

基于三分量数据的云南地区背景噪声源分析*

张 演, 郑定昌, 林国良, 吕 帅

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 背景噪声特性及噪声源的分布逐渐成为深化背景噪声互相关研究的关键问题。基于2015—2016年云南地区48个固定数字地震台的连续三分量记录, 使用互相关计算提取台站对经验格林函数, 基于经验格林函数正负支信噪比特性, 结合海浪波高数据, 得到云南地区5~10 s, 10~20 s, 20~40 s台站对信噪比的方位分布和时间变化特征。结果表明: 云南地区三分量的噪声源优势方位在不同周期内均有差别, 5~10 s噪声源优势方位变化较稳定, 当海洋活动相对剧烈时, ZZ, RR分量比TT分量易受到影响; 10~20 s噪声源优势方位变化与海洋活动的季节性变化规律较一致, 1—6月ZZ, RR分量优势方位角指向E向和WS向, TT分量则以E向为主, 7—12月ZZ, RR分量优势方位角明显指向WS向, TT分量在7—9月指向WS向, 在10—12月则指向E向和WS向; 20~40 s内的噪声强度较小且随时间变化稳定。因此, 云南地区噪声能量源主要与北太平洋和孟加拉湾—安达曼海—北印度洋一带的活动有关。

关键词: 经验格林函数; 互相关; 信噪比; 噪声源; 海洋活动

中图分类号: P315.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2020)04-0689-12

0 引言

近年来, 背景噪声在地质学、地震工程、海洋声学等学科中得到广泛应用 (Shapiro *et al.*, 2005; Liu, 2014; Roux *et al.*, 2003; 蔡辉腾等, 2019)。特别是在地震学中, 利用互相关提取经验格林函数的面波层析成像方法被广泛应用于各个区域 (Shapiro *et al.*, 2004, 2005; Yao *et al.*, 2006; Lin *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2007, 2008; 房立华等, 2009; Saygin, Kennett, 2010; Zheng *et al.*, 2017)。随着利用背景噪声信号进行地球内部速度层析成像的研究越来越深入, 许多学者发现背景噪声源位置及产生机制的不确定性已成为获取高分辨率成像结果的障碍 (Tsai, 2009), 背景噪声源分布问题可能会影响格林函数和频散曲线计算的准确性 (Derode *et al.*, 2003)。因此, 越来越多的学者将研究重点转移到了噪声源的机制问题上 (Stehly *et al.*, 2006; Roux, 2009; Behr *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2018; Yang, Ritzwoller, 2008)。

目前, 主要的噪声源被认为是大气和海洋压力扰动引起的载荷, 且在不同周期噪声源的产生机理不尽相同 (Stehly *et al.*, 2006)。Kibblewhite (1985) 观测到新西兰西北岛沿大陆架与海岸线的地震信号与瞬时的波浪变化有很强的相关性; Longuet-Higgins (1950) 用海浪驻波解释海洋引起的地脉动现象, 认为周期范围为10~20 s的第一类地脉动是由海浪直接产生的, 周期范围为2~10 s的第二类地脉动是由海浪相互干涉形成海水驻波在海底产生压力而引起; Stehly等 (2006) 认为大于10 s的背景噪声源与深海活动明显相关, 其产生机制可能与更大周期背景噪声的产生机制类似, 即次重力波; Kiwamu (2017) 认为5~10 s的背景噪声源产生于远洋与近海岸, 归因于远洋和沿海地区海面驻波的非线性力, 10~20 s的背景噪声源位于浅海地区, 归因于大陆架周边地震波和涌浪的地形耦合; Yang等 (2008) 发现5~10 s和10~20 s背景噪声源主要是来自于近海岸线的海浪活动, 且信号的方位随季节变化。背景噪声源的分布是表征微震激发机制的关键, 特别是源的范围, 无论是在海岸线 (浅层) 还是在深海

* 收稿日期: 2019-03-18.

基金项目: 云南省地震局自立项目 (2017ZX01, 2018K06) 联合资助.

(深层) 都有助于理解其基于典型频率的物理机制 (Kiwamu, 2017)。

由于噪声源形成机制的复杂性以及水平向地震记录干扰较大, 从背景噪声中提取勒夫波的研究相对较少, 勒夫波的产生随着地理位置和传播方向的不同而不同 (Rind, Donn, 1979)。一些学者提出了勒夫波的生成机制: 例如二次微震中勒夫波是由瑞利波在源区和观测点之间的传播路径上转换而成 (Toksoz, Lacoss, 1968), 一次微震中勒夫波是由浅水区域浅滩倾斜测深产生的压力 (Hasselmann, 1963; Arduin *et al*, 2011) 和剪切引力 (Nishida *et al*, 2008; Saito, 2010; Fukao *et al*, 2010; Friedrich *et al*, 1998) 同时作用产生。随着研究的深入, 越来越多的学者利用背景噪声数据提取勒夫波进行层析成像 (付媛媛, 高原, 2016; 王力伟等, 2018; 房立华等, 2013; 郑定昌, 王俊, 2017; 谢石文等, 2018; 肖孟仁等, 2018), 少有学者对产生勒夫波的噪声源进行研究, 因此对比分析勒夫波和瑞利波源区的变化和分布显得尤为重要。

本文对云南地震台网三分量连续背景噪声数据进行互相关计算, 提取瑞利波和勒夫波的经验格林函数, 利用经验格林函数的非对称性, 分析不同周期背景噪声场中瑞利波和勒夫波信号源的方位分布和时间变化, 通过对比分析可以更好地了解云南地区面波噪声源的分布, 有助于合理布设台站、选择观测分量, 进一步优化利用云南地区面波信号进行层析成像等。

1 数据及处理

1.1 单台数据预处理

云南地震台网观测系统由宽频带地震计 (频带范围: 60 s ~ 50 Hz) 及甚宽频带地震计 (频带范围: 120 s ~ 50 Hz)、数据采集器、GPS 授时、数据传输等设备构成, 数据采样率为 100 Hz。本文主要选取 2015—2016 年云南地区 48 个宽频带数字地震台的连续三分量记录, 共组成 1 128 个台站对, 台站分布如图 1 所示。

互相关数据处理使用 SEIZMO 软件包, 软件包设计参考 Bensen 等 (2007) 及 Lin 等 (2008) 的

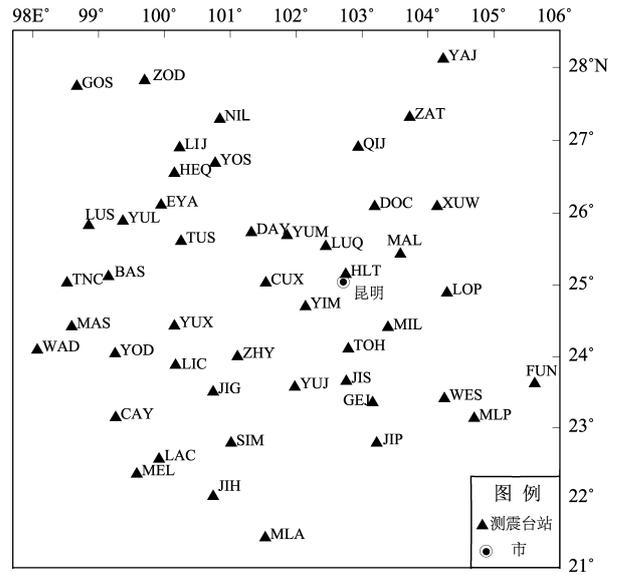


图 1 云南地震台网测震台站分布图

Fig. 1 Distribution of stations in the Yunnan Seismic Network

数据预处理方法, 主要包括以下步骤: ①以每个台站每天的连续记录为整体进行 5 Hz 重采样, 去仪器响应、去均值、去趋势处理, 以 0.01 ~ 2 Hz 进行带通滤波; ②将每天的连续记录截取为长度为 6 h 的数据单元, 进行 0.5 ~ 50 s 的带通滤波; ③使用滑动绝对方法进行时域归一化, 再进行谱白化处理, 提高背景噪声的信噪比, 为保持三分量相对振幅比, 将 EW, SN 分量同时进行谱白化处理, 即将 EW 向的频域振幅谱进行滑动平均得到平滑振幅谱, 再将 EW, SN 分量的频谱分别除以该平滑振幅谱 (Lin *et al*, 2008); ④通过台站对三分量的互相关函数 (EE , NN , EN , NE) 与台站间方位角 θ 和反方位角 φ 进行线性组合, 得到每个台站对的 TT , RR , TR , RT 分量的互相关函数为:

