

方益志, 薛梅. 2021. 大西洋中北部双频微地动特征. 地震学报, 43(2): 204-214. doi: 10.11939/jass.20200103.
Fang Y Z, Xue M. 2021. Characteristics of double-frequency microseisms in the central and northern Atlantic Ocean.
Acta Seismologica Sinica, 43(2): 204-214. doi: 10.11939/jass.20200103.

大西洋中北部双频微地动特征^{*}

方益志 薛 梅[†]

(中国上海 200092 同济大学海洋与地球科学学院)

摘要 本文对大西洋中北部两侧五个地震台站 2015 年记录到的地震数据进行处理, 计算噪声功率谱密度和概率密度函数, 并通过极化分析对双频微地动不同周期的主导源区方位角分布进行了分析。研究结果显示: 大西洋中北部台站双频微地动发生显著分裂, 各台站的峰值周期各不同, 且来自相同方向和不同方向的双频微地动都有可能产生双频微地动分裂; 大西洋中北部的噪声功率谱密度随季节变化复杂, 部分台站冬季的功率谱密度振幅比夏季强, 部分台站夏季的比冬季强; 而大西洋中北部台站源区方位受季节影响不大, 台站主要源区的方位不变, 且两季的源区方位角在大范围内重合; 大西洋东岸中北部台站, 夏季受台站以南大西洋源区影响更多, 冬季受台站以北大西洋源区影响更多; 靠近加勒比海位于大西洋西岸的台站, 其双频微地动源区方向在冬季和夏季都更多地指向加勒比海; 大西洋西岸纬度最低的台站 MPG, 其双频微地动在冬季主要受台站以北大西洋源区的影响, 而在夏季则同时受到台站以北大西洋源区和台站西南方位很可能源于太平洋源区的共同影响。

关键词 双频微地动 大西洋中北部 功率谱密度 概率密度函数 极化分析

doi: 10.11939/jass.20200103 **中图分类号:** P315.3[†] **文献标识码:** A

Characteristics of double-frequency microseisms in the central and northern Atlantic Ocean

Fang Yizhi Xue Mei[†]

(School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The splittings of double-frequency microseisms have been observed from the published spectra of microseisms at the seismic stations on both sides of the Atlantic Ocean. However, the splitting mechanism has not been investigated yet. In this paper, the seismic data of the year 2015 recorded by five seismic stations located on both sides of the central and northern Atlantic Ocean are processed. We calculate power spectral density of the ambient noise and obtain corresponding probability density function. And we also perform polarization analysis to study the distribution of azimuth of main source regions at the periods of double-frequency microseisms. The results show that significant splittings of the double-frequency microseisms are observed at the five stations located on both sides of the central and northern Atlantic

* 基金项目 国家自然科学基金面上项目(42076064)和上海佘山地球物理国家野外科学观测研究站开放基金(2020K03)共同资助。

收稿日期 2020-06-23 收到初稿, 2020-11-06 决定采用修改稿。

† 通信作者 e-mail: meixue@tongji.edu.cn



Ocean, the peak periods observed at each station were different and the source regions from the same direction and different directions are both capable of generating the splitting of double-frequency microseisms. The power spectral density (PSD) of microseisms in the central and northern Atlantic Ocean varies with seasons. Some stations have stronger PSD amplitudes in winter than in summer, and the others have stronger amplitudes in summer than in winter. The main source region directions of the central and northern Atlantic stations are not affected by seasons. Therefore the main source region directions remains almost the same in winter and summer, and the source region directions of the two seasons overlap in a wide range. For the stations located on the east coast of the central and north Atlantic Ocean, the main sources of the double frequency microseisms are more from the Atlantic Ocean to the south of the stations in summer, and more from the Atlantic Ocean to the north of the stations in winter. For the stations nearby the Caribbean Sea on the west coast of the Atlantic Ocean, the source directions of the double-frequency microseisms mostly point to the Caribbean Sea in both winter and summer. For the station MPG located at the lowest latitude in this study, the double-frequency microseisms mainly come from the Atlantic Ocean to the north of the stations in winter, while it has additional sources from the southwest directions in summer, probably from the Pacific Ocean.

