

赵琳, 安美建, 沈旭章, 代光辉, 田建雄. 2011. 云南地区的背景弹性波场分析. 地震学报, 33(6): 723-734.
Zhao Lin, An Meijian, Shen Xuzhang, Dai Guanghui, Tian Jianxiong. 2011. Analysis on background weak seismic signals in Yunnan, China. *Acta Seismologica Sinica*, 33(6): 723-734.

云南地区的背景弹性波场分析*

赵 琳¹⁾ 安美建^{1),*} 沈旭章²⁾ 代光辉³⁾ 田建雄¹⁾

1) 中国北京 100081 中国地质科学院地质力学研究所

2) 中国兰州 730000 甘肃省地震局

3) 中国北京 100045 中国地震台网中心

摘要 利用云南省地震台网 44 个台站记录的 2008 年 1—9 月连续波形数据进行互相关计算, 得到了台站间的格林函数, 并获取对应的频散曲线, 据此分析了该地区的区域背景弹性波场的来源及分布. 研究发现, 该地区的区域背景弹性波场有着明显的方向性, 15 s 信号的总体传播方向是从东南向西北, 也就是说主要来自云南省的东南方向, 据此推测区域背景弹性波场可能与中国南海或者南太平洋的海洋活动有关. 另外该地区的区域背景弹性波场有着明显的季节性变化, 其中 6—9 月份的能量较强. 对比中国大陆风力分布发现, 该信号与区域台站附近及台站间的风力没有明显关系.

关键词 环境噪声 背景信号 互相关 频散曲线

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.06.003 中图分类号: P315.3⁺1 文献标识码: A

Analysis on background weak seismic signals in Yunnan, China

Zhao Lin¹⁾ An Meijian^{1),*} Shen Xuzhang²⁾ Dai Guanghui³⁾ Tian Jianxiong¹⁾

1) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*

2) *Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, China*

3) *China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China*

Abstract: Using 9 months waveform data recorded at 44 seismic stations of Yunnan seismic network during 2008, we obtained Green's functions between the stations with cross-correlation analysis, and then retrieved wave dispersion curves from the Green's functions. Using the Green's functions and dispersion curves, we analyzed the sources of the regional background weak signals. The Green's functions show that the background weak signals in a period of 15 s propagated from southeast to northwest in the Yunnan province. The azimuthal variation of the signals implies that they may be related to the effect of oceanic waves in South China Sea or southern Pacific ocean. The background signals show a seasonal variation, with the strongest signals appeared between June and September in a year. Comparing the signals with wind data, we could not find

* 基金项目 中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费项目(DZLXJK201003)和中国地质调查局地质调查工作项目(121201091624)资助.

收稿日期 2010-12-20 收到初稿, 2011-04-07 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: meijianan@yahoo.com.cn 网络出版时间: 2011-9-29 17:02:03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2021.P.20110929.1702.001.html>

any relation between them.

Key words: ambient noise; background weak signal; cross correlation; dispersion curve

引言

对天然地震和人工地震信号进行研究是地震学的主要研究内容. 在这些研究中, 地震信号之外的信号被当作无用的环境噪声而需要被剔除. 但近年来, 地震学家除了对天然地震和人工地震信号进行研究外, 还试图通过对地震信号之外的曾经被称为环境噪声的信号进行分析, 并从中提取出对认识自然现象或地球结构有价值的信号 (Moschetti *et al.*, 2007; Vassallo *et al.*, 2008; 房立华等, 2009; 刘志坤, 黄金莉, 2010). 比如, 通过对两个台站记录的长时序连续波形进行互相关, 可以得到台站对之间的格林函数 (Snieder, 2004; Wapenaar, 2004; Shapiro, Campillo, 2004), 利用该格林函数, 可以提取出面波的频散曲线, 再利用传统面波层析成像方法就可以反演区域的波速结构; 另外, 也可以通过分析格林函数来了解有关信号的来源 (Stehly *et al.*, 2006). 显然, 这些从环境噪声中提取出的微弱的弹性波信号代表了区域背景弹性波场. 这个信号虽然很微弱, 但是长期存在的; 而且是有方向的, 并非杂乱无章的. 虽然多数文献仍称之为环境噪声, 但为了不给人造成误解, 本文称这些信号为背景弹性波场. 由于背景弹性波场包含了海浪、风等自然现象所产生的信号以及人类活动所产生的信号, 对区域背景弹性波场进行分析可以提取出各种信号的特征和来源, 这也是利用固体地球物理方法了解地球自然现象的一种途径.

云南地区地处青藏高原东南缘, 是印度板块与欧亚板块碰撞所导致的强烈变形地带. 这里地质构造特殊且复杂, 活动断裂非常发育, 是我国西部主要的地震多发区之一. 这里不但经常发生中强地震 (如 1988 年 11 月分别在澜沧和耿马发生的 $M_s 7.6$ 和 $M_s 7.2$ 大地震), 而且具有火山、温泉、活动断裂等典型现今构造活动特征 (白志明, 王椿镛, 2003). 这里一直是固体地球科学研究的重点 (王义昭等, 1988; 汪一鹏等, 2003; 郑庆鳌等, 2006; 李玉江等, 2009). 因此, 本文选择了云南地区进行研究. 我们利用云南地震台网台站记录的连续波形数据进行互相关计算, 通过计算得到的互相关结果分析该地区的区域背景弹性波场, 试图分析其来源、方位分布以及随季节的变化特征.

1 数据和方法

1.1 数据及处理方法

本研究所用数据是由云南地震台网 44 个宽频地震台站记录的 2008 年 1—9 月份的连续记录波形数据. 地震台站分布如图 1a 所示.

