********** *研究报道 * ********

利用噪声研究地下介质速度结构及其 变化在中国大陆的应用◎

李佳鹏¹,钟卫星²,李红谊¹,李信富¹,郑 丹¹,欧阳龙斌¹,张 冰¹

(1.中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院,北京 100083; 2.上海市地震局佘山地震台,上海 201602)

摘要:背景噪声层析成像技术已被广泛应用于地壳和上地幔速度结构的研究,这种方法不依靠地震的发生和人工 源爆破,只需记录连续的噪声信号而无需产生信号,因为噪声穿过地下介质时会携带信息,然后通过利用台站记录 到的连续背景噪声数据进行互相关计算和叠加,即可得到台站间的经验格林函数,从而获取对地下结构的认识。 这种方法已经很好地应用于中国的东北地区、华北克拉通、青藏高原以及华南地区,并成功地揭示了这些地区地壳 与上地幔顶部的速度结构。此外近年来,一些学者还利用噪声互相关技术研究地下介质地震波速度随时间的变 化,通过对汶川大地震前后连续噪声记录的研究发现,大震发生后呈现同震波速降低和震后波速逐渐恢复的特点, 这表明可以通过观测地震波特性的变化来监测地下应力的变化,从而为大震的预测预防工作提供科学依据。本文 主要综述了近些年来背景噪声技术及其在中国大陆地区的应用。

关键词:背景噪声;速度结构;各向异性;波速变化;中国大陆

 中图分类号: P631.5
 文献标志码:A
 文章编号: 1000-0844(2015)01-0235-07

 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0235

Application Research on Velocity Structure of Subsurface Medium and its Changes in the Chinese Mainland Using Ambient Noise

LI Jia-peng¹ , ZHONG Wei-xing² , LI Hong-yi¹ , LI Xin-fu¹ ,

ZHENG Dan¹, OUYANG Long-bin¹, ZHANG Bing¹

(1.School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2. Sheshan Seismic Station, Shanghai Seismological Bureau, Shanghai 201602, China)

Abstract: Ambient seismic noise tomography has been widely used to study the crustal and mantle structure in the world. This method does not depend on natural earthquakes or artificial explosions, and therefore, it has become a very popular method to image the structure of the crust and uppermost mantle. The subsurface structure beneath the two stations can be determined by extracting the empirical Green's functions by the cross correlation and stacking of the continuous seismic noise recorded at the two stations. Ambient seismic noise tomography technique can be regarded as sourceless tomography because it functions without source-receiver propagation. The energy of surface waves is stronger than other waveforms and therefore, most studies of ambient noise have focused on surface wave measurements. Surface wave tomography from ambient noise has been successfully used in the United States and the Pacific Northwest, China, New Zealand, South Korea, and Europe. It is obvious that the ambient noise method has several important advantages over traditional surface wave tomography based on earthquakes: (1) the method can be applied to areas that are well instrumented but have a very low level of seismic activity; (2) the ambient noise method is relatively unaffected by seismic source location; and (3) it can be used to make short-to-intermediate period dispersion measurements. However, one limitation of the method is that it is difficult to extract long-period dispersion

① 收稿日期:2014-07-21

measurements because most noise sources are limited to shallow depths. In this paper, we briefly introduce an improved method to extract long-period dispersion measurements from ambient seismic noise. Ambient noise data have also been applied to study crustal and mantle anisotropy. Radial anisotropy results based on ambient noise show that in eastern and southeastern parts of the Tibetan Plateau, mid-to-lower crustal low-velocity zones are closely associated with positive radial anisotropy ($V_{\rm SH} > V_{\rm SV}$). Azimuthal anisotropy in the southeastern Tibetan Plateau revealed that the azimuthal anisotropy pattern in the crust differs to that in the upper mantle, which suggests that the crust and mantle might deform differently. Some researchers have used ambient noise data, both before and after the Wenchuan Earthquake, revealed that the coseismic reduction of seismic velocity and postseismic recovery are prominent. The observed temporal changes likely reflect damage and heating processes in the crust associated with the Wenchuan mainshock. With development of the ambient noise method, the resolution of seismic images of the crustal and upper mantle structure will be enhanced. This paper presents the technique of ambient noise tomography and its application to the velocity structure and studies of temporal velocity change on the Chinese mainland.

