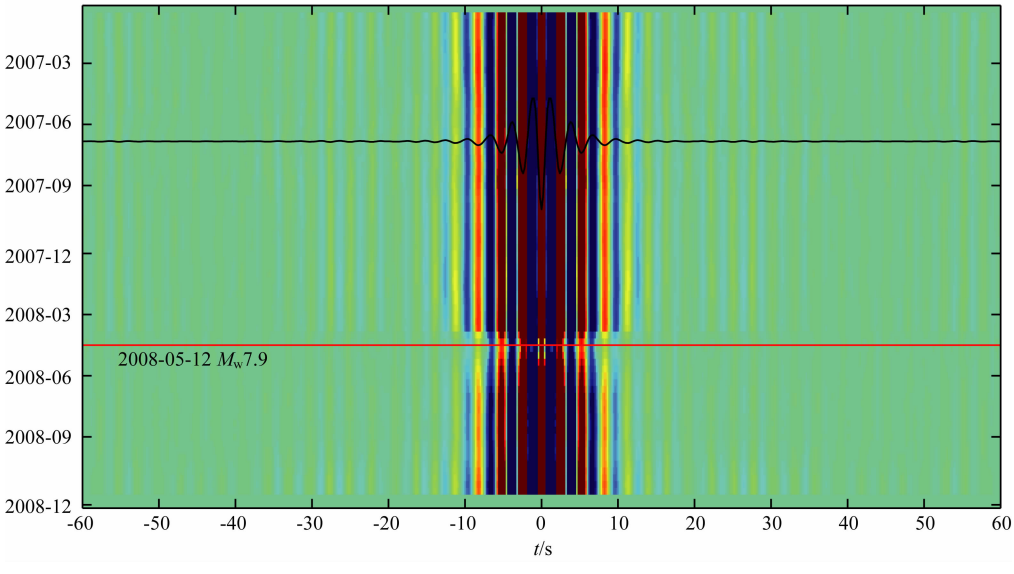

图 2 KCD01 台站垂直分量 50 天滑动窗平均自相关函数(ZZ).黑色曲线代表参考自相关函数,红色直线指示汶川地震发生时间.相关函数振幅归一化,并滤波至 1—3 s

Fig. 2 Vertical component of Fifty-day's moving averaged autocorrelation functions of the station KCD01(ZZ). Black curve represents the reference autocorrelation function, red line indicates the time of Wenchuan earthquake. The correlation functions are filtered to 1—3 s, and the amplitudes are normalized

其前后 20 天的相关函数分别进行滑动平均，得到以 10 天为一个数据段的三个自相关函数（ZZ、NN、EE）和三个互相关函数（ZN、ZE、NE）. 图 2 是由上述方法得到的 KCD01 台站 2007 年 1 月到 2008 年 10 月的 ZZ 分量自相关函数随时间变化图像. 我们使用了接近两年的连续噪声观测数据，可以尽量降低非理论化自由波场的影响[14]. 从图中可见清晰的面波信号和稳定的尾波信号，各相位的连续性较好.

2.3.3　波速相对变化测量

对于各台站不同分量相关函数，其参考相关函数分别取为各自在整个观测时间长度内的平均值，当前相关函数分别取为各自的 50 天滑动平均值. 经过单窗的时域和频域检测，在 ±15 s～±45 s 的尾波范围内能够得到较好的时间相对变化线性拟合. 对于时间窗长度的选择，一般为最大周期的 4～10 倍，窗长的不同会影响到测量的精度. 最终，以 0.6 s 为步长在上述尾波范围内取一系列时间窗，在 0.33～1 Hz 频带由互谱移动窗方法得出时间相对变化 $\Delta\tau/\tau$，进而得到速度相对变化：$\Delta v/v = -\Delta\tau/\tau$. 对不同时间 τ 与时间偏移 $\Delta\tau$ 进行线性拟合时，所得直线偏移零点的误差在 10^{-3} s 量级. 图 3 所示为汶川地震破裂带区域数个台站使用单分量数据记录所得结果与使用三分量数据记录所得结果对比结果. 由图可见，仅使用单分量时，震前速度扰动与拟合误差较大，不利于同震波速相对变化的测量. 随着不同分量相关函数的同时使用，可用数据量大大增加，波速相对变化曲线在整个时间长度上有所优化，震前背景扰动及震后波动更加平稳，同震波速相对变化更为清晰准确，拟合误差也较小.