提取背景弹性波场信号, 首先需要去除地震信号及设备响应. 在数据处理中我们将波形数据切成以 1 小时为单位长度, 然后对所有数据进行去仪器响应、去均值、去倾斜分量、重采样 (5 点/秒) 以及带通滤波, 接着进行了时域归一化和频域归一化处理.

对波形数据进行时域归一化处理就是去除原始波形数据中的地震事件. 常用的归一化方法包括滑动绝对值平均归一化、one-bit 归一化、迭代水准面归一化、削波 (Bensen *et al.*, 2007). 滑动绝对值平均归一化虽然是一种古老的数据处理方法, 但是因为其计算量较小,

果与 Bensen 等(2007)所得到的结果是一致的. 基于滑动绝对值平均归一化的优越性, 本次研究中使用的的方法是滑动绝对值取平均.

时域归一化处理之后, 进行频谱归一化处理. 频谱归一化可以在频率域压制某些较强的信号, 能够使不同频率信号的振幅是近似的, 这样可以获得更加连续的频散曲线.

互相关(有时也称为“互协方差”)是用来表示两个信号之间相似性的一个度量, 通常通过与已知信号比较用于寻找未知信号中的特性. 我们首先对一小时的数据进行互相关计算, 然后叠加至整个时间段.

为了验证本次研究中 9 个月的互相关计算是否可以得到很稳定的结果, 我们利用 KMI (昆明)与 ENH(恩施)台之间不同时序的互相关计算结果来进行分析. 图 1b 为 ENH 和 KMI 台站位置分布图, 图 2 为 KMI 和 ENH 台之间经过 0.8—40 s 的带通滤波之后分别进行时序为 1, 2, 3, 6, 9 个月和 1 年的互相关计算得到的结果. 可以看出, 随着时序的增加, 面波格林函数越来越清楚; 9 个月与 1 年数据所得结果的信噪比非常接近, 表明 9 个月的格林函数已经较为稳定.

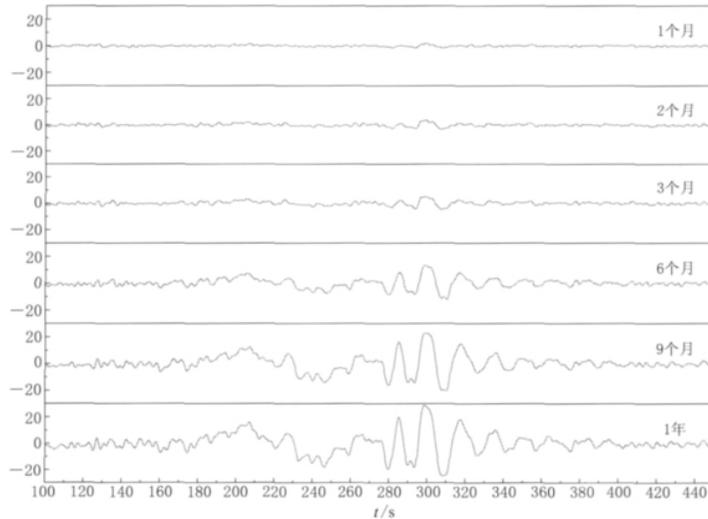


图 2 ENH 和 KMI 台互相关计算得到的格林函数

图中波形是利用时长分别为 1, 2, 3, 6, 9 个月和 1 年数据互相关计算的结果

Fig. 2 Green's functions between the stations ENH and KMI

Each subfigure shows Green's function deduced from observations in different time-series

经过互相关计算之后, 得到的波形是个估算的格林函数. 通过这个函数, 利用传统的时频分析(Dziewonski *et al*, 1969; Levshin *et al*, 1972)就可以获得面波的频散. 时频分析方法提供了时间域与频率域的联合分布信息, 清楚地描述了信号在不同时间和频率的能量密度或强度. 利用它来分析信号, 能给出各个时刻的瞬时频率及其幅值. 频散曲线指的是波速(注: 由于距离是已知的, 因此也可以说是信号的传播时间)与频率间的关系曲线.

图 3 为 KMI 和 ENH 台站进行时序为 1 年的互相关计算得到的频散曲线. 可以看出其有着很好的频散特性.

图 4 为 KMI 与 ENH 台站之间进行时序为 3 个月、9 个月、1 年、2 年、3 年、4 年的互

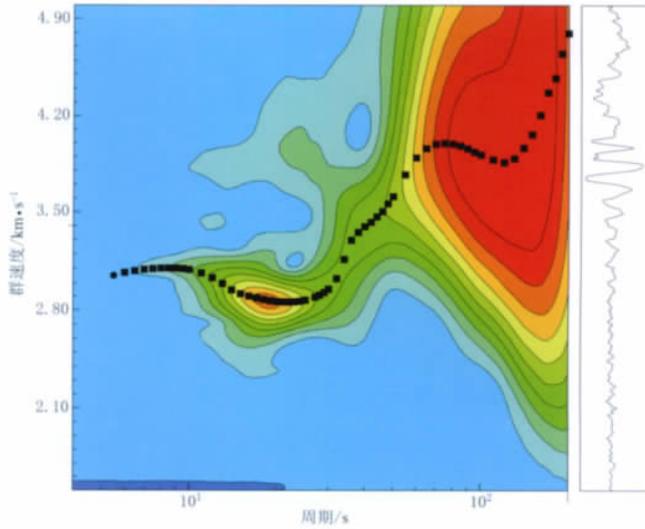


图 3 格林函数时频分析实例. 右图为时频分析用的波形
 Fig. 3 Example of dispersion measurement. Right side is the waveform used in dispersion analysis