Key words: ambient noise; velocity structure; anisotropy; velocity variation; Chinese mainland

0 引言

背景噪声成像方法已经被广泛应用于世界各地对地壳 和上地幔结构的研究。这项技术通过对两个台站间记录到 的长时间序列的噪声数据进行互相关处理,提取格林函数, 从而进行地震成像,获取对地下结构的认识^[1]。

与传统基于地震记录的成像方法相比,噪声成像无需等 待地震的发生,不需要震源定位及震源参数的信息;此外传 统的地震面波成像方法,由于传播距离较远通常高频成分衰 减比较严重,而高频成分是研究浅部地壳结构不可或缺的信 息^[2],而噪声成像可以很好地提取短周期面波,用于地下介 质结构的研究,克服了在地震面波成像方法中高频成分衰减 严重的缺点。

近年来,利用噪声成像方法研究中国大陆地下介质速度 结构及其变化取得了重要的进展。一些学者利用长时间连 续记录到的噪声数据,通过背景噪声互相关技术得到中国大 陆地区不同周期的面波速度分布图,经过反演最终得到中国 大陆不同地区地壳和上地幔顶部三维剪切波速度模型,模型 结果很好地揭示了中国大陆不同地区地下的结构特征。在 此基础上,为了更好地理解地壳和地幔的动力学过程,一些 学者同时反演了中国大陆地区地震波速结构和各向异性并 对产生各向异性的原因进行了分析。也有学者利用噪声互 相关技术,通过分析经验格林函数得到走时偏移,进而计算 相对地震波速度变化并探讨了引起这种变化的原因。

背景噪声互相关技术的快速发展,得到了越来越多国内 外学者的关注,下面将对噪声成像方法进行介绍,并对其在 中国大陆地区的应用进行说明。

1 噪声成像数据处理方法

背景噪声层析成像数据处理方法通常包括以下 5 个步骤:单一台站数据预处理、互相关与叠加运算、频散曲线的测量、质量控制和面波层析成像^[3]。

1.1 单一台站数据预处理

单个台站的数据处理是整个处理流程中原始数据量最

大的环节。它的目的是从单个台站的波形数据中剔除地震 信号和仪器响应,只留下噪声。由于某些小地震信号非常微弱,仅仅从幅度很难将其剔除,只能通过滤波和归一化的方 法尽量消除其影响。

单个台站数据处理包括以下环节:原始数据消除仪器响 应、去均值、去趋势、带通滤波、截成一个小时长的数据文件、 时间域归一化和频率域白噪化。

1.2 互相关与叠加运算

对所有的台站对进行互相关处理,当有 n 个台站时,总 共产生 n(n-1)/2 个台站对。但是一些台站对之间的距离 太小或太大,以致于得不到可靠的格林函数结果,需要在后 面的时频分析中对结果进行选择。

叠加处理的目的是增加互相关得到的格林函数的信噪 比以突出信号波形。叠加处理源于这样的一个想法:虽然由 于噪声源的时间空间分布的随机性导致背景散射场在较短 时间内并非完全均匀,但通过长时间的互相关运算的叠加, 可以使随机干扰相互抵消,而有用信号相加得到加强,从而提 高信噪比。

1.3 频散曲线的测量

时频分析是基于快速傅里叶变换与数字滤波技术发展 起来的,其目的是提取地震数据中的频散信息,即用于群速 度、相速度的测量。最早发展的时频分析方法是移动窗分析 法,随后发展的是多重滤波法。适当的选取窗函数,移动窗 分析法与多重滤波法是等价的。在时频分析中,多重滤波法 是核心,是多种时频分析方法的基础。

1.4 质量控制

频散曲线的质量直接决定了层析成像和横波速度反演 结果的可靠性。因此,需要对频散曲线的质量进行严格控制 和筛选,评估频散曲线的可靠性,这通常包括以下 4 个步 骤^[3-4]:

(1)如果台站相距很近,互相关函数的正负分支互相干扰,会导致测量结果的不可靠,所以当测量某一周期频散时, 需使用台站间距大于3倍波长的数据,特殊情况下,当台站 距离较远时,所使用的台站间距要更大。 (2)虽然噪声源是随季节变化的,但是经过多次散射和 长时间的平均后,噪声源的分布趋于平均,因此每个月所测得的频散曲线虽略有差异,但基本相似。如果台站的记录时 间比较长,可以通过分析同一路径不同时段测得的频散曲线 的变化,剔除月变化较大的频散曲线。

(3)选择射线路径相似的台站对,对其频散曲线进行可 靠性分析,去除异常的频散曲线。

(4) 信噪比(SNR)测量可以用于检验频散曲线测量的 稳定性,通常当 SNR>10时,标准偏差与 SNR 谱是呈线性 相关的,此时可以认为频散测量结果是相对稳定的。

1.5 面波层析成像

面波层析成像通常采用两步法:首先,将反演区域按网 格划分,采用二维反演方法得到群速度或相速度分布;然后, 对群速度或相速度频散曲线进行反演,获得横波速度随深度 的分布^[5]。