$$\begin{pmatrix} TT \\ RR \\ TR \\ RT \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos\theta\cos\varphi & \cos\theta\sin\varphi & -\sin\theta\sin\varphi \\ -\sin\theta\sin\varphi & -\sin\theta\cos\varphi & -\cos\theta\cos\varphi \\ -\cos\theta\sin\varphi & -\cos\theta\cos\varphi & \sin\theta\cos\varphi \\ -\sin\theta\cos\varphi & \sin\theta\sin\varphi & \cos\theta\sin\varphi \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} EE \\ EN \\ NN \\ NE \end{pmatrix} \quad (1)$$

垂向分量 ZZ 和径向分量 RR 代表瑞利波互相关函数；切向分量 TT 代表勒夫波互相关函数 (Lin *et al.*, 2008)，对于每个分量的互相关函数，保留了延时 $-5\ 000 \sim 5\ 000$ s 的数据。

通过对任意 2 个时间序列做互相关计算得到的正负 2 个分支，代表面波在两台站间沿相反方向传播。互相关函数正负支对应于介质经验格林函数的因果关系，如果背景噪声源完全随机分布，则正负支几乎是对称的。但在实际观测中，正负支的振幅存在巨大差异，主要取决于台站对连线两侧的稳相区域，在稳相区域之外的噪声源对提取格林函数的影响较小 (Snieder, Roel, 2004)。因此可通过对若干台站对间互相关函数的不对称性估算噪声能量流的主要方向从而估计噪声源的空间分布和时间变化 (Stehly *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2008)。图 2 为利用 LOP - TNC 台站对 2 年的连续背景噪声进行互相关叠加得到的经验格林函数，负支表示能量从 TNC 传播至 LOP，正支表示能量从 LOP 传播至 TNC。从图中可以看出， ZZ 和 RR 到时几乎一致，而 TT 与 RR 分量到时有明显差异，表示勒夫波比瑞利波传播速度更快，对比正负支的振幅大小可看出，由 LOP 传播至 TNC 方向的能量更大。

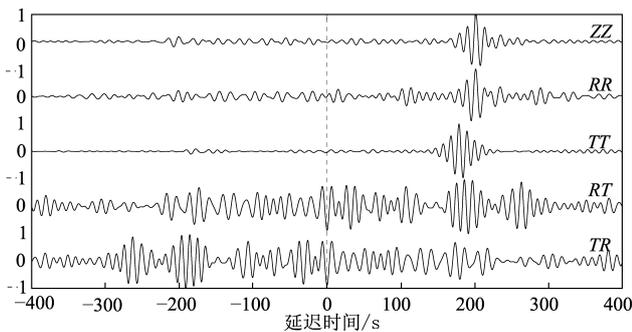


图 2 LOP - TNC 台站对 10 ~ 20 s 的经验格林函数

Fig. 2 The 10 ~ 20 s empirical Green's function of noise by LOP and TNC

1.2 信噪比计算

信噪比 (SNR) 是估计噪声源强度的工具，经验格林函数正负 2 个分支的信噪比分别表示噪声能量沿 2 个台站大圆弧路径上的相反方向传播，不同方向上信噪比较大的表示沿这个方向传播的噪声能量更强，结合云南地震台网内所有台站对的

信噪比和方位角，可估算云南地区噪声能量流的方向 (Stehly *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2008)。信噪比定义为信号窗口内振幅绝对值的最大值和后续噪声窗口内数据的均方根之比，信号窗定义为群速度为 $2.2 \sim 5$ km/s 的信号到时之间的窗口，噪声窗定义为经验格林函数在 $1\ 000 \sim 1\ 500$ s 的时间序列 (房立华等, 2009)。

2 结果分析

2.1 经验格林函数的非对称性

本文分不同周期研究了 1 128 个台站对路径上的经验格林函数变化，以其中 2 条台站对路径为例进行了分析。图 3 是 SN 向 MEL - ZOD 台站对 2 年相同月份分别叠加得到的经验格林函数，蓝色曲线表示 2 年叠加的经验格林函数，其中正支表示能量由 MEL 传播至 ZOD，负支表示能量由 ZOD 传播至 MEL。三分量 (ZZ , RR , TT) 正支的振幅明显大于负支的振幅，表明在 $5 \sim 10$ s, $10 \sim 20$ s, $20 \sim 40$ s 内，能量由 MEL 传播至 ZOD 方向强于 ZOD 至 MEL 方向，即噪声能量由南向传播至北向。图 4 中负支表示能量由 MIL 传播至 MAS，正支表示能量由 MAS 传播至 MIL。在 $5 \sim 10$ s, $10 \sim 20$ s, $20 \sim 40$ s，能量由 MIL 传播至 MAS 方向强于 MAS 至 MIL 方向，即噪声能量由东向传播至西向。

2.2 噪声源方位变化

为系统对比云南地区三分量噪声源方位，本文主要分 5 个时段 (2015—2016 年、2 年的 1—3 月共 6 个月、2 年的 4—6 月共 6 个月、2 年的 7—9 月共 6 个月、2 年的 10—12 月共 6 个月) 分别作出云南地震台网所有台站对 $5 \sim 10$ s, $10 \sim 20$ s, $20 \sim 40$ s 周期的噪声信噪比方位分布图 (图 5 ~ 9)，图中极径指向噪声能量到达的方向，极径大小表示 10° 范围内信噪比的平均。在没有做信号几何衰减矫正的情况下，为突显噪声能量优势来源方向和减少台站间距对格林函数恢复的影响，剔除信噪比小于 10、台站间距为 2 ~ 15 倍波长的台站对。图 5 是所有台站对 2 年的经验格林函数正负方向信噪比的方位分布图。从图中可见， $5 \sim 10$ s，三分量噪声源的优势方向为近 90° (以正 N 向为 0°)，即 E 向，其中 TT 分量的噪声源优势方向更显著， RR 分量优势方位角范围更大。 $10 \sim 20$ s, ZZ , RR