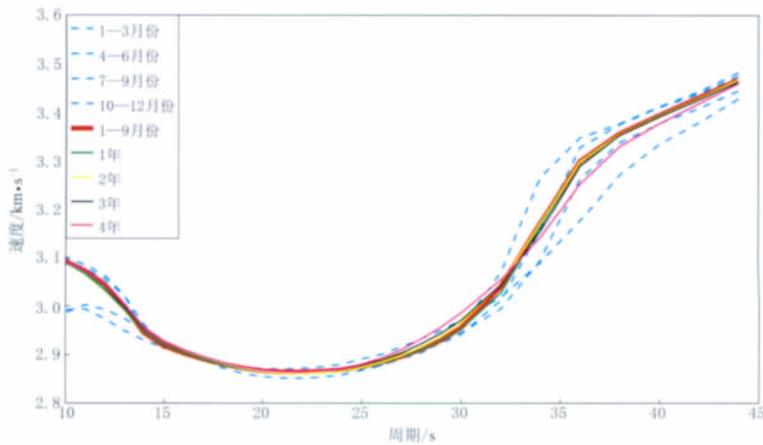


图 4 不同时序长度得到的格林函数的频散曲线比较图
 Fig. 4 Dispersions measured using observations in different time-series

相关计算得到的频散曲线. 可以看出, 时序为 9 个月的互相关计算得到的频散曲线(红色)相比 3 个月的频散曲线(浅蓝色)平滑, 且处于浅蓝色线的中间位置. 在周期 10—25 s 与 1 年及更长时序的频散曲线差别很小. 由于面波频散本身只与深部结构有关, 那么可以说 9 个月时长数据互相关计算得到的在 10—25 s 之间的频散曲线能够可靠地代表传播路径的深部结构. 由于互相关波形不但与深部结构有关, 还与信号本身有一定关系, 那么沿同样路径(即同样的深部结构)相反方向传播的波的差别则应该只与信号源有关, 即与区域背景波场有关. 前面显示的 9 个月与 1 年数据所得格林函数信噪比非常接近也说明了这一点. 故此本文不讨论周期在 10—25 s 之外的信号特征.

1.2 背景弹性波场的方向性

对任意两个台站数据之间进行互相关计算会得到正负两个分支, 正的分支称为因果信号, 负的分支称为非因果信号. 具体地讲, 如果对台站 A 到台站 B 进行互相关计算, 得到的格林函数的正分支部分反映的是从台站 A 到 B 的信号特征, 负分支部分则反映的是从台站 B 到台站 A 之间的信号特征. 如果信号源在空间上分布是均匀的话, 这两个分支应该是对称的. 但信号源的空间分布往往是不均匀的, 因此实际得到的正负两个分支往往是不对称的, 那么从这两个分支的差别就可以分析向两个相反方向传播的波的信号源信息. 对于台站 A 和 B 来说, 如果从 A 到 B 的区域背景弹性波场强度大, 则说明了台站 A 方向存在一个明显的信号源.

图 5 为台站 KMI 和 ENH 所记录数据进行不同时序的互相关计算结果的频散曲线示意图. 可以看出, 从台站 KMI 到 ENH 与从台站 ENH 到 KMI 的互相关计算结果的频谱特征有着明显差别. 相比之下, 从台站 ENH 到 KMI 相对从台站 KMI 到 ENH 的频散特性较明显, 且对于同样周期的信号其振幅较强. 这不但说明了台站之间正向与反向互相关计算结果是明显不对称的, 也说明了背景弹性波场信号是从台站 ENH 传向台站 KMI 的.

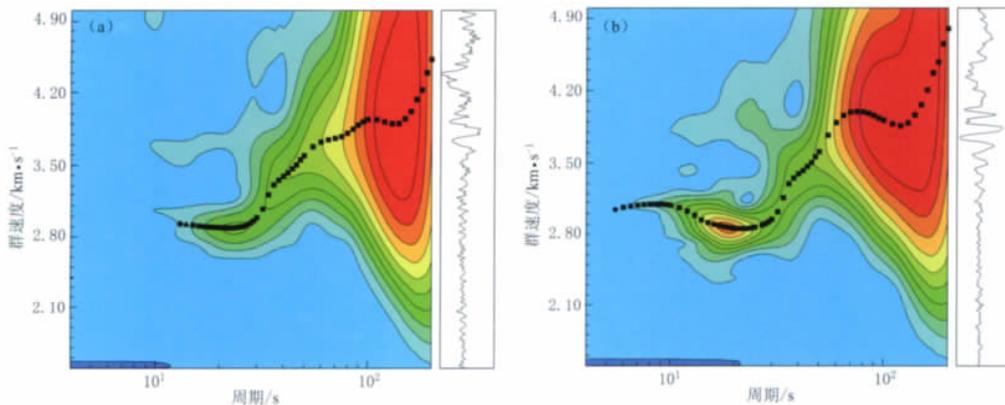


图 5 KMI 和 ENH 台 12 个月数据互相关格林函数时频分析图

(a) 从台站 KMI 到 ENH 的信号; (b) 从台站 ENH 到 KMI 的信号

Fig. 5 Frequency-time relation of the cross-correlation Green's functions between KMI and ENH stations which was resulted by using 12 month observations

(a) The signal from KMI to ENH; (b) The signal from ENH to KMI.