Key words: double-frequency microseisms; central and northern Atlantic Ocean; power spectral density; probability density function; polarization analysis

引言

地震台站上可以观察到两种类型的背景噪声, 即单频微地动和双频微地动。单频微地动由海浪直接作用于海底, 以地震波的形式传播, 其周期与海浪周期相近, 当微地动被地震台站接收后, 在频谱图上显示为 10—25 s 周期出现的峰值(Hasselmann, 1963; Haubrich, McCamy, 1969; Bromirski, Duennebier, 2002); 双频微地动则由两列频率相近、传播方向相反的海浪相互干涉产生的驻波作用于海底而产生的周期为 2—10 s 的微地动(Longuet-Higgins, 1950; Bromirski *et al.*, 1999; Bromirski, 2001; Koper, Burlacu, 2015)。驻波是两种波浪的耦合, 能量随深度衰减很小, 因此在深海也能激发双频微地动。此外, 当台风形成时, 随着台风中心的移动, 不同时刻可产生周期相近或相同但方向不同的波浪, 其中传播方向相反的波浪相互干涉形成驻波, 这类驻波也可产生双频微地动(郑露露等, 2017)。

双频微地动有时会分裂为两个峰, 即周期约为 4—10 s 的长周期双频微地动和周期约为 2—4 s 的短周期双频微地动(Bromirski *et al.*, 2005; Sun *et al.*, 2013; Koper, Burlacu, 2015), 其中长周期双频微地动可能的源区有海岸(Bromirski *et al.*, 2005; Stehly *et al.*, 2006; Tanimoto *et al.*, 2006; Bromirski, 2009)或开放大洋(Obrebski *et al.*, 2012), 短周期微地动可能由台站附近的重力波非线性作用所激发(Bromirski *et al.*, 2005)。但不同源区激发的特定频率的双频微地动相互叠加也会造成双频微地动的分裂(Koper, Burlacu, 2015)。目前对微地动分裂的机理仍然不清楚。

微地动特征与全球海水高度相关的特性受季节影响(Xiao *et al.*, 2018a), 此外还会受到附近海域和地形的影响, 且不同的区域又具有不同的特征(Bromirski, Duennebier, 2002)。Stutzmann 等(2009)通过处理全球 27 个地震台站 2006 年的全年数据, 得到了南北半球微地动与季节相关的结果。从该结果中可以观察到靠近大西洋中部的台站 MPG 及邻近太平洋的台

站 HDC 的双频微地动分裂特征明显, 然而该文并未涉及分裂机理, 相关的研究后期也未见深入。

鉴于此, 本文拟选取靠近大西洋中北部两侧的五个地震台站 PFVI, MBO, FDF, HDC 和 MPG, 计算其功率谱密度和概率密度函数并对其进行极化分析, 进一步揭示大西洋中北部的双频微地动特征、微地动分裂机制以及微地动源区的季节性变化, 为后期的海陆相互作用研究提供可靠的信息。

1 数据与方法

本文选取分布在大西洋中北部两侧的五个台站 PFVI, MBO, FDF, HDC 和 MPG (图 1), 从地震学联合研究会 (Incorporated Research Institutions for Seismology, 缩写为 IRIS) 下载了这五个台站 2015 年全年的地震数据。下面将利用功率谱密度、概率密度函数和极化分析, 分析大西洋中北部双频微地动特征、分裂情况和源区方位角。

1.1 功率谱密度和概率密度函数

量化地震背景噪声的标准方法是计算噪声功率谱密度。本文主要参照 McNamara 和 Buland (2014) 的处理流程得到功率谱密度, 并将结果换算成 dB 为单位, 以便于与 Peterson (1993) 提出的全球新高噪声模型 (new high noise model, 缩写为 NHNM) 和新低噪声模型 (new low noise model, 缩写为 NLNM) 进行对比; 最后统计各周期的功率谱密度, 在一年内取某一数值的概率, 构建全年的概率密度函数。