2 利用噪声成像研究中国大陆地区介质速度结构 及各向异性

2.1 噪声成像应用于中国大陆地区速度结构的研究

近年来,随着噪声成像方法的不断成熟,对于中国大陆 地下介质速度结构的研究取得了一些重要成果。同时,背景 噪声与其它成像方法的联合反演(例如,地震面波成像和体 波接收函数)也得到了进一步的发展。XuZJ等^[6]同时采用 背景噪声和地震面波成像的方法,对整个中国大陆地壳和上 地幔顶部剪切波速度结构进行了研究。结果表明,地壳和上 地幔存在显著的地质特征,包括面积较大的盆地、莫霍面的 深度变化、华北克拉通东西部的地幔速度对比、青藏高原中 地壳普遍存在的低速区域以及西藏南北地区地幔岩石圈的 速度对比。同时得出:青藏高原北部和东部上地幔存在低速 结构,而这一点与表面地质结构相关;在青藏高原东部发现 一块高速异常区域,这说明地幔岩石圈的完整性;地幔岩石 圈显示华北克拉通从西部到东部显著的系统变化;而郯庐断 裂似乎是一个较大的岩石圈边界。

在中国东北地区,Zheng Y等^[7]发现松辽一渤海地堑下 方岩石圈很薄,不过地震波传播速度较快。在中国华北地 区,Cheng C等^[8]在华北克拉通地区布设 2条线性地震台 阵,结果发现华北克拉通地区东部渤海湾盆地下方地壳很薄 (约为 30 km)并且波速较低;华北克拉通西部鄂尔多斯盆地 下方地壳较厚(40 km)且在中下地壳存在大规模的低速区 域。Tang Y C等^[9]采用噪声与地震面波联合反演方法研究 华北克拉通地区的岩石圈结构和厚度,发现华北盆地和鄂尔 多斯地块的地壳速度与莫霍面深度的变化都很明显;华北盆 地地壳厚度较薄(31~34 km)且波速较低,而鄂尔多斯地块 的地壳较厚(约为 40 km)且波速较高;华北盆地上地幔顶部 横波速度无明显异常且岩石圈较薄,而鄂尔多斯地块的横波 速度有明显异常且岩石圈较厚(120 km);华北盆地和鄂尔 多斯地块中存在不同热量和化学成分的物质,并且自新生代 以来经历了不同的地幔形成过程和演化历史。Luo Y H 等^[10]揭示了在大别造山带地区与造山运动相关的地壳特 征:在地下深度小于9km的高压和超高压变质地区剪切波 速度较高,这说明高压和超高压变质岩主要集中在上地壳; 高压和超高压变质地区中地壳剪切波速度较低,这可能表明 韧性剪切地区和脆性破坏地区是在高压和超高压变质岩剥 落的过程中形成的;在大别山北部中地壳下方存在高速剪切 波,这可能与侵入火成岩的冷却和结晶有关;在大别山东部 存在一个向北倾斜的莫霍面,且在大别山北部莫霍面最深, 这与在华北克拉通下方、扬子克拉通在三叠纪时期向北俯冲 的模型一致。

在中国西部地区,尤其是青藏高原地区,大量学者利用 噪声成像方法做了相关的研究,发现青藏高原地壳较厚且中 下地壳普遍存在低速区域[11-15]。Liu Z K 等[16] 对青藏高原 向东扩张的机制进行了研究。作者利用布设于四川西部约 300个地震仪记录到的噪声数据与地震数据,采用背景噪声 与接收函数联合反演的方法,得到了青藏高原东部清晰的地 下结构。通过成像结果,作者识别出地壳流通道的存在,同 时发现跨越大的断层,地壳结构与流变存在强烈的对比。结 合大地测量数据,作者认为青藏高原向东扩张是由局部地壳 流以及变形分解作用共同造成的。作者最后推断对于地壳 变形,刚性块体运动与地壳流模式并不是矛盾的。Li H Y 等[17] 对中国西北部及邻近地区进行了噪声成像的研究,得 到的群速度图揭示了研究区域存在明显的横向变化,而这种 变化与研究区域中的大的地质结构以及构造单元吻合较好。 对瑞利波和勒夫波频散图像进行反演,得到研究区域的剪切 波速度结构,结果表明,青藏高原地壳较厚且在中下地壳存 在低速区域: 青藏高原北部边缘地形坡度较陡峭, 低速区域 并没有延伸到塔里木盆地,这可能说明塔里木盆地下方地壳 物质与青藏高原相比更加的冷以及坚硬,因此阻碍了中下地 壳流的延伸以及青藏高原的变形,从而导致了非常强烈的地 形对比;而鄂尔多斯地台东北部边缘地形坡度较为平缓,在 东昆仑断层附近低速区域范围减小:与此同时,结果同样揭 示了塔里木盆地下方地壳速度存在明显的横向变化。