为了确保本次研究中所用程序及方法的可靠性, 本次研究中对欧洲的 TUE 与 DSB、GRFO、MORC 台站之间进行了互相关计算, 得到了台站对之间的区域背景波场的传播方向. 所得结果与 Yang 和 Ritzwoller(2008)得到的结果一致. 这说明了本文所用的方法和程序是可靠的.

2 云南地区区域背景弹性波场

2.1 背景弹性波场的方向性

鉴于多数台站间距约数百公里, 即多数台站对可以得到可靠的周期约 15 s 的格林函数, 且 9 个月数据可以得到可靠的 10—25 s 互相关结果, 因此这里主要分析周期为 15 s 的格林函数的特征. 图 6a—d 分别显示了利用云南省的 YUJ(元江)、GOS(贡山)、CAY(沧源)、

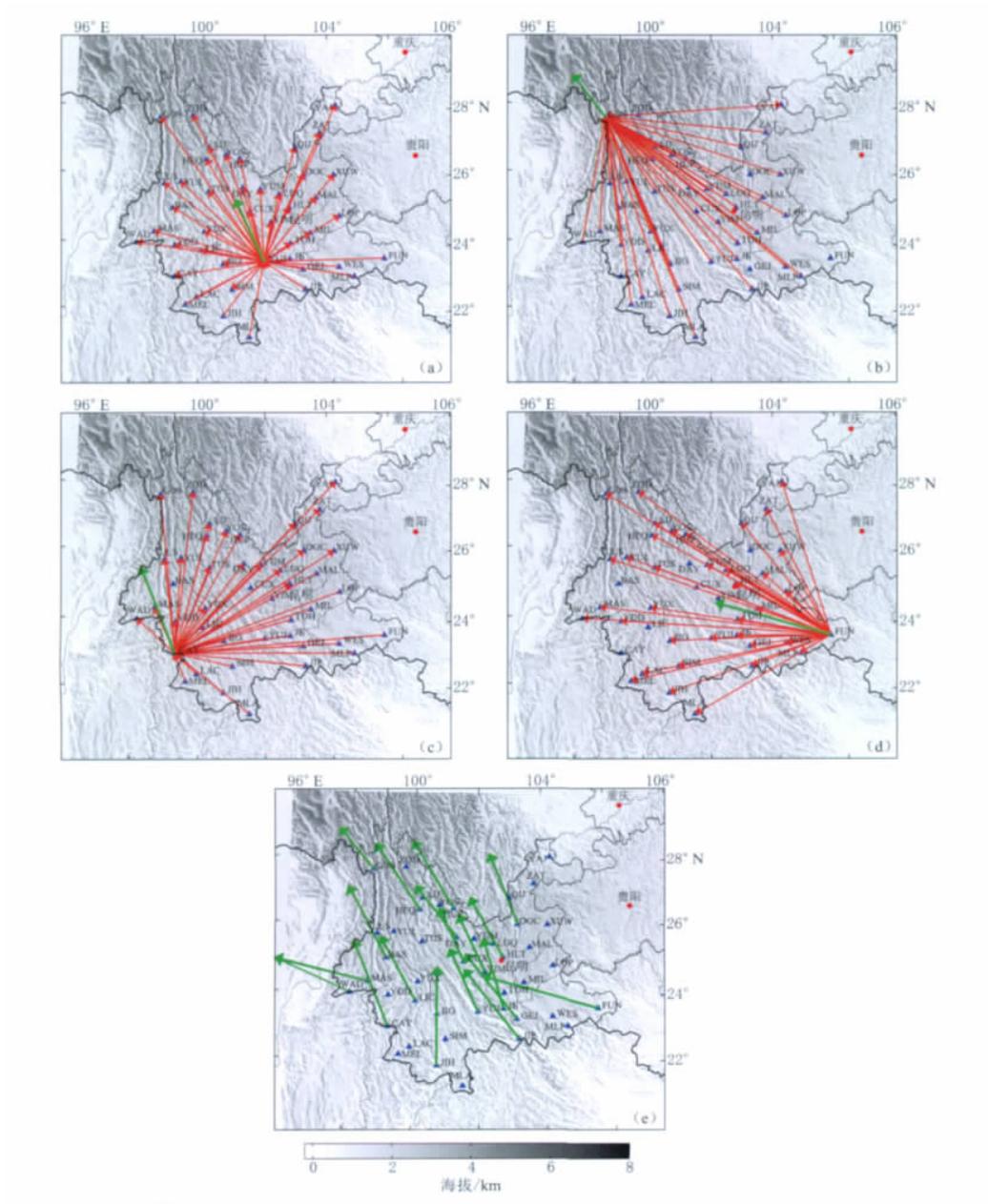


图 6 区域背景波场方位分布图

(a) YUJ 台到其它台站的区域背景波场传播方向；(b) GOS 台的结果；(c) CAY 台的结果；(d) FUN 台的结果；
 (e) 研究区的各台站到其它所有台站的区域背景波场的平均方向。红色箭头表示区域背景波场在站台对间的方向，绿色箭头表示从一个台到其它所有台站对之间的区域背景波场的平均方向；

Fig. 6 Azimuthal variation of background weak signals

(a) Propagation direction of background weak signals between YUJ and other stations; (b) Result of GOS;
 (c) Result of CAY; (d) Result of FUN; (e) Average direction of background weak signals in the study region.
 Red arrows denote propagation direction of the signals between two stations. Green arrows stand for the average propagation direction of red arrow directions

FUN(富宁)台站与其它台站之间进行互相关格林函数分析之后,得到的区域背景弹性波场周期 15 s 左右信号的传播方向.可以看出,该信号的方向性非常强,总体的传播方向为西北方向,也就是说来自东南方向.图 6e 为研究区中的各台站与其它台站间背景波场 15 s 信号的平均方向分布.该图明显地显示了,云南地区区域背景波场 15 s 信号的传播方向是从东南向西北方向的.