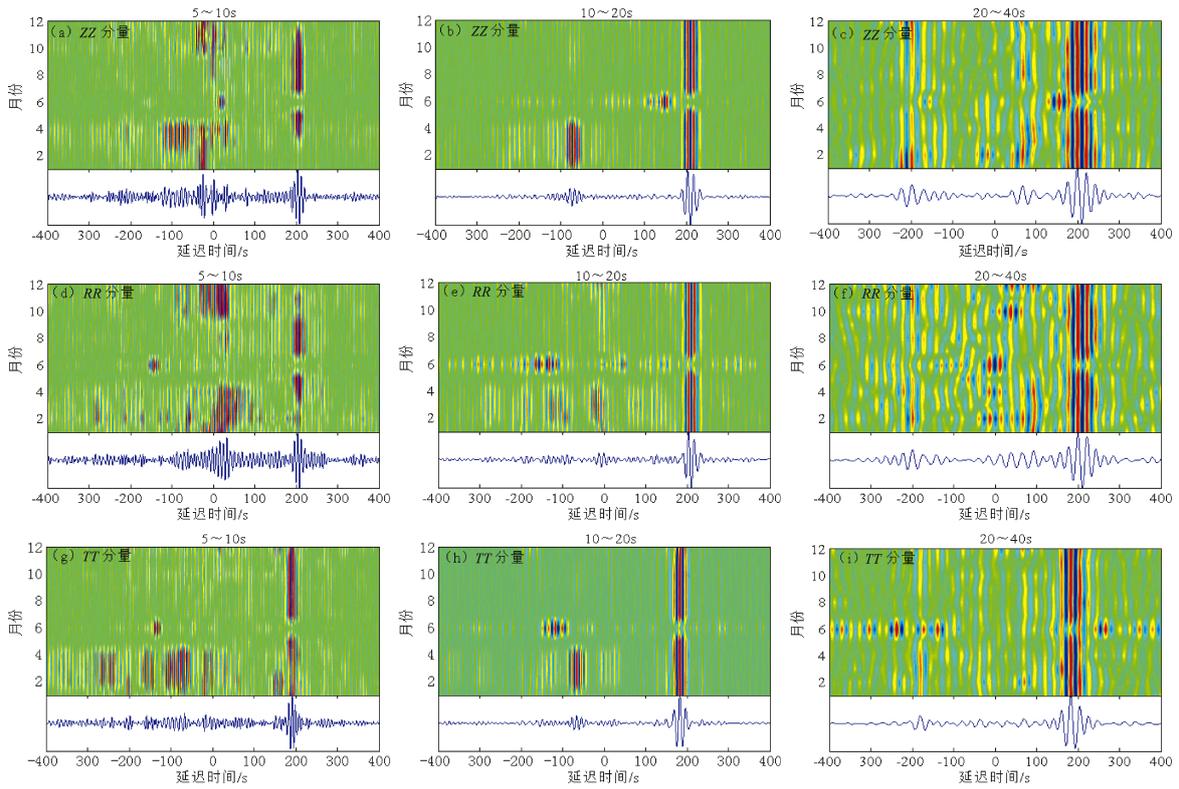


图3 MEL - ZOD 台站对 2015—2016 年每月叠加的三分量经验格林函数

Fig. 3 The empirical Green's function of three-component recorded on MEL and ZOD of two years (2015—2016) and stacked month per month

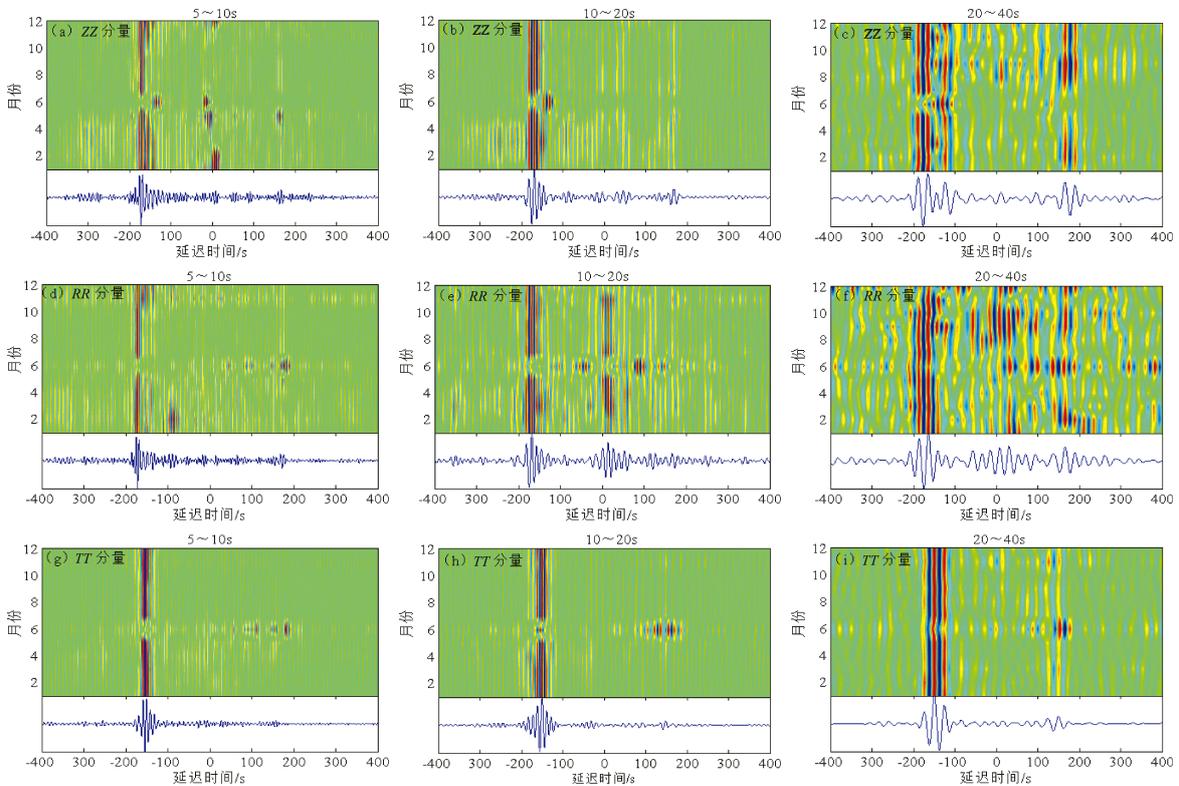


图4 MAS - MIL 台站对 2015—2016 年每月叠加的三分量经验格林函数

Fig. 4 The empirical Green's function of three-component recorded on MAS and MIL of two years (2015—2016) and stacked month per month