3　结　果

3.1　不同区域地壳速度随时间的相对变化

图 4 所示分别为不同块体与区域地壳速度随时间的相对变化，其具体位置与台站分布见图 1. 由图 4 可见，各区域在汶川地震发生前速度相对变化起伏较小，其中最大波动范围约为 ±0.04%（在龙门山断裂带上），称其为震前背景扰动. 汶川地震发生后，松潘—甘孜块体、龙门山断裂带、四川盆地都存在明显的同震速度相对减小，特别在龙门山断裂带同震速度相对减小达 0.17%. 比较图 4a 和图 4c 还可发现，四川盆地的同震速度相对变化较松潘—甘孜块体稍大，然而这是两个块体范围内分别进行整体平均所得结果，结合下文可以发现在两个块体内部不同区域同震速度相对变化存在明显差异. 由于震后观测持续时间较短，未能见到震后恢复情况. 这三个区域的震后速度变化特征与 Chen 等[18]通过互相关方法得到的结果一致，但其变化幅度更大.

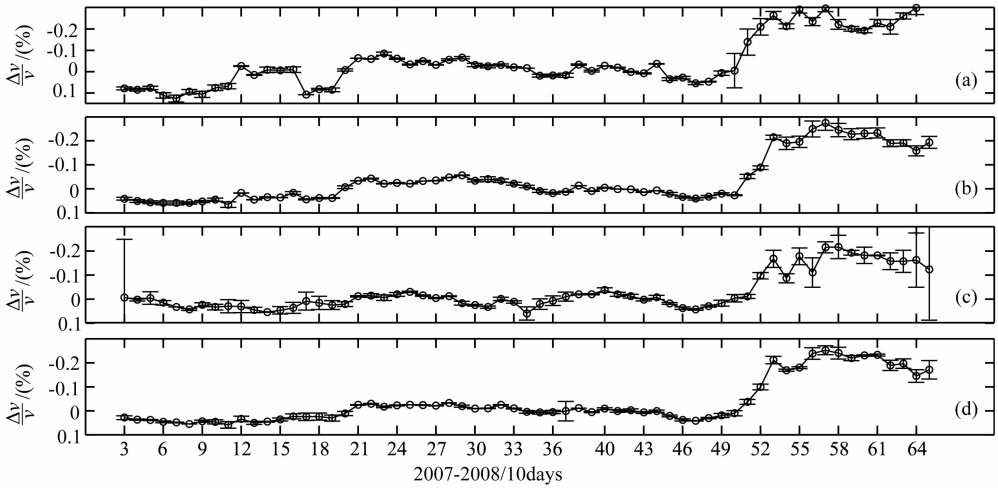

图 3　使用不同分量相关函数尾波所得速度相对变化率随时间变化图.（a）由水平南北分量（S—N）噪声自相关函数尾波（NN）所得结果；（b）由三分量自相关尾波（ZZ，EE，NN）所得平均结果；（c）由三分量互相关函数尾波（ZE，ZN，NE）所得平均结果；（d）由三分量自相关函数与三分量互相关函数尾波（ZZ，EE，NN，ZE，ZN，NE）所得平均结果

Fig. 3　Relative velocity changes with time using the coda of different components of correlation functions. (a) Using the coda of one horizontal component(S—N) of autocorrelation functions(NN) only; (b) Using the coda of three components of autocorrelation functions(ZZ, EE, NN); (c) Using the coda of three components of corsscorrelation functions(ZE, ZN, NE); (d) Both the coda of three components of autocorrelation functions and three components of crosscorrelation functions(ZZ, EE, NN, ZE, ZN, EN) are used