1.2 极化分析

三分量地震数据的极化分析已经发展得非常成熟 (Park *et al.*, 1987; Bataille, Chiu, 1991; Koper, Hawley, 2010; Koper, Burlacu, 2015)。本文参照 Koper 和 Hawley (2010) 的处理流程, 可以得到极化度 β^2 和四个角量 θ_H , θ_V , ϕ_{HH} , ϕ_{VH} , 其中: 极化度 β^2 由 Samson (1983) 定义, 表征噪声的极化程度; θ_H 为极化方位角, 为最大特征值对应的主特征向量的水平方位角, 指向微地动主导源区; θ_V 为极化倾角, 代表纵波入射的方向; ϕ_{HH} 为两水平分量的相位差; ϕ_{VH} 为主水平分量与垂直分量之间的夹角 (Koper, Hawley, 2010)。在这里, 我们主要关注极化方位角 θ_H , 以求取双频微地动主导源区的方位角。

需要说明的是, 本文进行极化分析的频率范围为 0.01—10 Hz (周期范围为 0.1—100 s), 涵盖本文研究的双频微地动频率范围 0.1—0.5 Hz 或对应周期 2—10 s。

2 噪声功率谱密度的季节性变化和概率密度函数的分裂特征

2.1 噪声功率谱密度的季节性变化

图 2 给出了本文选择的 5 个地震台站 2015 年全年的噪声功率谱密度的演化过程, 可见功率谱密度幅值随季节的变化与纬度之间的复杂关系, 功率谱密度特征从高纬度到低纬度