Li H Y 等^[18]对青藏高原东北缘中下地壳低速分布进 行了研究,发现周期 25 s,柴达木盆地下方存在低速,无盆地 区域下方观察到高速;周期 30 s,羌塘和松潘一甘孜下方存 在低速。反演群速度和相速度图像,得到三维地壳模型,结 果发现:羌塘和松潘一甘孜地壳很厚,并且在中地壳存在明 显的低速区域;昆仑山东部邻近地区的低速区域减薄,这为 青藏高原的变形模型提供了一个新的约束;祁连山的西北部 同样存在一个相对弱的中地壳低速地区,这是与华北克拉通 和青藏高原之间的缩短相关的一种壳内反应。Xu X M 等^[19]利用噪声成像方法研究了西藏东部地区,得到四川盆 地浅层横波速度较高,而中下地壳速度较高;青藏高原中下 地壳存在低速区域,这与地壳流模型相一致;与此同时,结果 也表明从青藏高原东部到四川盆地地壳厚度逐渐减小。

在中国华南地区,Zhou L Q 等^[20] 对中国南部地壳与上 地幔顶部结构同时进行了噪声成像与地震面波成像的研究, 数据包括连续两年记录到的噪声数据以及地震数据,最终得 到地壳与上地幔顶部的三维速度模型。结果表明,扬子克拉 通西部地壳相对较厚,并且地幔岩石圈至少延伸到地下 150 km;而扬子克拉通东部与中国南部造山带的地壳与地幔岩 石圈与西部相比较薄,这种差异与中生代平板俯冲过程相一 致。

从以上学者在中国大陆地区的噪声成像工作可以看出, 研究区域的覆盖面较广,不过主要集中在青藏高原和华北克 拉通地区。同时,噪声成像与地震面波的联合反演得到了进 一步的发展,得到了更多学者的重视。

当然,目前的噪声成像方法也存在着一些不足,比如难 以获取长周期的面波信号,而长周期的面波信号是研究大陆 和全球尺度的岩石圈结构不可或缺的信息。最近 Shen Y 等^[21]在对地震台站数据进行时间域归一化处理过程中通过 采用频率-时间归一化方法从背景噪声中获取了长周期的面 波信号。通过这种方法提取到的经验格林函数的信噪比与 传统归一化方法相比提高了约两倍。以往的噪声成像研究 主要利用从噪声中提取的 8~60 s 的瑞利面波,采用频率-时 间归一化方法后提取到的瑞利面波周期,对于流动台站可以 达到 300 s,对于永久台站可以达到 600 s。频率-时间归一 化新方法的应用使得在噪声中提取长周期面波信号成为了 可能。

随着我国城市化进程的加快,城市建设由地表向地下空 间拓展,城市地质环境受到的影响和面临的压力与日俱增。 诸如岩土层划分、活断层、地裂缝、空间探测等,都是市政工 程建设急需解决的问题。而微动台阵探测技术可以适用于 城市环境,即使在城市交通主干道,仍可有效采集数据,取得 很好的探测结果。这种技术首先利用圆形台阵采集地面微 动信号,接着通过空间自相关法提取瑞利波频散曲线,最后 经过反演计算获取台阵下方横波的速度结构^[22]。与地震背 景噪声方法相比,微动探测方法对台阵布局要求更为严格, 各测点需同步进行观测,这样才能保证结果的可靠性。这种 技术已经成功应用到城市轨道交通规划勘察、地铁工程勘察 以及城市近郊活断层探测等项目中。

为了更好了解长江中下游成矿区的深部构造背景并为 此提供一些地球物理学的依据,课题组在长江中下游地区先 后布设了 39 个宽频流动地震台站,其中前期布设 19 个地震 台站,布设时间为 2012 年 6 月,后期布设 20 个地震台站,布 设时间为 2014 年 8 月,台站分布如图 1 所示(三角形代表前 期布设台站,正方形代表后期布设台站)。对于前期布设台 站收集到的地震数据和从国家地震台网中心获取到的 157 个地震台站的数据(2012 年 6 月—2013 年 8 月)利用背景噪 声方法进行处理。首先将单个台站的连续波形记录切割成 长度为 1 小时的记录,然后去除仪器响应、带通滤波、时间域 归一化以及频率域白噪化处理。随后,对地震台站记录到的 一年多的背景噪声数据进行互相关和叠加运算,并剔除那些 信噪比低的。图 2 给出的是第一期 19 个流动地震台站和 157 个固定地震台站得到的互相关结果。目前,由于对数据 的处理只进行到互相关和叠加阶段,所以反演的最终结果及 结论有待于进一步对资料进行处理和整理。





Fig.1 Distribution of temporary seismic stations in the study region of the middle-lower Yangtze River metallogenic belt





Fig.2 Results of cross-correlation of ambient noises at temporary stations in the middle-lower Yangtze River metallogenic belt