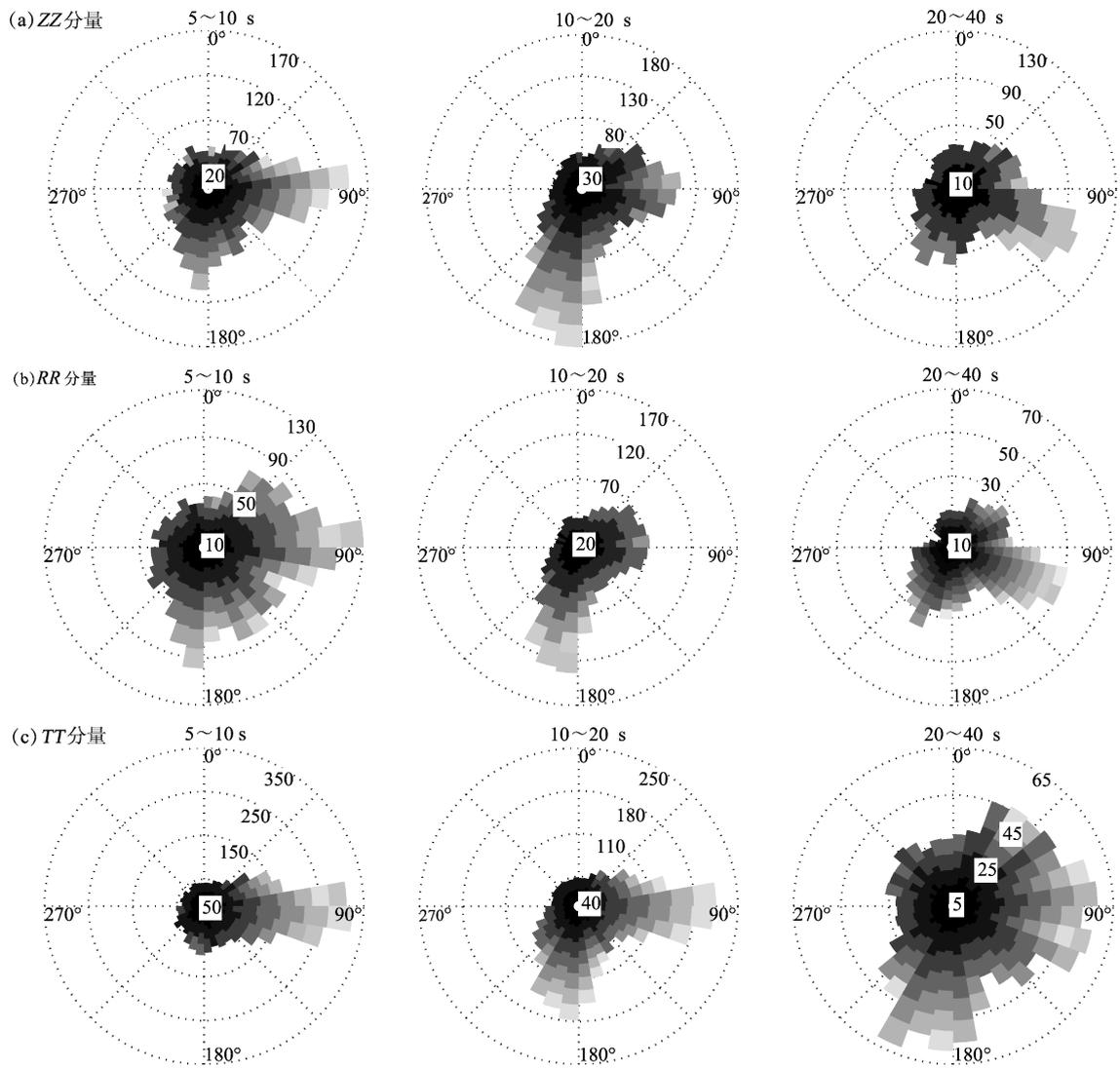


图 5 2015—2016 年不同周期三分量信噪比方位图

Fig. 5 Azimuthal distribution of SNR of three-components in the different periods from 2015 to 2016

分量较明显的优势方位角为 $170^{\circ} \sim 210^{\circ}$ ，即 WS 向，而 TT 分量优势方位角为 $70^{\circ} \sim 110^{\circ}$ ，即 E 向。20 ~ 40 s， ZZ ， RR 分量噪声源优势方位为 $90^{\circ} \sim 140^{\circ}$ ， $180^{\circ} \sim 220^{\circ}$ ，其中 ES 向更为显著，而 TT 分量噪声源优势方向不明显，广泛分布在 $20^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ， $160^{\circ} \sim 220^{\circ}$ （表 1）。

从图 6 ~ 9 及表 1 可看出，5 ~ 10 s 三分量噪声能量优势方位角在 1—6 月，10—12 月显著指向 E 向， RR 分量优势方位角分布范围较大，7—9 月 ZZ ， RR 分量指向 WS 向， TT 分量指向 E 向和 WS 向。10 ~ 20 s 三分量噪声能量有 2 个优势方位角，且优势能量区的强度随时间变化明显，其中 ZZ ， RR 分量的优势方位角分布在 $20^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ， $170^{\circ} \sim$

220° ，7—12 月指向 $170^{\circ} \sim 210^{\circ}$ 更显著； TT 分量在 1—6 月仍然指向 $70^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ，在 7—9 月优势方位角指向 $170^{\circ} \sim 210^{\circ}$ 。20 ~ 40 s 三分量的噪声能量优势方位角随时间变化稳定。在 4 个时段中， ZZ ， RR 分量的噪声能量优势方位角基本一致， TT 分量较其它两个分量随时间变化更稳定。3 个周期内三分量的噪声源主要来自于 E 向、ES 向、WS 向，分别指向印度洋、太平洋和南海方向。

在 5 ~ 10 s，10 ~ 20 s，勒夫波的信噪比值高于瑞利波的，尤其在 5 ~ 10 s 显示勒夫波的能量更强，这可能与 2 种波形的震源机制或波形传播辐射模式相关 (Juretzek, 2016)，也可能是由于在该周期内受到非相干局部噪声的干扰较小 (Lin *et al*, 2008)。

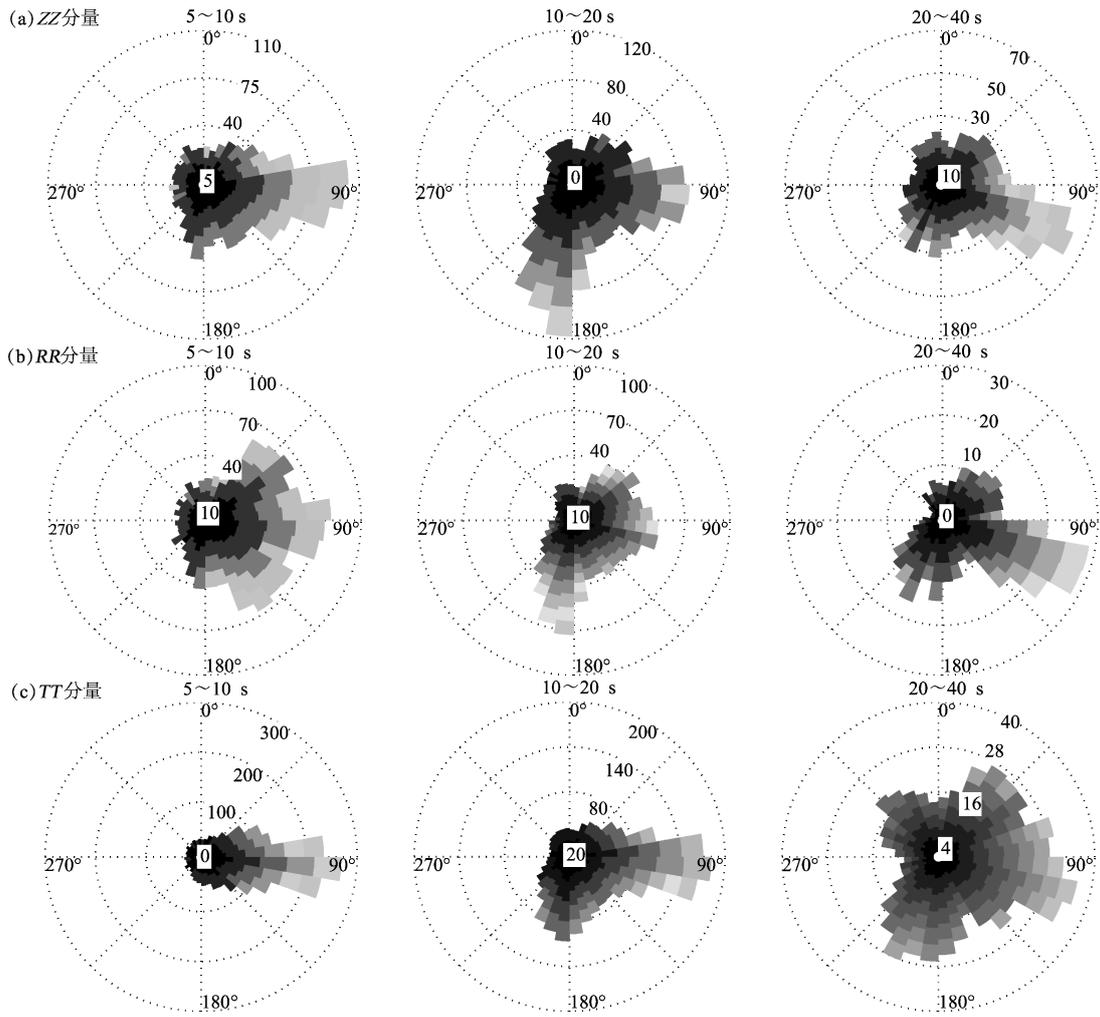
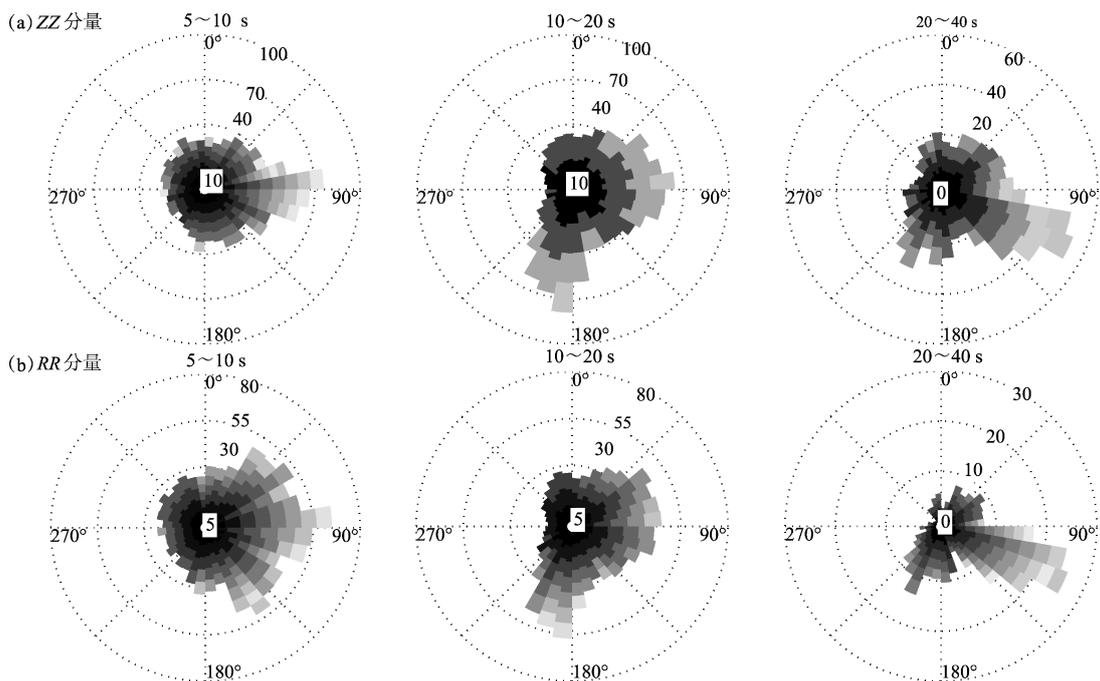