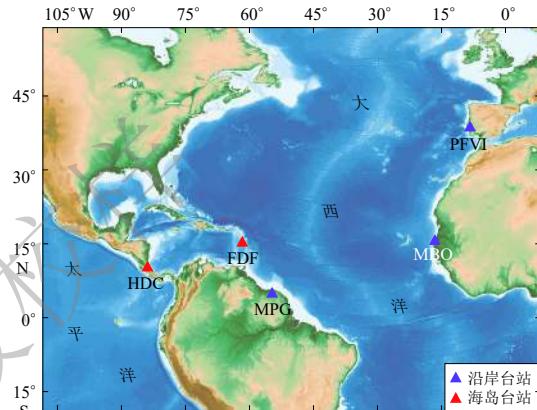


图 1 本文所用台站分布

Fig. 1 Distribution of the stations used in this study

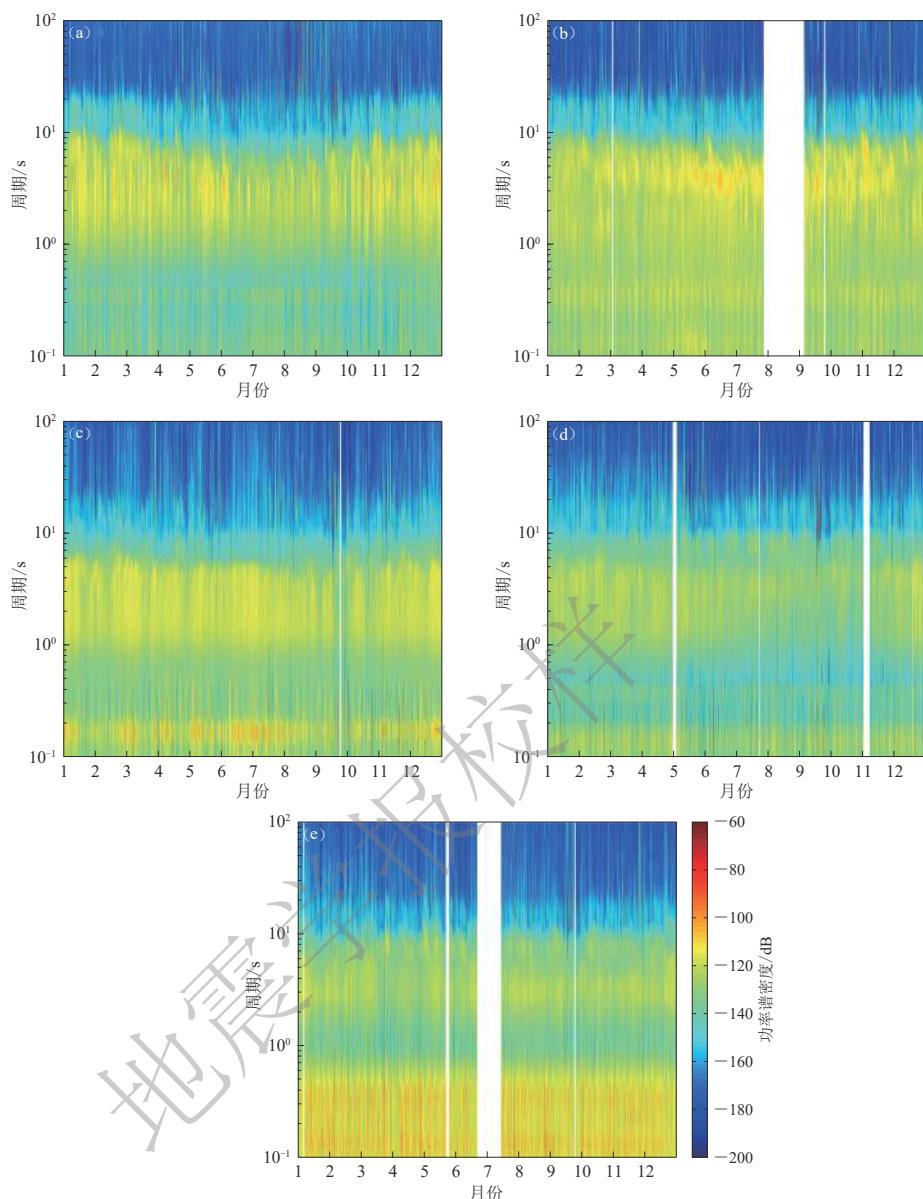


图 2 台站 PFVI (a), MBO (b), FDF (c), MPG (d) 和 HDC (e) 2015 年背景噪声的功率谱密度图(空白部分表示地震数据空缺)

Fig. 2 Power spectral density of ambient noise for the stations PFVI (a), MBO (b), FDF (c), MPG (d), and HDC (e) in the year 2015 (Blank part represents the absence of seismic data)

具体表现为: 位于大西洋东岸的台站 PFVI 地处较高纬度, 其功率谱密度呈冬季(12月—2月)能量更强、夏季(6月—8月)能量较弱(图 2a); 位于大西洋东岸的台站 MBO 所处纬度稍低, 其功率谱密度则表现为冬季(12月—2月)能量较弱, 而夏季(6月—7月)能量更强(图 2b); 然而与 MBO 台站处于相近纬度、位于大西洋西岸的台站 FDF, 其全年的功率谱密度大致呈均匀分布, 分布周期为 2—8 s(图 2c); 位于台站 FDF 更南端、靠近赤道的台站

MPG 与 FDF 一样位于大西洋西岸, 其全年功率谱密度周期与台站 FDF 也同样分布在 2—8 s, 但其噪声功率谱密度表现出更强的季节变化, 即冬季(12 月—2 月)能量更强、夏季(6 月—8 月)能量较弱(图 2d); 与台站 FDF 纬度相近但位于加勒比海西侧另一边、毗邻太平洋的台站 HDC, 其全年的功率谱密度也大致呈均匀分布, 分布周期为 2—10 s(图 2e).

Stutzmann 等(2009)的研究结果显示北半球纬度较高地区的微地动振幅在 12—2 月更大, 6—8 月更小, 而靠近赤道区域的微地动振幅全年变化稳定, 本文在台站 PFVI, FDF 和 HDC 观测到的功率谱密度随季节的变化与该结果一致, 但有两个台站的观测与预期相反: 其一为台站 MBO, 虽然其纬度与 HDC 和 FDF 大致相当, 但该台站的微地动能量冬季强而夏季弱; 其二为台站 MPG, 虽然相对于 HDC 和 FDF 该台站更接近赤道, 但其能量却随季节变化明显, 冬季(12 月—2 月)能量更强, 夏季(6 月—7 月)能量较弱, 原因尚待进一步分析.