2.2 噪声成像应用于中国大陆地区介质各向异性的研究

地震波的各向异性指的是地震波在地球的各向异性介质中传播时,其传播速度与质点偏振方向等特性随波的传播方向而变化的现象^[23]。介质各向异性对于面波传播的影响表现在两个方面:一是由 Rayleigh 波和 Love 波所确定的同

一段路径上横波速度结构不同,即存在 SV 和 SH 波速度结构的差异,称为径向各向异性;另一种表现为同一类型的波沿不同方向传播速度不同,称为方位各向异性^[24]。近年来,已有学者利用背景噪声层析成像技术对中国大陆地区介质各向异性进行了研究。

Li H Y 等^[25]利用背景噪声技术对青藏高原东缘地壳 径向各向异性进行了相关研究。作者通过反演 Love 波群速 度得到 SH 波速度结构,与之前的研究工作中通过反演 Ravleigh 波群速度得到的 SV 波速度结构进行比较,分析研究区 域地壳的径向各向异性。计算结果表明,SH 波与 SV 波的 速度结构非常相似,但是在地下深度小于 40 km 时,SH 波 速度总体大于 SV 波速度,在深度等于 40 km 时,SH 波速度 基本小于 SV 波速度。Huang H 等^[26]利用背景噪声技术对 四川盆地西部以及喜马拉雅构造结东部周边地区地壳径向 各向异性进行了研究计算,结果表明,SH 波与 SV 波在上地 壳和上地幔速度分布相似,但是在中下地壳存在很大的差 异:在上地壳,径向各向异性小于 2%;在中下地壳,SH 波速 度通常大于 SV 波速度,并且在松潘一甘孜地块以及红河与 小江断裂带之间探测到强烈的径向各向异性(>5%)。作者 认为这种强烈的径向各向异性可能与近水平的云母结构有 关,而云母的排列方式则受机械强度较弱地区的地壳流所控 制。

在大别山造山带地区,Luo Y H 等^[27]利用背景噪声技 术对大别造山带及周围地区地壳径向各向异性进行了研究, 结果显示,在华北盆地,整个地壳的径向各向异性为正,作者 认为这与该地区的伸展构造相关;在江汉盆地,中下地壳表 现出强的正的径向各向异性,作者认为这可能是由于地震各 向异性材料近水平的排列方式造成的;在大别造山带东部, 大别北部复杂构造单元(NDC)下方上地壳和下地壳表现出 正的径向各向异性,而在中地壳表现为负的径向各向异性, 作者认为上地壳正的径向各向异性可能是由于存在具有近 水平排列的各向异性矿物的火成岩引起的,而下地壳的正的 径向各向异性可能与地震径向各向异性材料的近水平的排 列方式有关,与深部岩浆垂直侵入相关的有限应变可能导致 了各向异性结晶矿物的垂直排列,进而造成了中地壳负的径 向各向异性;在大别造山带西部,除了红安超高压(UHP)地 区的中地壳表现为负的径向各向异性,其余地区地壳表现为 正的径向各向异性,与NDC地区相似,红安UHP地区可能 也经历了类似的热动力学过程,而负的径向各向异性可能也 是由于深部岩浆垂直侵入导致的地震各向异性矿物的垂直 排列引起的。

方位各向异性方面,Yao H J 等^[28]利用背景噪声技术和 传统面波成像技术对西藏东南部岩石圈的面波相速度和方 位各向异性同时进行了反演。面波成像结果表明,方位各向 异性随深度存在很大的变化;喜马拉雅构造结东部周围地区 上地壳的方位各向异性表现为曲线模式,其方向性通常与主 要的走滑断层相平行;地幔的方位各向异性模式不同于地 壳,并且从南到北变化较为明显。三维方位各向异性变化图 像限制了横波分裂的源区,同时揭示:在北纬约 26°以南观测 到的大部分横波分裂都可以用地幔和地壳各向异性来解释, 不过地幔的各向异性起到的作用更大;在长波长的情况下, 地壳的方位各向异性模式不同于地幔,这可能与变形随着深 度发生变化有关。

背景噪声技术无论在径向各向异性研究方面还是在方 位各向异性研究方面,都发挥了重要的作用,随着噪声技术 的不断成熟与发展,其在各向异性的研究方面会取得更多的 成果。

3 利用噪声互相关技术研究地下介质波速随时间 变化

利用噪声互相关研究地下介质的速度结构变化是目前 地震学的研究热点之一^[29]。对两个地震台站的背景噪声进 行互相关运算可提取其间的经验格林函数,当噪声记录足够 长时,不同时段的经验格林函数往往可以保持较高的相似 性,如果介质中地震波速度发生变化,则这种变化可以通过 测量不同时段经验格林函数波形的微小走时偏移探测得 到^[30]。其中数据处理通常包括三个步骤:首先,对单台数据 进行预处理得到地震背景噪声;然后,对两个台站的背景噪 声进行互相关运算提取台站间的经验格林函数;最后,计算 不同时段的经验格林函数与参考经验格林函数的走时偏移, 由此得到相对地震波速度的时间变化^[31]。