图 6 2 年的 1—3 月不同周期三分量信噪比方位图

Fig. 6 Azimuthal distribution of SNR of three-components, in the different periods on Jan. - Mar in two years



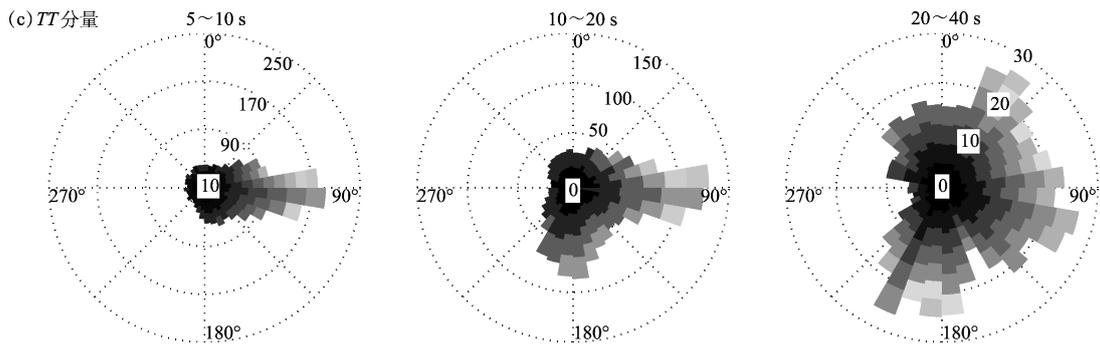


图 7 2 年的 4—6 月不同周期三分量信噪比方位图

Fig. 7 Azimuthal distribution of SNR of three-components in the different periods on Apr. - Jun. in two years

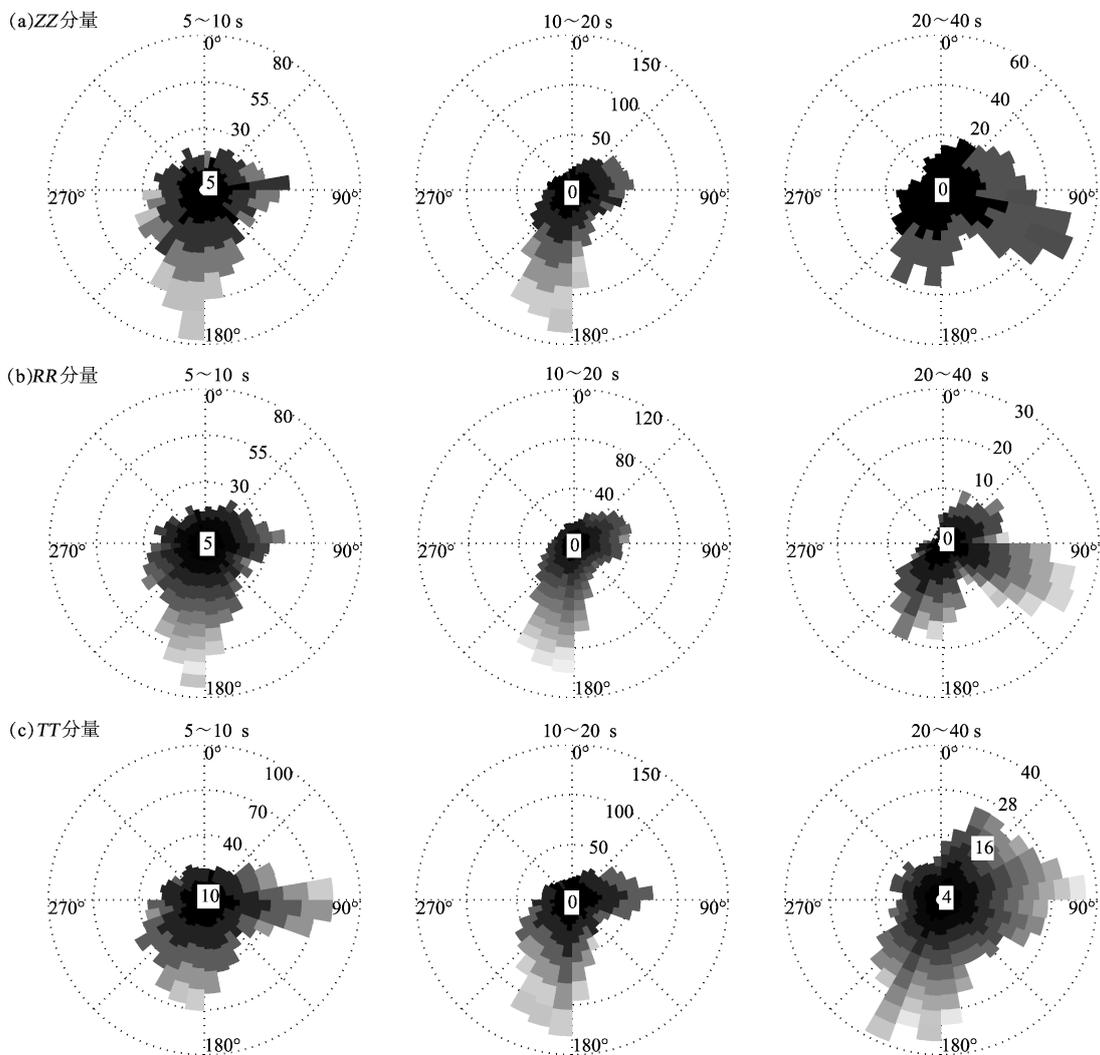


图 8 2 年的 7—9 月不同周期三分量信噪比方位图

Fig. 8 Azimuthal distribution of SNR of three-components in the different periods on Jul. - Sep. in two years