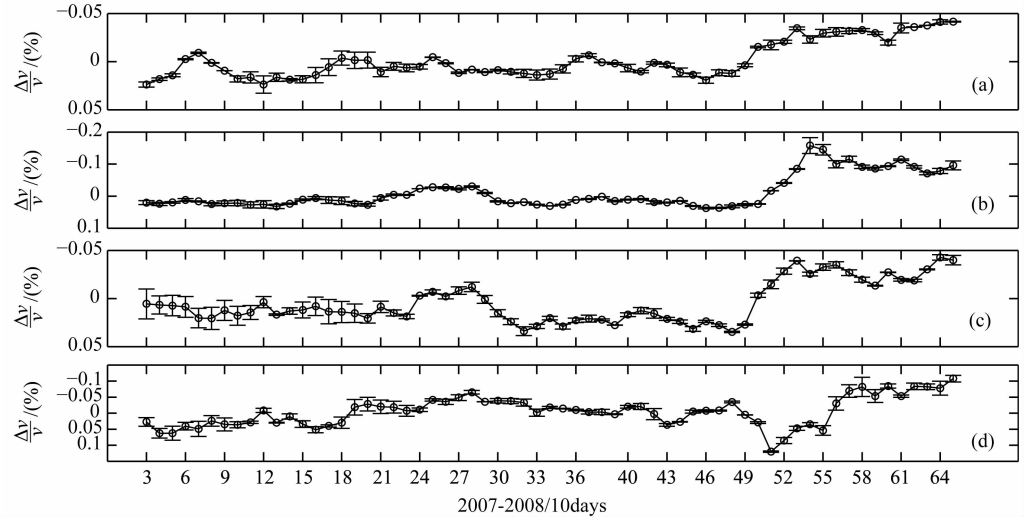

图4 不同区域地壳速度相对变化随时间变化图.(a) 松潘—甘孜块体;(b) 龙门山断裂带;(c) 四川盆地;(d) 龙门山断裂与鲜水河断裂交汇处一同震波速相对增大区域.(a),(b),(c),(d)四个区域分别对应图1中A,B,C,E四个区域

Fig. 4 Crust relative velocity changes with time at different areas. (a) Songpan-Garze block; (b) Longmenshan fault; (c) Sichuan basin; (d) The area of the intersection of LMS fault and Xianshuihe fault where coseismic velocity increase. (a), (b), (c), (d) are coincident to A, B, C, D, E in Fig. 1

图4d所示为龙门山断裂与鲜水河断裂交汇处一区域速度随时间变化的情况,可以看出此区域存在持续时间约为2个月左右,且变化幅度明显高于震前扰动水平的同震速度相对增加.

3.2 同震速度相对变化的空间分布

我们将研究区域(29°N～32°N,100.5°E～104.5°E)划分为0.5°×0.5°的网格,每个网格以中心为原点在半径0.5°上选取台站.川西台站布设的密集性使我们得以在保证适当的空间分辨率情况下,每个网格内都分布有足够的台站.在计算同震速度相对变化时,为降低震前背景扰动的影响,将汶川地震发生前的速度相对变化作平均,同时考虑到同震速度相对变化的稳定性,将地震发生后30天内的速度相对变化作平均,最后取地震前后两者的差值作为同震速度相对变化.汶川地震同震速度相对变化的空间分布如图5所示.

由图5可见,以汶川地震震中为起点,沿着破裂方向围绕龙门山断裂带有明显的同震速度相对降低,而沿破裂反方向速度相对变化较小.四川盆地在30°N以北部分,有大幅的速度相对降低;松潘—甘孜块体速度相对变化空间分布差异较大,其中沿龙门山断裂破裂段有大幅速度相对降低,中部变化次之,西部变化较弱,在鲜水河断裂带附近出现一速度相对增加的较小区域;川滇块体未见明显的速度相对变化.

我们将图5给出的速度变化分布与同震体应变进行了对比.我们采用Coulomb3.0软件计算了汶川地震的同震体应变,计算中采用了沈正康等[8]的断层模型,得到了5 km深度的体应变(图6).对比图5和图6可以看出,在体应变膨胀区,同震体应变和同震速度相对减小区域吻合较好.由此可见,在本文的研究范围内该区域同震体应变与同震速度相对变化有着紧密的联系.而对于分布范围很小的同震压缩区,同震速度分布图像只呈现出较弱的速度降低,并未表现为速度增加区.