地震前后地震波的速度可能会发生变化,这表明可以利 用观测地震波特性的变化来监测地下应力的变化,进而对地 震进行有限的预测^[2]。目前的研究主要集中于对汶川地震 震源区及周边地区地震波速度随时间变化的研究^[30,32-34]。

刘志坤等[30]应用 2007 年 3 月至 2009 年 3 月四川数字 地震台网的宽频带连续波形资料得到汶川地震震源区及其 周围不同区域地震波速度变化的空间差异。结果表明,2008 年汶川 8.0 级大地震造成了震源区及周边地壳介质速度的 急剧下降,跨过余震带或离余震带较近的台站对地震波速降 低较为明显,最大降幅达 0.4%;余震带外围的四川盆地各台 站对间波速也出现了不同程度的下降,但川西高原上的台站 对没有观测到显著的波速变化。在西南至东北约 300 km 长 的余震带内波速变化呈现空间分段的特征,大致以安县为 界,余震带西南部地区主震后很快达到最大波速降,而余震 带东北部地区的最大波速降出现在主震后的1~4个月,地 震波速度变化的这种分段特性与地震序列的时空分布特征 有较好的对应关系^[31]。作者同时认为地震导致断层区内部 结构破坏和周边介质应力状态改变是波速变化的主要原 因^[30]。Cheng X 等^[33]应用中国地震局区域地震台网记录的 噪声数据对汶川地震龙门山断裂带同震波速变化进行了研 究。结果表明,龙门山断裂带西北面的狭长地区出现了明显 的同震波速降低,降幅约为0.4%。作者认为同震波速降低 与地震所导致的应力大幅下降有关。

Liu Z X 等^[34]应用汶川地震震源区附近的小口径地震 台阵(紫坪铺水库台网)三分量连续波形资料研究了震源区 同震和震后波速变化的时间过程及其与深度的依赖关系。 结果表明,在汶川地震前,相对波速变化非常小,其均值约为 0;而在汶川地震后的前三个月波速迅速恢复,之后开始缓 慢恢复,波速恢复过程近似为对数的形式。该结果与有良好 观测条件的 Parkfield 地区得到的波速变化趋势相似。为了 研究波速变化的赋存深度,作者进一步分三个不同周期范围 内(1~2 s,2~4 s 和 4~8 s)计算了波速变化。尽管各周期 下的结果都显示在汶川主震发生时出现显著的同震波速降 低和震后波速恢复,但不同周期的同震波速降低的空间分布 和震后波速恢复,但不同周期的同震波速降低的空间分布 和震后波速的恢复过程存在着一定的差异,最为显著的特征 是 2~4 s 周期下的同震波速降低幅度及空间展布范围大于 其他两个周期,而且 2~4 s 周期下的震后波速恢复过程也 较其他周期缓慢^[31]。作者同时认为断层区和浅地表介质的 同震破坏及孔隙弹性回弹可能是波速变化的主要原因^[29]。

对于 2008 年汶川地震引起的地下介质速度变化,从学 者们的研究中可以看出发震断层附近的龙门山地区和四川 盆地出现明显的同震波速降低。同时可以得出,同震波速变 化在空间上具有分段特性,震后波速恢复过程在时间上近似 为对数形式,不同周期同震波速降低的空间分布和震后波速 恢复过程存在差异。刘志坤等^[29-30]认为同震波速变化是由 断层区内部结构破坏和周边介质应力状态改变造成的,而孔 隙弹性回弹是震后波速变化的主要原因;而 Cheng X 等^[33] 则认为是地震的发生导致应力大幅下降,进而引起同震波速 变化。上述学者对于同震波速变化的解释并未达成一致,因 此需要做进一步的工作加以研究。

噪声技术的迅速发展为人们探测地下结构变化提供了 一个新的思路,同时也为地震的预测以及研究提供了一个新 的方向。

4 结语

噪声成像既节约成本亦能提高精度,已经有越来越多的 学者应用此方法来进行研究工作。为了提高研究的可靠性, 噪声成像与地震面波成像、体波接收函数的联合使用成为了 一种新的趋势。同时利用噪声成像研究地下介质速度变化 为人们提供了一种监测地下应力变化的方法,从而为预测预 报及研究地震提供了新的思路,我们应当持续关注噪声成像 在此方面的应用,并开展进一步的研究。

参考文献(References)