2.2 背景弹性波场的季节性

前人对其它区域的研究中发现了背景弹性波场在 4—9 月份强,其它月份弱的季节性变化特点 (Stehly *et al.*, 2006; 鲁来玉等, 2009). 我们首先看 KMI 与 ENH 台站对间背景波场信号强度随时间的变化特征. 图 7 分别给出了该台站对之间 2005—2008 年每年区域背景波场信号强度随时间和周期的分布图. 其中横坐标为月份,纵坐标为周期,彩色表示振幅(即强度或能量)的大小. 比较这 4 年的结果可以看出,这两个台站之间的背景弹性波场在每个年度内存在明显的季节性变化,总体看来 6—9 月份的背景弹性波场信号强度比其它月份强.

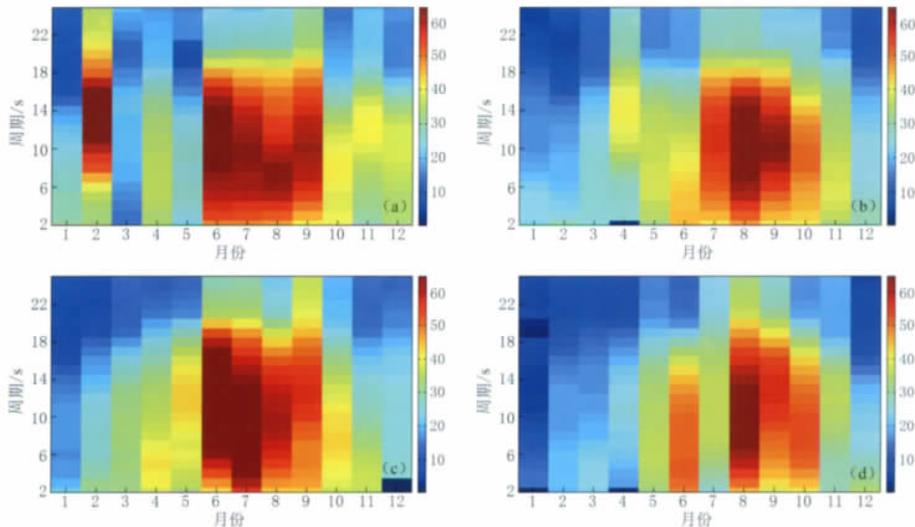


图 7 KMI 与 ENH 台站之间的背景波场信号强度随时间和周期的分布图

图(a)—(d)分别表示 2005—2008 年的数据结果. 彩色表示振幅(即强度或能量)的大小

Fig. 7 Variation of background signal amplitude with time and periods between station KMI and ENH
Result is obtained from the observation of (a) 2005, (b) 2006, (c) 2007 and
(d) 2008. Color bar scales signal amplitude

我们对云南地震台网各台站对 2008 年 1—9 月份的背景弹性波场也进行了分析,发现区域背景波场随时间也有着明显的变化特征. 图 8 显示了云南省的几个不同台站对之间格林函数各周期信号能量大小随月份的变化图. 从图 8 中可以看出,虽然个别台站对在部分月份(如图 8b 在 9 月份,其它图在 1 月份)的结果与其它台站对有偏差,但整体看来 6—9 月份的振幅强,其它月份的振幅相对较弱. 这与对昆明和恩施台分析的结果是一致的. 虽然我们使用的数据量(9 个月)不足一年,但考虑到这种在 6—9 月份与昆明和恩施台结果的一致性以及参考前人在其它地区已经发现了 4—9 月份强的变化规律,我们推测本研究区的区域背景弹性波场也应有明显的季节性变化,即 6—9 月份的能量较强.

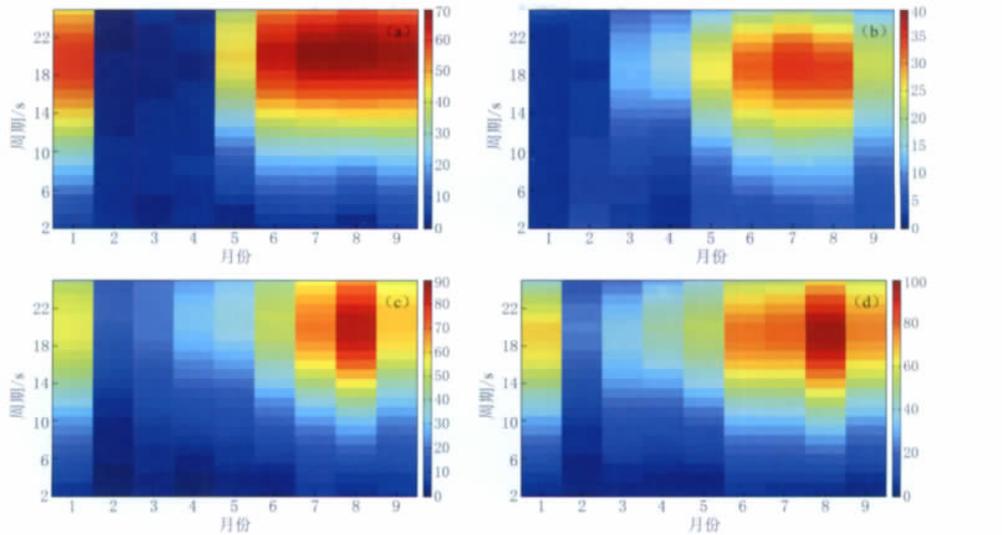


图 8 2008 年台站间背景波场信号强度随时间和周期的分布图

(a) HEQ(鹤庆)台与 YOD(永德)台; (b) HLT(黑龙潭)台与 MEL(孟连)台; (c) YIM(易门)台与 JIH(景洪)台; (d) DAY(大姚)台与 LAC(澜沧)台. 其中色棒彩色表示振幅(即强度或能量)的大小