除了与体应变相对应的变化区域外,四川盆地内部还存在大范围显著的速度相对降低.这一特征与Chen等[18]在该区域利用互相关函数尾波所得结果也有一定差异.导致这种结果的可能原因是:单台相关函数尾波的敏感区域主要集中于台站附近,而利用双台互相关函数尾波时敏感区域对应于台站间更大的深度.因此,本文所得四川盆地内部有明显同震速度相对降低可能主要由于覆盖在四川盆地上部的沉积层松弛所导致.

需要指出的是,上文所得在龙门山断裂与鲜水河断裂交汇处存在一同震波速相对增加区域的情况在本图中并无明显体现,其原因主要是网格大小的选取以及格点之间的差分处理使得这一较小区域的速度变化结果与周围的结果互相平均,从而掩盖了这一特性.由此可见,在选择适合整体范围内台站分布密集程度的空间分辨的同时,对于具有特殊构造的区域也有必要进行具体分析.

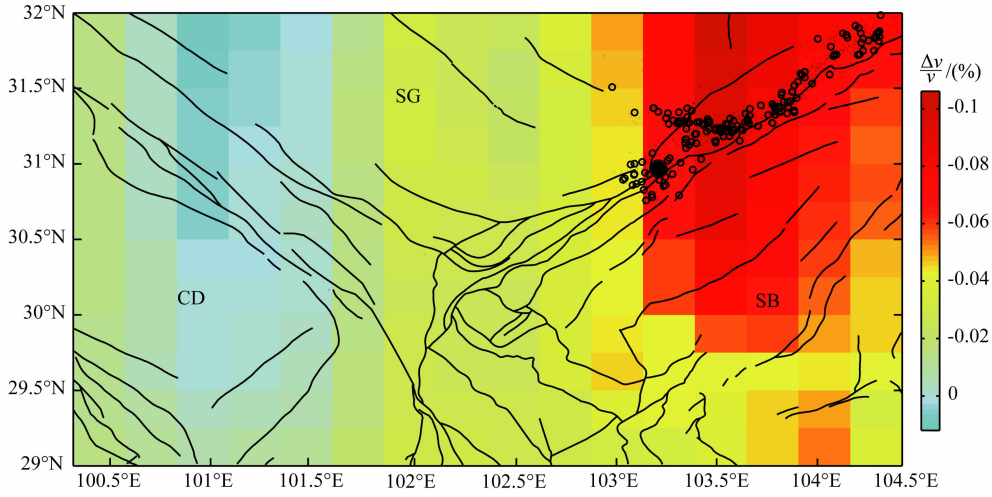

图 5　同震速度相对变化分布. 黑色实圈代表汶川地震震中位置，黑色圆圈和黑点代表余震分布，细线代表断层

Fig. 5　Distribution of coseismic relative velocity changes. Big black solid circle represents the main shock of Wenchuan earthquake, other small circles represent aftershocks, black lines represent faults

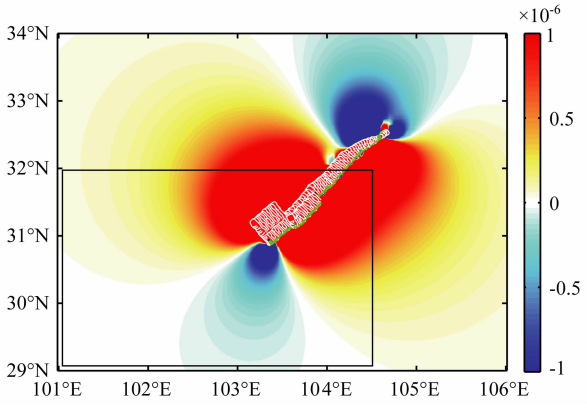

图 6　汶川地震的同震体应变. 体应变计算深度为 5 km，红色代表膨胀区域，蓝色代表压缩区域，中间白色网格为断层模型，黑色实线所围区域为本文研究区域

Fig. 6　The volumetric strain changes caused by the Wenchuan earthquake. The volumetric strain changes are calculated at the depth of 5 km, the red and blue colors represent the region of dilatation and compression respectively, the black square indicates the area researched in this paper