双频微地动的分裂指的是双频微地动频段内出现了两个峰值, 在功率谱密度图上呈现为两个水平条带, 由图 2 可见: 台站 PFVI 和 MBO 在 12—2 月均出现两个峰值, 两个峰值分别出现在周期 2—6 s 和 6—10 s 范围内, 且台站 MBO 的两个峰值更明显(图 2b); 台站 HDC 和 MPG 的噪声频谱也发生了分裂, 其中台站 MPG 在 2—6 s 和 6—10 s 周期范围内各出现一个峰值(图 2d), 台站 HDC 在 2—5 s 和 5—10 s 周期范围内各出现一个峰值(图 2e).

2.2 噪声概率密度函数分裂特征

噪声概率密度函数能够表征台站全年的地震信号特征, 同时也能更清晰地展示双频微地动的分裂情况(Mcnamara, Boaz, 2006). 图 3 给出了 2015 年这五个地震台站所记录到的背景噪声的概率密度函数, 可以看出台站 PFVI, MBO, MPG 和 HDC 均出现了明显的双峰情况: 台站 PFVI 的双峰分布在 2—4 s 和 4—10 s 周期范围内, 两个峰值分别出现在 3 s 和 7 s 左右(图 3a); 台站 MBO 的双峰分布在 2—4 s 和 4—10 s 周期范围内, 在周期 3 s 和 6 s 左右分别出现峰值(图 3b); 台站 MPG 的双峰分布在 2—6 s 和 6—10 s 周期范围内, 在周期 4 s 和 8 s 分别出现峰值(图 3d); 台站 HDC 双峰出现在 2—6 s 和 6—10 s 周期范围内, 在周期 3 s 和 8 s 左右出现峰值(图 3e), 这表明在大部分台站上均可观测到双频微地动的显著分裂现象. 至于唯一未观测到双频微地动分裂的台站 FDF, 其能量大体均匀分布在 2—8 s 周期内, 与全年的功率谱密度对应(图 2c 和图 3c). 由图 3 也可知本文观测到双频微地动分裂的周期范围接近于已有研究(Bromirski *et al.*, 2005; Sun *et al.*, 2013; Koper, Burlacu, 2015)观测到的双频微地动的分裂周期.

3 双频微地动分裂机理探究

为探究大西洋中北部双频微地动分裂的机理, 需要确定双频微地动的源区方位. 这里采用 Koper 和 Hawley (2010) 的处理流程, 分别计算这五个地震台站 2015 年的双频微地动源区方位角 θ_H , 如图 4 所示. 这里需要注意的是, 当地震波引起的质点振动为强椭圆极化时, θ_H 存在 180° 翻转的可能性(Xiao *et al.*, 2018b).

由图 4 可见, 无论海岛台站还是沿岸台站, 其双频微地动主导源区的方位角随周期变化明显: 台站 PFVI 的双频微地动在 3—4 s 及 5—6 s 周期内的源区方位角主要集中在 270°—330°, 而在周期 2—3 s, 4—5 s 和 6—10 s 内的源区方位角集中在 140°—210°(图 4a); 台站 MBO 的双频微地动主导源区的主要周期为 4—7 s, 源区方位角处于 0°±30° 的范围(图 4b); 台站 FDF 的双频微地动在 2—10 s 周期内的源区方位角主要集中于 170°—220° 范围, 其中双