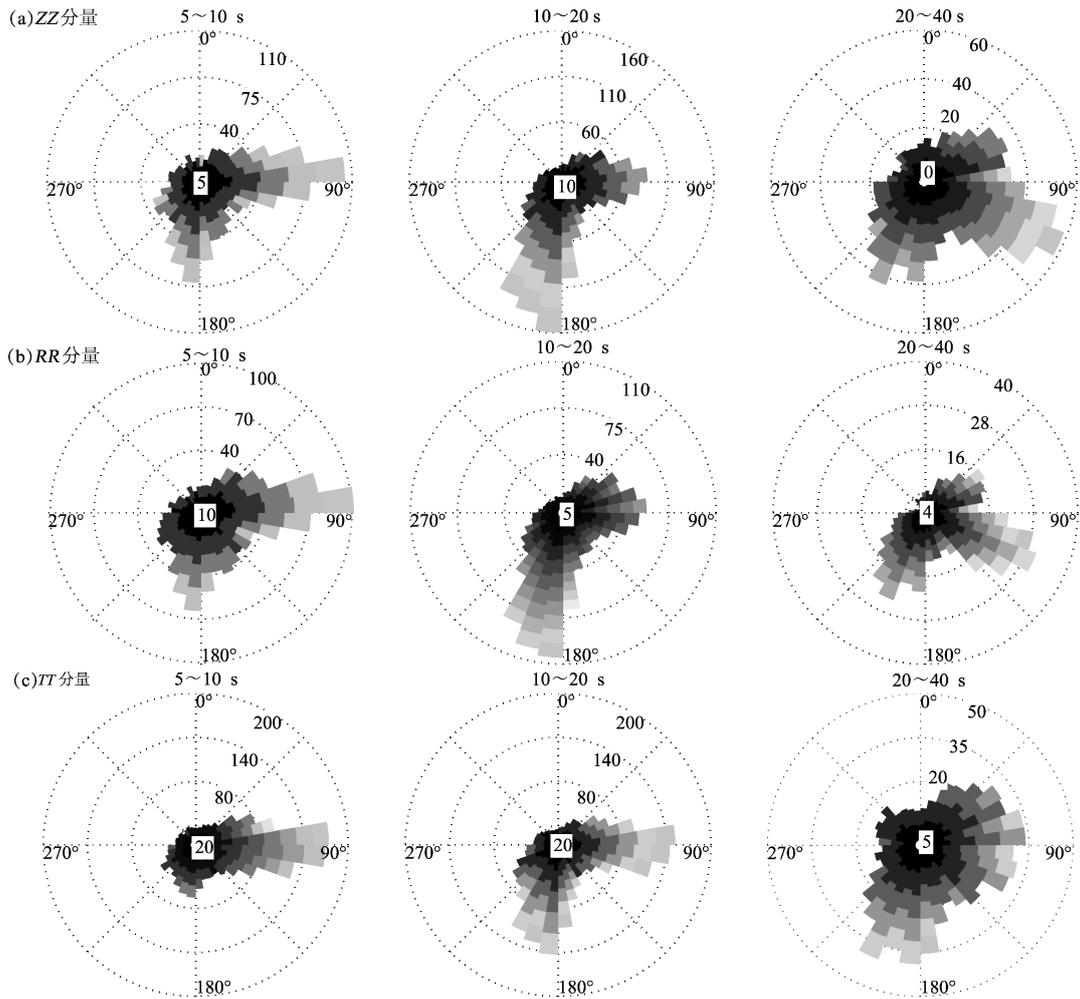


图 9 2 年的 10—12 月不同周期三分量信噪比方位图

Fig. 9 Azimuthal distribution of SNR of three-components in the different periods on Oct. - Dec. in two years

表 1 5 ~ 10 s, 10 ~ 20 s, 20 ~ 40 s 周期三分量的噪声信噪比优势方位角

Tab. 1 The principal azimuthal of SNR of three - component in the periods of 5 ~ 10 s, 10 ~ 20 s, 20 ~ 40 s

时间	分量	5 ~ 10 s	10 ~ 20 s	20 ~ 40 s
2015—2016 年	ZZ	70° ~ 110°, 170° ~ 190°	70° ~ 110°, 170° ~ 210°	90° ~ 140°, 180° ~ 220°
	RR	30° ~ 140°, 150° ~ 210°	170° ~ 210°	90° ~ 140°, 180° ~ 220°
	TT	80° ~ 110°	70° ~ 110°, 170° ~ 210°	20° ~ 120°, 160° ~ 220°
2 年的 1—3 月	ZZ	70° ~ 130°	70° ~ 130°, 170° ~ 210°	90° ~ 150°
	RR	30° ~ 160°	20° ~ 120°, 170° ~ 210°	90° ~ 140°, 180° ~ 230°
	TT	70° ~ 110°	70° ~ 120°, 170° ~ 200°	20° ~ 140°, 160° ~ 210°
2 年的 4—6 月	ZZ	70° ~ 110°	50° ~ 110°, 170° ~ 210°	90° ~ 140°, 170° ~ 220°
	RR	30° ~ 160°	50° ~ 110°, 170° ~ 210°	90° ~ 140°, 170° ~ 210°
	TT	80° ~ 110°	70° ~ 120°, 160° ~ 210°	20° ~ 150°, 160° ~ 220°
2 年的 7—9 月	ZZ	160° ~ 210°	170° ~ 220°	90° ~ 140°, 160° ~ 220°
	RR	170° ~ 210°	170° ~ 210°	90° ~ 140°, 160° ~ 220°
	TT	80° ~ 110°, 170° ~ 210°	50° ~ 110°, 170° ~ 210°	20° ~ 120°, 160° ~ 220°
2 年的 10—12 月	ZZ	60° ~ 110°, 170° ~ 210°	70° ~ 110°, 170° ~ 210°	50° ~ 140°, 170° ~ 220°
	RR	70° ~ 110°, 170° ~ 200°	50° ~ 110°, 170° ~ 210°	90° ~ 140°, 180° ~ 220°
	TT	70° ~ 110°	70° ~ 110°, 170° ~ 210°	20° ~ 140°, 160° ~ 220°

2.3 背景噪声源与海洋活动的关系分析

很多研究者认为全球各地持续观察到的微震现象与海浪和固体地球的耦合作用相关，尽管受到周期、地形、衰减等多种因素的影响，但从平均效应来看，噪声能量正相关于海浪的压力 (Ardhuin *et al*, 2011; Gualtieri *et al*, 2013)。英国海洋学家 Longuet Higgins (1950) 提出海浪波动非线性干涉理论，用海浪驻波解释海洋引起的地脉动现象，该理论模型不断被进一步确认和完善 (Hasselmann, 1963; Tanimoto, 2006, 2007; Kedar *et al*, 2008)。海浪波高与微震时空特征有因果关系 (Gerstoft, Tanimoto, 2007; Koper, de Foy

2008; Euler *et al*, 2014)。Wang 等 (2018) 利用中国西南台阵连续垂直分量研究 P 波和 PP 波的源位置，在海浪平均有效波高和海面压力这两类数据中观察到了相似的特征，即在存在波高高的地方，表面压力也很强。本文使用 2015—2016 年海洋波浪高度的数据作为获得噪声源位置的附加约束，数据来源于 The National Oceanic and Atmospheric Administration^①。由于 2015 年与 2016 年海洋活动相似，仅以 2016 年的海洋海浪每月的有效平均波高数据为例 (图 10)。从图 10 可看出，全球海洋的有效波高分布具有明显的季节变化，北半球的有效波高秋冬季比春夏季大，南半球的有效