Fig. 8 Variation of background signal amplitude with time and periods between two stations

(a) Result between station HEQ and YOD; (b) Between HLT and MEL; (c) Between YIM and JIH;

(d) Between DAY and LAC. Color bar scales signal amplitude

2.3 背景波场与区域水系的关系

云南境内存在怒江、澜沧江和金沙江等大的河流, 其流向多数是近似从北向南的. 而根据图 6 显示的结果, 该区域背景波场的传播方向是从东南向西北的, 这说明研究区域的背景波场的传播方向可能与水流没有直接关系.

2.4 背景波场与区域风力大小分布的关系

风是区域环境噪声的主要来源之一. 前人研究发现, 风产生的噪声频带范围较宽, 范围从约 0.5 Hz 到 15—60 Hz (Young *et al.*, 1996), 即风产生的信号周期一般小于 2 s. 本次研究中所有信号的频带范围为 0.025—1.25 Hz, 只有较高频率的信号涵盖了风的影响. 从信号频率来判断, 这两种信号相互覆盖较少. 另外, 由于风往往与其它局部自然现象具有明显的关系, 如果风力大小分布与区域背景弹性波场没有明显关系, 那么就可以认为区域背景弹性波场与风以及与风相关的其它自然现象间没有明显关系.

为了查证该地区的区域背景弹性波场与区域风力大小以及由风而引起的其它因素强弱及它们的分布是否相关, 我们从中国气象局国家气象信息中心搜集了 2008 年中国大陆地区的风力数据, 图 9 为 2008 年中国大陆的平均风力图. 在风力中, 0 级风对应的风速为 0.0—0.2 m/s, 1 级风对应的风速为 0.3—1.5 m/s, 2 级风对应的风速为 1.6—3.3 m/s, 3 级风对应的风速为 3.4—5.4 m/s. 因为在研究区域风力多数时间在 3 级以下, 所以图中最高的风力就 3 级. 如果这里得到的区域背景弹性波场信号与风力的大小有关, 那么云南东南部的平均风力应该较强. 从图 9 中可以看出, 云南境内的风力强度分布东北强于西南, 且云南以东的广西西部的风力相对云南其它地方小一些. 可见区域风力的大小与该区域的区域背景波场的强度没有直接关系.

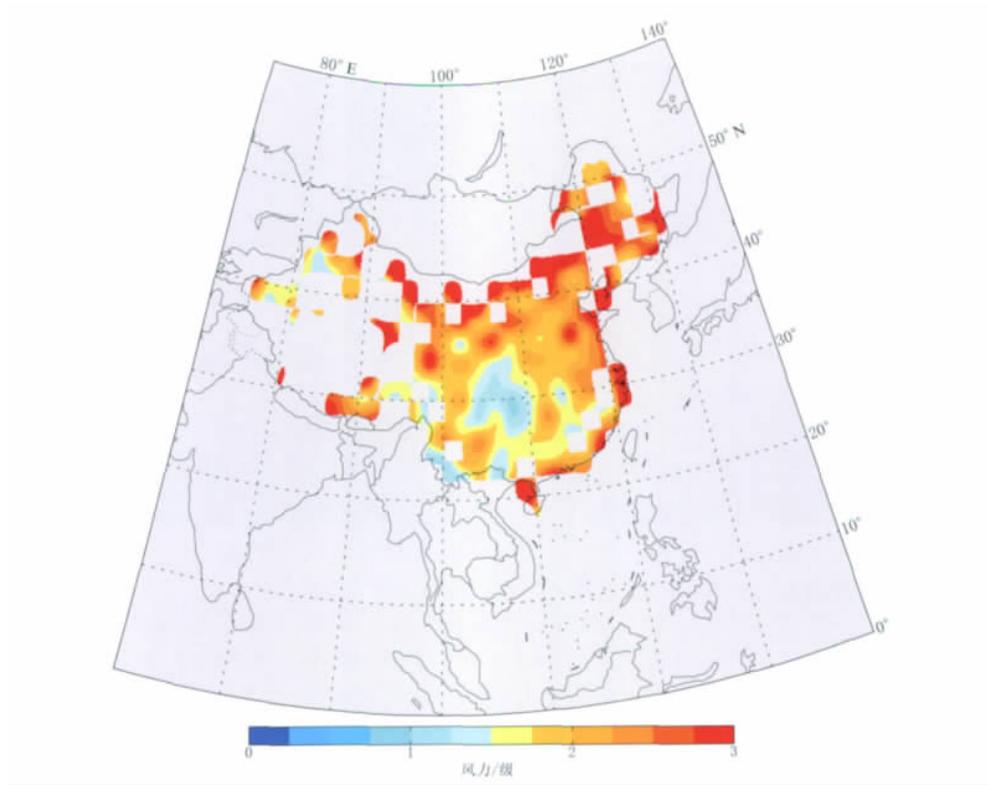


图 9 2008 年中国大陆地区平均风力图

Fig. 9 Average wind-force in China mainland during 2008

2.5 背景波场与区域风力季节变化的关系

图 10 为地震台站之间的风力与背景信号强度月变化曲线。图 10a 为 HLT(黑龙潭)与 QIJ(巧家)台之间互相关计算得到的区域背景波场月变化图。图 10b 为 HLT 与 QIJ 台所在