4　结论与讨论

本文利用川西密集的宽频带流动地震观测台阵，分析了汶川地震震源区附近 137 个台站自 2007 年 1 月至 2008 年 10 月的三分量数字记录资料，给出了该区域汶川地震同震速度相对变化的空间分布特征. 结果表明，汶川 M_w7.9 级地震造成龙门山断裂带及其附近区域沿断裂破裂方向存在显著同震波速降低，而沿破裂反方向及其松潘—甘孜块体西部、川滇块体速度相对变化较弱，但在四川盆地内部却也存在明显的速度相对降低. 通过与同震体应变的对比分析得出，该区域沿龙门山断裂带破裂方向附近的速度相对降低与同震体应变具有相关性，而四川盆地内部的同震速度相对降低可能是由覆盖在四川盆地上部的沉积层松弛所导致. 本文利用环境噪声自相关方法得到的同震速度变化分布图像与互相关方法基本一致[18].

具有更高空间分辨率的噪声自相关研究进一步发现，在鲜水河断裂和龙门山断裂交汇区的康定、泸定附近存在同震速度增加区，其速度增加幅度明显高于背景速度扰动幅度. 这一区域与同震库伦应力变化和地表形变观测预测的周边断层库伦应力增加区[37,38]一致. 这说明，高密度台站的噪声相关速度变化测量不仅可以测量大尺度的平均地壳速度变化，也可以探测得到空间尺度较小的同震应力增加. 我们的研究同时发现，同震库伦应力增加效应的持续时间大约为 2 个月左右，在此之后，区域应力场逐渐恢复到与周边区域基本一致的应力下降.

本文测量得到的同震速度变化率幅值与 Chen 等[18]利用双台互相关函数尾波在该区域所得结果略有不同，但其变化形态基本一致，而两个不同方法同震速度相对变化与震前扰动幅度比值分别为 2 和 2.1. 其差别应该是所用方法对该区域不同深度地壳的速度相对变化敏感度不同，因而两文所得结果并无本质差异.

尽管本文结果与同震体应变的空间分布进行了对比，由噪声相关函数测量所得到的同震速度变化率比汶川地震同震体应变率（约为 10^{-6} 量级）高 2～

3 个量级,这与在其他地区进行的同类工作得到的结论一致[14~19],这说明同震体应变并非造成同震地壳速度变化的主要因素.对于浅层地壳介质,由同震应力变化造成的介质孔隙度或介质内流体的迁移可能是同震速度变化的主要因素.在四川盆地内部,浅层沉积层在强震动下的破坏则是重要因素之一.

到目前为止,利用环境噪声测量强震震后地壳速度变化的研究中,尚未发现与同震体应变或者同震应力场变化的压缩区相一致的结果.利用噪声相关函数方法测量到的震后速度变化是时间分辨尺度为 10~30 天的暂态变化,而同震体应变和应力场变化则是时间尺度更小的瞬态变化.采用目前的噪声相关函数处理方法可能尚不能检测到瞬态的应力场变化.

在汶川地震之前,各个区域,特别是龙门山地区和四川盆地地区,都表现出了类似的地壳速度随时间变化特征(图 4),在震前约 200 天时间尺度内表现出了不同程度的地壳速度增加.这一速度变化与季节没有明显关系,因而很可能是地壳应力增加的体现.但是由于川西台阵在汶川震前的观测仅有约一年半的时间,尚难以给出汶川震前速度和应力场变化的确切结论.有关汶川地震之前的应力场变化及其与汶川地震的关系仍需进一步研究.

致谢
作者感谢国家数字测震台网数据备份中心郑秀芬研究员无私地提供四川数字地震台网的数据,对两位审稿人提供的有益建议表示感谢。

参考文献(References)

[1] Burchfiel B C, Royden L H, geological and geophysical contex of 12 may 2008, Sichuan, Peop *Today*, 2008, **18**(7), doi: 10.