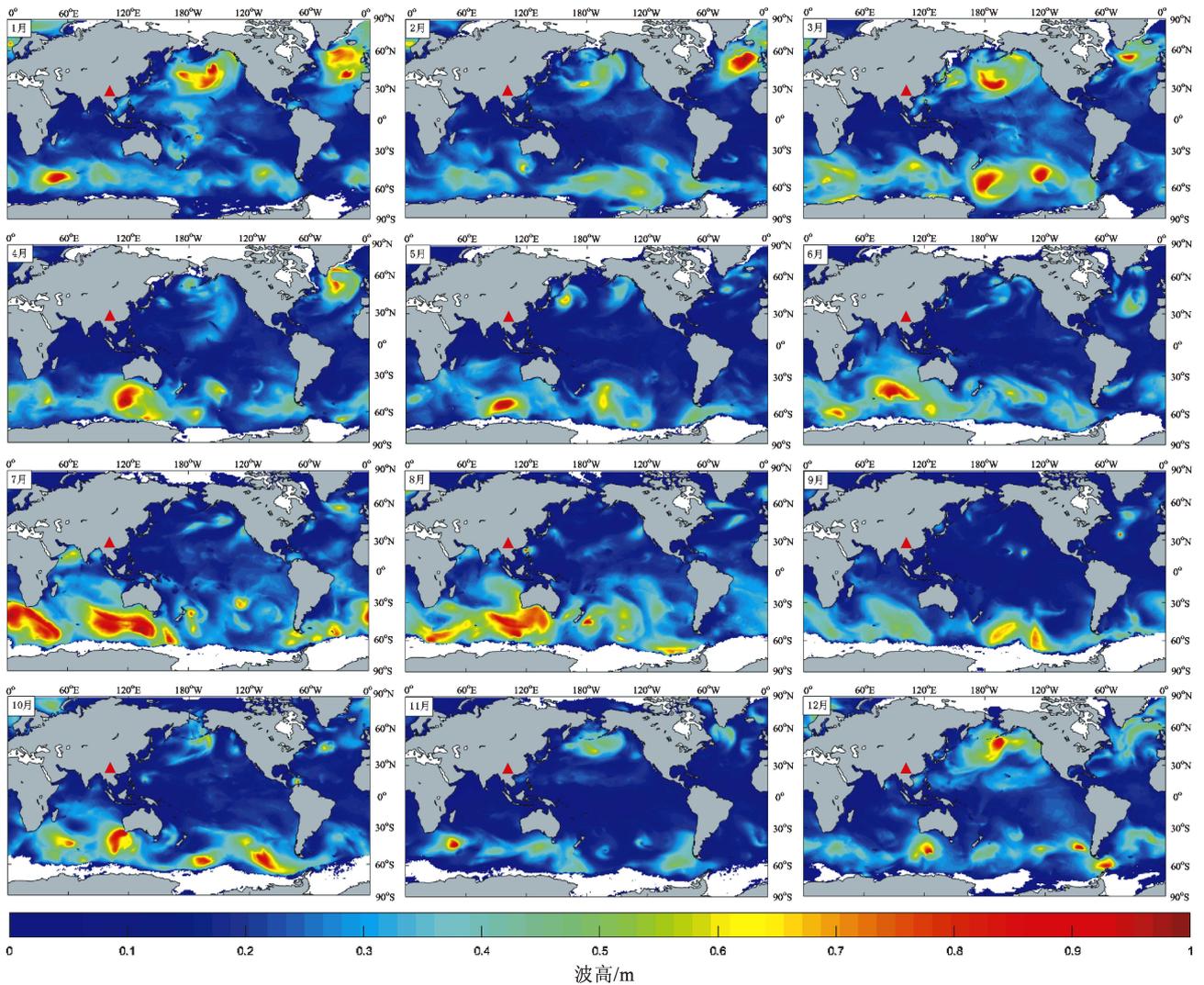


图 10 2016 年每月海浪平均波高

Fig. 10 Averaged significant wave heights from ocean wave of 2016

① ftp: //ftp. ifremer. fr/ifremer/ww3/HINDCAST/SISMO/.

波高春夏季比秋冬季大。中国东南部毗邻西北太平洋,西南方向为北印度洋,距离大西洋和北冰洋较远,云南位于中国的西南地区(图 10 中红色实心三角形表示云南地震台网)。

结合上述三分量噪声能量优势方位角随时间变化的分析,7—9 月印度洋活动明显增强时,5~10 s,10~20 s 三分量优势方位指向孟加拉湾—安达曼海—北印度洋。当印度洋活动稍有减弱,北太平洋活动开始增强时,5~10 s 三分量优势方位主要指向北太平洋方向,10~20 s 三分量则主要指向北太平洋和孟加拉湾—安达曼海—北印度洋,而 ZZ , RR 分量以孟加拉湾—安达曼海—北印度洋方向更明显。因此可看出 ZZ , RR 分量更容易受到海洋活动的影响,特别是在海洋活动明显增强的时候,噪声源优势方向明显指向海洋活动增强的方向。

3 结论

本文分析了云南地区背景噪声中三分量的时间变化特征,并结合全球海洋海浪每月的有效平均波高数据,分析研究云南地区背景噪声源,得到以下结论:

(1) ZZ , RR 分量的噪声能量源主要与北太平洋和孟加拉湾—安达曼海—北印度洋的活动有关,在 5~10 s 噪声能量优势方位均指向北太平洋,只有在 7—9 月印度洋一带活动明显增强时指向该方向。在 10~20 s 噪声能量强度的优势方位随时间变化,1—6 月 ZZ , RR 分量优势方位角指向北太平洋和印度洋一带,7—12 月明显指向印度洋一带,全年噪声源指向孟加拉湾—安达曼海—北印度洋方向更明显。

(2) TT 分量较 ZZ , RR 分量更稳定,尤其在 5~10 s 随时间变化较稳定,以指向北太平洋为主。在 10~20 s 随时间变化,1—6 月噪声源优势方向以指向北太平洋为主,7—9 月指向孟加拉湾—安达曼海—北印度洋方向,10—12 月指向北太平洋和孟加拉湾—安达曼海—北印度洋方向。

(3) 云南地区背景噪声主要受海洋活动影响。5~10 s 的噪声源主要是来自北太平洋方向,可能受到近海岸和大洋深水区的海浪波动的影响。10~20 s 的噪声源主要来自北太平洋和孟加拉湾—安达

曼海—北印度洋 2 个方向,可能起源于近海岸海浪与地形耦合产生,主要沿海岸线分布。20~40 s 的噪声源主要指向北部湾—南海一带,强度较小,且随时间变化稳定,这与 Yang 等 (2008) 认为大于 20 s 的微震信号强度几乎不随季节变化结论相似。

背景噪声的海洋激发机制比较复杂,波浪压力扰动在水体与陆地的传播机制以及海岸与海浪之间能量传递与耦合机制等研究的缺失制约着背景噪声的激发过程、源区及特性的研究。基于前期一些学者关于背景噪声源的研究,北大西洋、印度洋和太平洋是云南地区背景噪声主要的影响因素,本文采用的方法所得到的结果没有发现北大西洋的影响,可能与台站布局和处理精细度有关系,下一步将结合全球多个地震台网以及海面压力的数据,利用 FK 方法或聚束方法等处理方法,进一步深化区域背景噪声源的特性及激发机制。

本文使用了 SEIZMO 软件包以及从 NOAA 网站上下下载的海洋波高的数据,云南省地震局测震台网为本研究提供地震波形数据,在此深表谢意。

参考文献:

- 蔡辉腾,陈颢,金星,等. 2019. 福建地区环境噪声特性研究[J]. 地震研究,42(1):64-71.
- 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.
- 房立华,吴建平,王未来,等. 2013. 华北地区勒夫波噪声层析成像研究[J]. 地球物理学报,56(7):2268-2279.
- 付媛媛,高原. 2016. 东北地区背景噪声的 Rayleigh 和 Love 波相速度层析成像[J]. 地球物理学报,59(2):494-503.
- 王力伟,吴国瑞,黄柳芳. 2018. CAP 方法反演新丰江锡场地区 $M_{1.4}$ 级以上地震震源机制解[J]. 华南地震,38(3):1-8.
- 肖孟仁,罗丽,曾文敬. 2018. 赣北及其邻区地震重新定位及 P 波速度结构研究[J]. 华南地震,38(3):15-24.
- 谢石文,黄显良,杨波,等. 2018. 基于不同方法、地壳速度模型的地震定位研究及其在安徽地区的应用[J]. 华南地震,38(1):95-100.
- 郑定昌,王俊. 2017. 基于背景噪声的川滇地区勒夫波层析成像[J]. 地震学报,39(5):633-647.
- Ardhuin F, Stutzmann E, Schimmel M, et al. 2011. Ocean wave sources of seismic noise[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 116(9):C006952.
- Behr Y, Townend J, Bowen M, et al. 2013. Source directionality of ambient seismic noise inferred from three-component beamforming[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 118(1):240-248.