- [1] 齐诚,陈棋福,陈顒,利用背景噪声进行地震成像的新方法[J].
 地球物理学进展,2007,22(3):771-777.
 QI Cheng, CHEN Qi-fu, CHNE Yong, A New Method for Seismic Imaging from Ambient Seismic Noise[J]. Process in Geophysics,2007,22(3):771-777.(in Chinese)
- [2] 孙进,高原.中国大陆背景噪声成像研究及应用前景[J].国际 地震动态,2011(3):12-17.
 SUN Jin,GAO Yuan.Research on Ambient Noise Tomography

and Application Prospects on Chinese Mainland[J].Recent De-

velopments in World Seismology, 2011(3):12-17. (in Chinese)

- [3] Benson G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, et al. Processing Seismic Ambient Noise Data to Obtain Reliable Broad-band Surface Wave Dispersion Measurements[J].Geophysical Journal International, 2007, 169:1239-1260.
- [4] 王琼,高原.噪声层析成像在壳幔结构研究中的现状与展望
 [J].地震,2012,32(1):70-81.
 WANG Qiong,GAO Yuan.Present State and Prospect of Ambient Noise Tomography in the Study of Crust-mantle Struc-
- [5] 何正勤,丁志峰,叶太兰,等.中国大陆及其邻域地壳上地幔速 度结构的面波层析成像研究[J].地震学报,2001,23(6):596-603.

ture[J].Earthquake, 2012, 32(1), 70-81. (in Chinese)

HE Zheng-qin, DING Zhi-feng, YE Tai-lan, et al.Surface Wave Tomography of the Crust and Upper Mantle of Chinese Mainland[J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23(6); 596-603. (in Chinese)

- [6] Xu Z J. Song X D. Zheng S H. Shear Velocity Structure of Crust and Uppermost Mantle in China From Surface Wave Tomography Using Ambient Noise and Earthquake Data[J]. Earthquake Science, 2013, 26(5): 267-281.
- [7] Zheng Y, Shen W S, Zhou L Q, et al. Crust and Uppermost Mantle Beneath the North China Craton, Northeastern China, and the Sea of Japan From Ambient Noise Tomography[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116, B12312-B12336.
- [8] Cheng C, Chen L, Yao H J, et al. Distinct Variations of Crustal Shear Wave Velocity Structure and Radial Anisotropy Beneath the North China Craton and Tectonic Implications[J]. Gondwana Research, 2013, 23(1):25-38.
- [9] Tang Y C. Chen Y J. Zhou S Y. et al. Lithosphere Structure and Thickness Beneath the North China Craton From Joint Inversion of Ambient Noise and Surface Wave Tomography [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013, 118 (5): 2333-2346.
- [10] Luo Y H, Xu Y X, Yang Y J. Crustal Structure Beneath the Dabie Orogenic Belt from Ambient Noise Tomography[J].
 Earth and Planetary Science Letters, 2012, 313-314:12-22.
- [11] Li H Y, Su W, Wang C Y, et al. Ambient Noise Rayleigh Wave Tomography in Western Sichuan and Eastern Tibet [J].Earth and Planetary Science Letters, 2009, 282; 201-211.
- [12] Yang Y J,Ritzwoller M H,Zheng Y, et al. A Synoptic View of the Distribution and Connectivity of the Mid-crustal low Velocity Zone Beneath Tibet [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: B04303.
- [13] Yang Y J, Zheng Y, Chen J, et al. Rayleigh Wave Phase Velocity Maps of Tibet and the Surrounding Regions From Ambient Noise Tomography[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2010, 11(8): Q08010.
- [14] Yao H J, Beghein C, Van Der Hilst R D.Surface Wave Array Tomography in SE Tibet Aambient Seismic Noise and Twostation II.Crustal and Upper-mantle Structure[J].Geophysical Journal International, 2008, 173(1): 205-219.