[2] 张培震,徐锡伟,闻学泽等. 20 裂的滑动速率、复发周期和构造 **51**(4): 1066-1073
Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. Slip rates and recurrence intervals of the Longmenshan active fault zone and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(4): 1066-1073

[3] Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 M_w7.9 Wenchuan earthquake, China. *Geology*, 2009, **37**(6): 515-518, doi: 10.1130/G25462A.1

[4] 张勇,冯万鹏,许力生等. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程. 中国科学(D 辑):地球科学, 2008, **38**(10): 1186-1194
Zhang Y, Feng W P, Xu L S, et al. Spatiotemporal rupture process of the 2008 Wenchuan great earthquake. *Science in China (Series D): Earth Sciences* (in Chinese), 2008, **38**(10): 1186-1194

[5] Ji C, Hayes G. Preliminary result of the May 12, 2008 M_w7.9 eastern Sichuan, China earthquake, US Geol. Surv. 2008, http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2008/us 2008ryan/finite fault.php

[6] 王卫民,赵连锋,李娟等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程. 地球物理学报, 2008, **51**(5): 1403-1410
Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. Rupture process of the M_s8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5): 1403-1410

[7] 陈九辉,刘启元,李顺成等. 汶川M_s8.0地震余震序列重新定位及其地震构造研究. 地球物理学报, 2009, **52**(2): 390-397
Chen J H, Liu Q Y, Li S C, et al. Seismotectonic study by relocation of the Wenchuan M_s8.0 earthquake sequence. *Chinese. J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2): 390-397

[8] Shen Z K, Sun J B, Zhang P Z, et al. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(10): 718-724

[9] Zhang P Z, Wen X Z, Shen Z K, et al. Oblique, high-angle, listric-reverse faulting and associated development of strain: The Wenchuan earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2010, **38**(1): 353-382

[10] Niu F, Silver P G, Daley T M, et al. Preseismic velocity changes observed from active source monitoring at the Parkfield SAFOD drill site. *Nature*, 2008, **454**(7201): 204-208, doi: 10.1038/nature07111

[11] Rubinstein J L, Uchida N and Beroza G C. Seismic velocity reductions caused by the 2003 Tokachi-Oki earthquake. *J. G. R.*, 2007, **112**: B05315, doi: 10.1029/2006jb004440

[12] Vidale J E, Li Y G. Damage to the shallow Landers fault from the nearby Hector Mine earthquake. *Nature*, 2003, **421**(6299): 524-526

[13] Shapiro N M, Campillo M. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *G. R. L.*, 2004, **31**: L07614, doi: 10.1029/2004GL019491

[14] Sens-Schönfelder C, Wegler U. Passive image interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi volcano, Indonesia. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**: L21302, doi: 10.1029/2006GL027797

[15] Snieder R, Grêt A, Douma H, et al. Coda wave interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity. *Science*, 2002, **295**(5563): 2253-2255

[16] Wegler U, Sens-Schönfelder C. Fault zone monitoring with passive image interferometry. *G. J. I.*, 2007, **168**(3): 1029-1033

[17] Brenguier F, Campillo M, Hadziioannou C, et al. Postseismic relaxation along the San Andreas Fault at Parkfield from continuous seismological observations. *Science*, 2008, **321**(5895): 1478-1481

[18] Chen J H, Froment B, Liu Q Y, et al. Distribution of

J. Geophys. Res.

Geophys. Res. Lett.

Geophys. J. Int.

seismic wave speed changes associated with the 12 May 2008 M_w7.9 Wenchuan earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, **37**: L18302, doi: 10.1029/2010GL044582

[19] 刘志坤，黄金莉. 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. 地球物理学报，2010，**53**(4)：853-863
Liu Z K, Huang J L. Temporal changes of seismic velocity around the Wenchuan earthquake fault zone from ambient seismic noise correlation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(4): 853～863, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.04.010

[20] Xu Z J, Song X. Temporal changes of surface wave velocity associated with major Sumatra earthquakes from ambient noise correlation. *PNAS*, 2009, **106**(34): 14207～14212, doi: 10.1073/pnas.0901164106