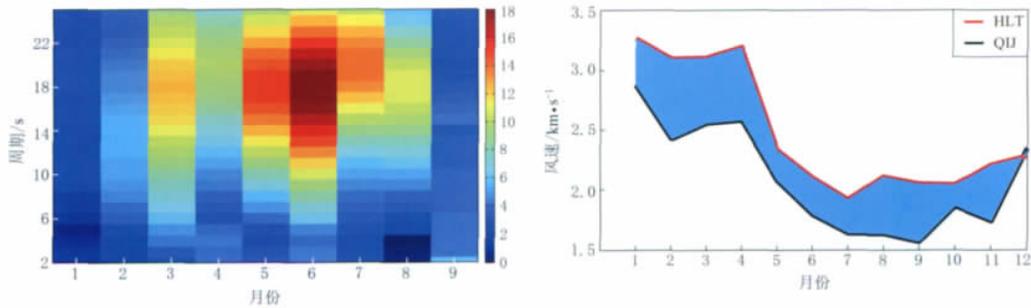


图 10 2008 年 HLT 与 QIJ 台站间背景信号(a)与风力强度(b)随月份变化图

图(b)中红色和黑色曲线分别表示各个台站所在区域的风力月变化曲线, 浅蓝色的填充区域表示的是两个台站所在区域的风力月变化的差值

Fig. 10 Variation of (a) background signals and (b) wind-forces with time Red and black curves in (b) show monthly variation of wind-force at the station SLT and QIJ, respectively, and the light blue area indicates wind force difference between the two stations in a month

区域的风力月变化曲线, 浅蓝色的填充区域表示的是两个地方的风力月变化的差值. 从图 10b 可以看出, 1—4 月份两个台站之间的风力和风力差值较大. 如果该台站对之间记录的区域背景波场是由风引起的, 那么区域背景波场应该在 1—4 月份的强度较大, 但是图 10a 显示出 5—7 月份(注: 上面分析指出在整个区域平均为 6—9 月份)的背景波场相对较强, 两者在时间上的重叠性较差.

风产生的信号频率范围约 0.5 Hz 到 15—60 Hz(Young *et al.*, 1996), 图 10a 中周期 2 s 正好在这个范围, 但该图显示, 1—3 月周期 2 s 的区域背景波场信号在整年是较低的. 总之, 该地区的区域背景波场与风力大小以及与风相关的其它自然现象间的关系不大.

2.6 与海洋波浪的关系

能够在较长时间持续存在的区域背景信号一般来自于一些较长时间持续存在的区域自然现象, 比如大气(风等)、水(河流、海浪)等. 在以上讨论中我们基本排除了区域风和河流的影响, 那么区域背景信号最有可能来自于海浪等与海洋有关的因素. 但本次研究中没有搜集海洋方面的有关资料, 因此不能直接获得云南地区的背景弹性波信号与海洋活动有关的直接证据. 但是对于其它地区的一些研究结果(Stehly, 2006)显示, 台站互相关得到的格林函数与海洋波浪有关. Bromirski 和 Gerstoft(2009)发现, 当海洋的波浪到达海岸的时候, 区域背景波场的能量变大, 而当离开之后, 区域背景波场的能量变小.

我们这里得到的背景弹性波场方向为从东南向西北. 如果背景波场与海洋的波浪有关的话, 那么云南地区周期在 15 s 左右的背景弹性波场信号不应该来自于印度洋的孟加拉湾, 而可能来自于中国南海方向, 也有可能来自于更远一些的南太平洋. 因此该信号可能与中国南海或者南太平洋的海洋活动有关, 比如是由南海或者南太平洋的涌浪等引起的.

3 讨论与结论

本文利用云南地震台网记录的连续波形数据进行了互相关计算, 得到了云南省的区域背景波场的方向性分布. 通过对有关资料进行分析, 得到了以下结论:

1) 云南地区背景弹性波场方向性非常强, 总体的传播方向为从东南向西北, 即来自东南方向.

2) 分析区域背景波场强度的月变化, 发现其随时间有着明显的变化. 参考台站 KMI 与 ENH 之间 4 年的区域背景弹性波场的月变化, 推测 6—9 月份的能量强, 而其它月份的能量相对较小.

3) 对比中国大陆风力分布发现, 大于 2 s 的区域背景波场信号与区域风力间没有明显关系, 据此推测与风相关的其它自然现象间的关系也不大.

4) 由于本文得到 15 s 的区域背景弹性波场方向为从东南向西北, 参考前人对其它地区的研究, 我们推测, 该信号与中国南海或者南太平洋的海洋活动有关, 比如是由南海或者南太平洋的涌浪等引起的.

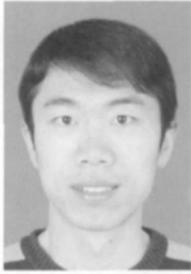
本文的结果表明, 风力的分布与周期 2 s 以上区域背景弹性波场信号没有明显关系. 但由于使用的气象台站分布数量有限、分布不均匀等, 可能对精确分析风力和区域背景弹性波场的关系造成影响. 尤其是由于风产生的信号周期相对较小, 且研究中所用地震台站的间距较大, 那么就不能排除近距离台站对可提取的小于 2 s 周期信号与风之间可能存在的关系. 因此使用近距离和高密度的台站数据, 可以对这个关系进行研究.