- 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]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 169(3): 1239 – 1260.
- Derode A, Larose E, Tanter M, *et al.* 2003. Recovering the Green's Function from field correlations in an open scattering medium(L) [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 113(6): 2973 – 2976.
- Euler G G, Wiens D A, Nyblade A A. 2014. Evidence for Bathymetric control on the distribution of body wave microseism sources from temporary seismic arrays in africa[J]. *Geophysical Journal International*, 197: 1869 – 1883.
- Friedrich A, Kruger F, Klinge K. 1998. Ocean-generated microseismic noise located with the Grafenberg Array[J]. *Journal of Seismology*, 2(1): 47 – 64.
- Fukao Y, Nishida K, Kobayashi N. 2010. Seafloor topograph, oceaninfragravity waves, and background Love and Rayleigh waves[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 115(B4): B04302.
- Gerstoft P, Tanimoto T. 2007. A year of microseisms in Southern California [J]. *Geophysical Research Letters*, 34(34): 102 – 120.
- Gualtieri L, Stutzmann E, Capdeville F, *et al.* 2013. Modelling secondary microseismic noise by normal mode summation [J]. *Geophysical Journal International*, 193(3): 1732 – 1745.
- Hasselmann K. 1963. A statistical analysis of the generation of microseisms[J]. *Rev Geophys*, 1(2): 177 – 210.
- Kedar S, Longuet-Higgins M, Webb F, *et al.* 2008. The origin of deep ocean microseisms in the North Atlantic Ocean[J]. *Proc R Soc A*, 464(2091): 777 – 793.
- Kiwamu N. 2017. Ambient seismic wave field[J]. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 93(7): 423 – 448.
- Koper K D, de Foy B. 2008. Seasonal anisotropy in short-period seismic noise recorded in South Aisa[J]. *Bull Seism Soc Am*, 98(6): 3033 – 3045.
- Lin F, Moschetti M P, Ritzwoller M H. 2008. Surfacewave tomography of the Western United States from ambient seismic noise; Rayleigh and Love wave phase velocity maps [J]. *Geophys J Int*, 8(8): 1525 – 2027.
- Liu L B, Chen Q F, Wang W J. 2014. Ambient noise as the new source for urban engineering seismology and earthquake engineering; A case study from Beijing metropolitan area [J]. *Earthquake Science*, 27(1): 89 – 100.
- Longuet Higgins M S. 1950. A theory of the origin of microseisms[J]. *Phil trans roy soc ser*, 243(243): 1 – 35.
- Nishida K, Kawakatsu H, Fukao Y, *et al.* 2008. Background Love and Rayleigh waves simultaneously generated at the Pacific Ocean Floors [J]. *Geophysical Research Letters*, 35(16): L16307.
- Rind D, Down W L. 1979. Rayleigh wave and Love wave characteristics and the geologic control of propagation [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 84(B10): 5632 – 5642.
- Roux P, Kuperman W A, Group T N. 2003. Extracting coherent wave fronts from acoustic ambient noise in the Ocean [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116(4): 1995 – 2003.
- Roux P. 2009. Passive seismic imaging with directive ambient noise: application to surface waves and the San Andreas Fault in Parkfield, CA [J]. *Geophysical Journal International*, 179(1): 367 – 373.
- Saito T. 2010. Love-wave excitation due to the interaction between a propagating ocean wave and the sea-bottom topography [J]. *Geophysical Journal International*, 182(3): 1515 – 1523.
- Saygin E, Kennett B L N. 2010. Ambient seismic noise tomography of Australian Continent [J]. *Tectonophysics*, 481(1–4): 116 – 125.
- 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.
- Shapiro N M, Campillo M. 2004. Emergence of broadband rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise [J]. *Geophysical Research Letters*, 31: L07614.
- Snieder, Roel. 2004. Extracting the Green's Function from the correlation of coda Waves: a derivation based on stationary phase [J]. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 69(4): 046610.
- Stehly L, Campillo M, Shapiro N M. 2006. A study of the seismic noise from its long-range correlation properties [J]. *Journal of Geophysical Research*, 111: B10306.
- Tanimoto T. 2006. Excitation of normal modes by nonlinear interaction of ocean waves [J]. *Geophysical Journal International*, 168(2): 571 – 582.
- Tanimoto T. 2007. Excitation of microseisms [J]. *Geophysical Research Letters*, 34(5): 247 – 260.
- Toksoz M N, Lacos R T. 1968. Microseism: mode structure and sources [J]. *Science*, 159(3817): 872 – 873.
- Tsai V C. 2009. On establishing the accuracy of noise tomography travel – time measurements in a realistic medium [J]. *Geophysical Journal International*, 178(3): 1555 – 1564.
- Wang W, Gerstoft P, Wang B. 2018. Seasonality of P wave microseisms from NCF based beam forming using ChinArray [J]. *Geophysical Journal International*, 213(3): 1832 – 1848.
- Yang Y, Ritzwoller M H, Levshin A L, *et al.* 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 168(1): 259 – 274.
- Yang Y, Ritzwoller M H. 2008. Characteristics of ambient seismic noise as a source for surface wave tomography [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9(2): 1525 – 2027.
- Yao H, Hilst R D V D, Hoop M V D. 2006. Surfacewave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis – I. phase velocity maps [J], 166(2): 732 – 744.
- Zheng D C, Saygin E, Cummins P, *et al.* 2017. Transdimensional bayesian seismic ambient noise tomography across SE Tibet [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 134: 86 – 93.

Analysis on Ambient Noise Origin in Yunnan Area Based on Three-Component Data

ZHANG Yan, ZHENG Dingchang, LIN Guoliang, LYU Shuai
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

The characteristics of ambient noise and the distribution of the ambient noise origin have gradually become the key issues to deepen the research in the empirical Green's function. Based on the three-component continuous record of 48 seismic stations in Yunnan area from 2015 to 2016, we extracted the empirical Green's function of stations by using cross-correlation calculation. Based on the characteristics of the signal-to-noise (SNR) ratio of the positive and negative branches of the cross-correlation function, combined with the wave height data, we obtained the azimuthal distribution and time variation characteristics of SNR of stations between 5 ~ 10 s, 10 ~ 20 s, 20 ~ 40 s in Yunnan area. The results show that the principal azimuth of the ambient noise origin of three-component in Yunnan area are different in different periods. For the 5 ~ 10 s band, it is relatively stable. When the ocean activity is relatively intense, the *ZZ* and *RR* components are easier to be affected than the *TT* components. For the 10 ~ 20 s band, it is consistent with the seasonal variability of the ocean activities. The principal azimuths of *ZZ* and *RR* components points to E and WS direction from Jan. to Jun. , while that of *TT* component mainly points to E direction. The principal azimuths of *ZZ* and *RR* components point to WS from Jul. to Dec. , while that of *TT* component points to WS from Jul. to Dec. , E and WS direction from Oct. to Dec. For the 20 ~ 40 s band, the noise intensity is smaller and stable with time. Therefore, the ambient noise origin in Yunnan area is likely to be related to the activities of North Pacific Ocean and Bengal Bay – Andaman Sea – North Indian Ocean.

Keywords: empirical Green's function; cross – correlation; SNR; the ambient noise origin; ocean activity