[21] 刘启元，李昱，陈九辉等. 汶川 M_s8.0 地震：地壳上地幔 S 波速度结构的初步研究. 地球物理学报，2009，**52**(2)：309-319
Liu Q Y, Li Y, Chen J H, et al. Wenchuan M_s8.0 earthquake: preliminary study of the S-wave velocity structure of the crust and upper mantle. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2): 309-319

郭飚

[22] 郭飚，刘启元，陈九辉等. 川西龙门山及邻区地壳上地幔远震 P 波层析成像. 地球物理学报，2009，**52**(2)：346-355
Guo B, Liu Q Y, Chen J H, et al. Teleseismic P-wave tomography of the crust and upper mantle in Longmenshan area, west Sichuan. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2): 346-355

[23] 李昱，姚华建，刘启元等. 川西地区台阵环境噪声瑞利波相速度层析成像. 地球物理学报，2010，**53**(4)：842-852
Li Y, Yao H J, Liu Q Y, et al. Phase velocity array tomography of Rayleigh waves in western Sichuan from ambient seismic noise. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(4): 842-852

[24] 齐少华，刘启元，陈九辉等. 汶川 M_s8.0 地震：龙门山断裂两侧地壳各向异性的初步研究. 地震地质，2009，**31**(3)：377-388
Qi S H, Liu Q Y, Chen J H, et al. Wenchuan earthquake Ms8.0: Preliminary study of crustal anisotropy on both sides of the Longmenshan faults. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2009, **31**(3): 377-388

[25] 刘启元，陈九辉，李顺成等. 汶川M_s8.0地震：川西流动地震台阵观测数据的初步分析. 地震地质，2008，**30**(3)：584-596
Liu Q Y, Chen J H, Li S C, et al. The M_s8.0 Wenchuan earthquake: Preliminary results from the Western Sichuan mobile seismic array observations. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(3): 584-596

[26] Lobkis O I, Weaver R L. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field. *J. acoust. Soc. Am.*, 2001, **110**(6): 3011-3017

[27] Weaver R L, Lobkis O I. Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green's function. *J. acoust. Soc. Am.*, 2004, **116**(5): 2731-2734

[28] Snieder R. Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: a derivation based on stationary phase. *Phys. Rev. E*, 2004, **69**(4): 046610

[29] Roux P, Sabra K G, Kuperman W A, et al. Ambient noise cross correlation in free space: theoretical approach. *J. acoust. Soc. Am.*, 2005, **117**(1) 79-84

[30] Sabra K G, Gerstoft P, Roux P, et al. Extracting time-domain Green's function estimates from ambient seismic noise. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L03310, doi: 10.1029/2004GL021862

[31] Campillo M, Paul A. Long-range correlations in the diffuse seismic coda. *Science*, 2003, **299**(5606): 547～549, doi: 10.1126/science.1078551

[32] Roux P, Sabra K G, Gerstoft P, et al. P-waves from cross-correlation of seismic noise. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L19303, doi: 10.1029/2005GL023803

[33] Hadziioannou C, Larose E, Coutant O, et al. Stability of monitoring weak changes in multiply scattering media with ambient noise correlation: Laboratory experiments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2009, **125**(6): 3688-3695

[34] Fréchet J, Martel L, Nikola L, et al. Application of the cross-spectral moving-window technique (CSMWT) to the seismic monitoring of forced fluid migration in a rock mass. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 1989, **26**(3-4): 221-233

Nikolla

[35] Roux P. Passive seismic imaging with directive ambient noise: application to surface waves and the San Andreas Fault in Parkfield, CA. *Geophys. J. Int.*, 2009, **179**(1): 367-373, doi: 10.1111/j.1365-246X.20

Geophys. J. Int.

[36] Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, et al. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophys. J. Int.*, 2007, **169**(3): 1239-1260

[37] Parsons T, Ji C, Kirby E. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin. *Nature*, 2008, **454**(7203): 509～510, doi: 10.1038/nature07177

[38] 万永革，沈正康，盛书中等. 2008 年汶川大地震对周围断层的影响. 地震学报，2009，**31**(2)：128-139
Wan Y G, Shen Z K, Sheng S Z, et al. The influence of 2008 Wenchuan earthquake on surrounding faults. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2009, **31**(2): 128-139

（本文编辑　胡素芳）