本研究中互相关分析和时频分析过程使用了(Herrmann, Ammon, 2002)软件包,部分图形绘制使用了 GMT(Wessel, Smith, 1991)软件。地震数据由中国地震台网中心提供,风力数据由中国气象局国家气象信息中心提供。在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 白志明, 王椿镛. 2003. 云南地区上部地壳结构和地震构造环境的层析成像研究[J]. 地震学报, **27**(2): 117–127.
- 房立华, 吴建平, 吕作勇. 2009. 华北地区基于噪声的瑞利面波群速度层析成像[J]. 地球物理学报, **52**(3): 663–671.
- 李玉江, 陈连旺, 李红, 叶际阳. 2009. 云南地区构造应力场与强震活动关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, **29**(4): 26–29.
- 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.
- 鲁来玉, 何正勤, 丁志峰, 姚志祥. 2009. 华北科学探测台阵背景噪声特征分析[J]. 地球物理学报, **52**(10): 2566–2572.
- 裴益轩, 郭民. 2001. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报, (1): 21–23.
- 汪一鹏, 沈军, 王琪, 熊熊. 2003. 川滇块体的侧向挤出问题[J]. 地学前缘, **10**(1): 188–192.
- 王义昭, 熊家镛, 林尧明. 1988. 云南地质构造的若干特点[J]. 云南地质, **7**(2): 105–111.
- 郑庆鳌, 俞国芬, 王维贤. 2006. 云南地质(断裂)构造骨架新认识[J]. 云南地质, **25**(2): 119–124.
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, Levshin A L, Lin F, Moschetti M P, Shapiro N M, Yang Y. 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements[J]. *Geophys J Int*, **169**: 1239–1260.
- Bromirski P D, Gerstoft P. 2009. Dominant source regions of the Earth's "hum" are coastal[J]. *Geophys Res Lett*, **36**, L13303, doi:10.1029/2009GL038903.
- Dziewonski A, Bloch S, Landisman M. 1969. A technique for the analysis of transient seismic signals[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **59**(1): 427–444.
- Herrmann R B, Ammon C J. 2002. *Computer Programs in Seismology: Surface Waves, Receiver Functions and Crustal Structure*[M]. Missouri: Saint Louis Univ, Saint Louis, MO, USA.
- Levshin A L, Pisarenko V F, Pogrebinsky G A. 1972. On a frequency-time analysis of oscillations[J]. *Ann Geophys*, **28**(2): 211–218.
- Moschetti M P, Ritzwoller M H, Shapiro N M. 2007. Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh wave group velocity maps [J]. *Geochem Geophys Geosyst*, **8**(8), doi:10.1029/2007GC001655.
- 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.
- Snieder R. 2004. Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase[J]. *Phys Rev E*, **69**(4): 46610.
- Stehly L, Campillo M, Shapiro N M. 2006. A study of the seismic noise from its long range correlation properties[J]. *J Geophys Res*, **111**, B10306, doi:10.1029/2005JB004237.
- Vassallo M, Bobbio A, Iannaccone G. 2008. A comparison of sea-floor and on-land seismic ambient noise in the Campi Flegrei caldera, Southern Italy[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **98**(6): 2962–2974, doi:10.1785/0120070152.
- Wapenaar K. 2004. Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation[J]. *Phys Rev Lett*, **93**(25): 254301, doi:10.1103/PhysRevLett.93.254301.
- Wessel P, Smith W H F. 1991. Free software helps map and display data[J]. *Eos Trans AGU*, **72**(41): 445–446.
- Yang Y, Ritzwoller M H. 2008. Characteristics of ambient seismic noise as a source for surface wave tomography[J]. *Geochem Geophys Geosyst*, **9**(2): Q02008, doi:10.1029/2007GC001814.
- Young C J, Chael E P, Withers M W, Aster R C. 1996. A comparison of the high-frequency (>1 Hz) surface and sub-surface noise environment at three sites in the United States[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **86**(5): 1516–1528.

作者简介



张广伟 中国地震局地壳应力研究所。2008年吉林大学应用地球物理专业毕业，获学士学位；2011年中国地震局地壳应力研究所毕业，获理学硕士学位。现主要从事小震精定位等方面的研究工作。



苗庆杰 山东省地震局工程师。2008年中国科学技术大学地球物理学专业毕业，获理学学士学位。曾从事地震科研项目、地震学及工程地震研究。现主要从事地震波分析处理与应用方面的研究工作。
山东地震学会会员。



赵琳 中国地质科学院地质力学研究所。2008年中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院地球物理专业毕业，获学士学位；2011年中国地质科学院地质力学研究所固体地球物理学专业毕业，获硕士学位。现从事区域背景弹性波场方面的研究工作。



林向东 北京市地震局工程师，中国地震局地球物理研究所在读博士研究生。2003年云南大学毕业，获地球物理学学士学位；2009年中国地震局兰州地震研究所毕业，获固体地球物理硕士学位。曾从事地震预报电磁学科方面的研究工作。现主要从事数字地震学及综合预报研究工作。



尤红兵 中国地震灾害防御中心副研究员，一级注册地震安评师。2005年天津大学结构工程专业毕业，获博士学位。主要从事结构抗震，复杂介质中地震波传播理论，电气设备减隔震技术等相关领域的研究。



李志海 新疆维吾尔自治区地震局高级工程师。2004年中国地震局兰州地震研究所固体地球物理专业毕业，获硕士学位。一直从事数字地震学与地震活动性预测研究工作。美国地球物理学会(AGU)、新疆地震学会会员。