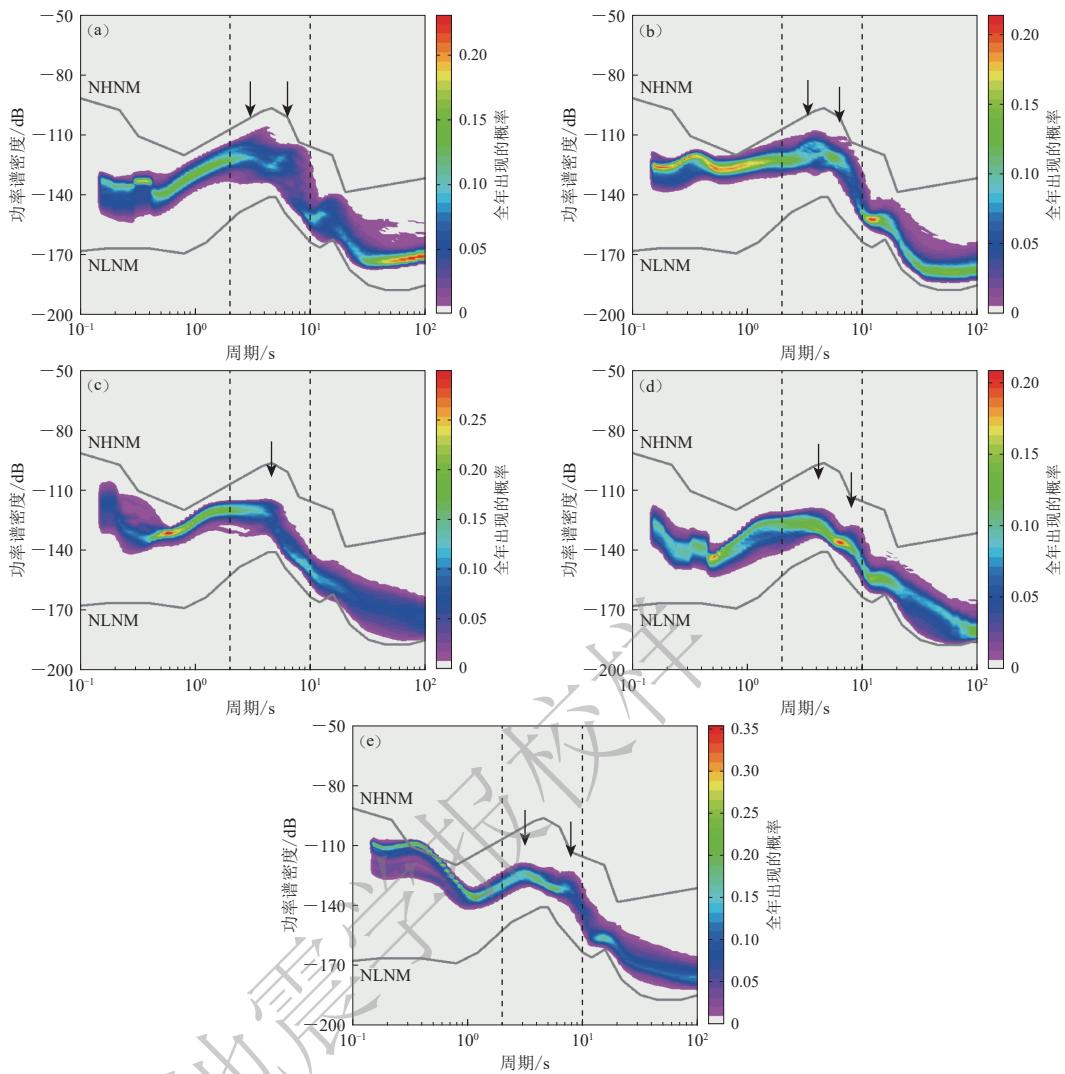


图 3 台站 PFVI (a), MBO (b), FDF (c), MPG (d) 和 HDC (e) 2015 年背景噪声的概率密度函数 PDF (箭头代表双频微地动的峰值)

Fig. 3 Probability density functions (PDF) of ambient noise for the stations PFVI (a), MBO (b), FDF (c), MPG (d), and HDC (e) in 2015. The arrows indicate the peak of double-frequency microseisms

频微地动在 4—7 s 周期内还有部分源区方位角处于 $0^\circ \pm 30^\circ$ 的范围(图 4c); 台站 MPG 的双频微地动在 2—7 s 周期内的源区方位角处于 $0^\circ \pm 30^\circ$ 范围内, 在 7—10 s 周期内的源区方位角处于 210° — 240° 范围内(图 4d); 台站 HDC 在 2—3 s, 4—5 s 和 7—10 s 周期的双频微地动主要来源于 100° — 180° 范围的方位角, 其中 3—4 s 和 5—6 s 周期的源区方位角在 0° — 360° 均有分布(图 4e)。这说明在大西洋中北部及其西侧相邻的加勒比海, 不同台站双频微地动的周期及其源区方位角均有变化, 即使同一台站观测到的双频微地动的源区也有变化, 这意味着双频微地动的分裂很有可能是由不同源区的双频微地动叠加而成。