- [15] Guo Z, Gao X, Yao H J, et al. Midcrustal Low-velocity Layer Beneath the Central Himalaya and Southern Tibet Revealed by Ambinet Noise Array Tomography[J].Geochemistry Geophysics Geosystems, 2009, 10(5): Q05007.
- [16] Liu Z K, Huang J L, Peng Z G, et al. Seismic Velocity Changes in the Epicentral Region of the 2008 Wenchuan Earthquake Measured from Three-component Ambient Noise Correlation Techniques[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(1):37-42.
- [17] Li H Y, Li S, Song X D, et al. Crustal and Uppermost Mantle Velocity Structure Beneath Northwestern China from Seismic Ambient Noise Tomography[J].Geophysical Journal International, 2012, 188(1):131-143.
- [18] Li H Y, Shen Y, Huang Z X, et al. The Distribution of the Mid-to-lower Crustal Low-velocity Zone Beneath the Northeastern Tibetan Plateau Revealed from Ambient Noise Tomography [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2014, 119(3): 1954-1970.
- [19] Xu X M, Li H Y, Gong M, et al. Three-dimensional S-wave Velocity Structure in Eastern Tibet from Ambient Noise Rayleigh and Love Wave Tomography[J]. Journal of Earth Science, 2011, 22(2):195-204.
- [20] Zhou L Q.Xie J Y, Shen W S, et al. The Structure of the Crust and Uppermost Mantle Beneath South China from Ambient Noise and Earthquake Tomography[J]. Geophysical Journal International, 2012, 189(3):1565-1583.
- [21] Shen Y, Ren Y, Gao H Y, et al. An Improved Method to Extract Very-broadband Empirical Green's Function From Ambient Seismic Noise[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012, 102(4):1872-1877.
- [22] Xu P F, Ling S Q, Li C J, et al. Mapping Deeply-buried Geothermal Faults Using Microtremor Array Analysis[J]. Geophysical Journal International, 2012, 188, 115-122.
- [23] 张忠杰,许忠淮.地震学百科知识(五)——地震各向异性[J].
 国际地震动态,2013(6);34-41.
 ZHANG Zhong-jie, XU Zhong-huai. Seismology Encyclopedic Knowledge (Fifth)——Seismic Anisotropy[J]. Recent Developments in World Seismology,2013(6);34-41.(in Chinese)
- [24] 彭艳菊,黄忠贤,苏伟,等.中国大陆及邻区海域地壳上地幔各向异性研究[J].地球物理学报,2007,50(3):752-759.
 PENG Yan-ju, HUANG Zhong-xian, SU Wei, et al. Anisotropy in Crust and Upper Mantle Beneath China Continent and Its Adjacent Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50 (3):752-759. (in Chinese)
- [25] Li H Y, Su W, Wang C Y, et al. Ambient Noise Love Wave Tomography in the Eastern Margin of the Tibetan Plateau [J]. Tectonophysics, 2010, 491:194-204.
- [26] Huang H, Yao H J, Van Der Hilst R D.Radial Anisotropy in

the Crust of SE Tibet and SW China from Ambient Noise Interferometry[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37: L21310.

- [27] Luo Y H,Xu Y X,Yang Y J.Crustal Radial Anisotrophy Beneath the Dabie Orogenic Belt From Ambient Tomography [J]. Geophysical Journal International, 2013, 195 (2): 1149-1164.
- [28] Yao H J, Van der Hilst R D, Montagner J P. Heterogeneity and Anisotropy of the Lithosphere of SE Tibet From Surface Wave Array Tomography [J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth.2010.115:B12307.
- [29] 刘志坤,黄金莉.汶川震中区震后波速变化——基于三分量噪 声互相关的结果[J].国际地震动态,2012(6):48.
 LIU Zhi-kun, HUANG Jin-li. Temporal Changes of Sismic Velocity in Epicentral Area after the Wenchuan Earthquake——Based on the Results of Three-component Noise Correlation[J]. Recent Developments in World Seismology, 2012(6):48.(in Chinese)
- [30] 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[J].地球物理学报,2010,5(4):853-863.
 LIU Zhi-kun, HUANG Jin-li. Temporal Changes of Sismic Velocity Around the Wenchuan Earthquake Fault Zone from Ambient Seismic Noise Correlation[J].Chinese Journal of Geophysics,2010, 5(4):853-863.(in Chinese)
- [31] 黄金莉,刘志坤,利用背景噪声研究汶川地震引起的地下介质 波速变化[R].中国地球物理 2013——十四分会场论文集. 2013:446-447.

HUANG Jin-li, LIU Zhi-kun. Temporal Changes of Sismic Velocity Around the Wenchuan Earthquake from Ambient Seismic Noise Correlation [R]. Chinese Geophysics in 2013——Fourteen Session Paper Set. 2013: 446-447. (in Chinese)

- [32] 许康生,李秋红,李英.大地震前近台背景噪声的频谱分析
 [J].西北地震学报,2012,34(2):150-153.
 XU Kang-sheng,LI Qiu-hong,LI Ying. Analysis on the Spectrum of Background Noise in Stations Near by Epicenters of Two Great Earthquakes[J].Northwestern Seismological Journal,2012,34(2):150-153.(in Chinese)
- [33] Cheng X, Niu F L, Wang B S. Coseismic Velocity Change in the Rupture Zone of the 2008 7.9 Wenchuan Earthquake Observed from Ambient Seismic Noise[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(5B): 2539-2550.
- [34] Liu Z K, Huang J L, Peng Z G, et al. Seismic Velocity Changes in the Epicentral Region of the 2008 Wenchuan Earthquake Measured from Three-component Ambient Noise Correlation Techniques[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(1): 37-42.