相同方位的源区有可能造成双频微地动的分裂。以下将根据功率谱密度和概率密度函

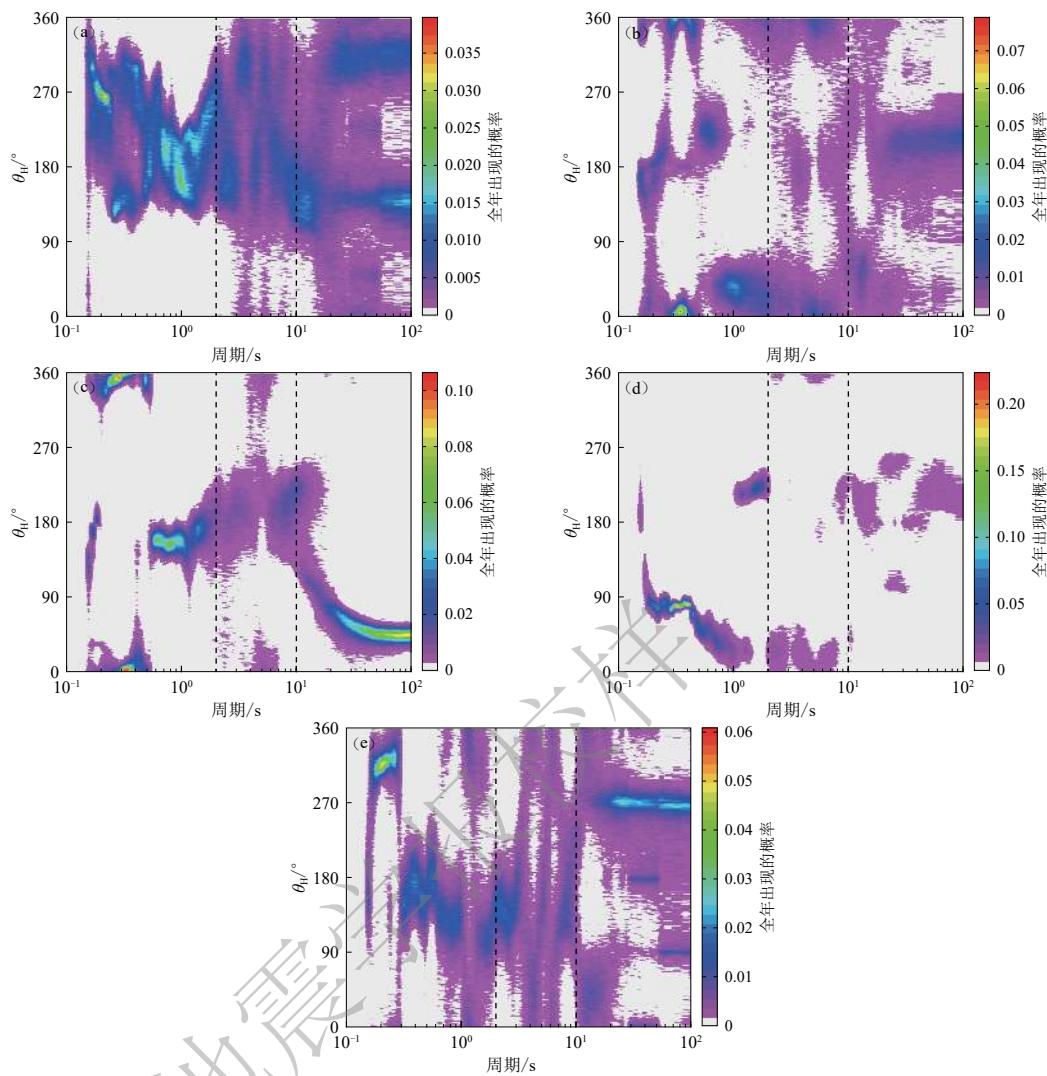


图 4 台站 PFVI (a), MBO (b), FDF (c), MPG (d) 和 HDC (e) 2015 年双频微地动的源区方位角 θ_H 分布图

两条竖虚线给出了周期 2 s 与 10 s 之间的双频微地动范围, θ_H 从正北顺时针旋转计数

Fig. 4 Distribution of source azimuth θ_H for double-frequency microseisms at the stations PFVI (a), MBO (b), FDF (c), MPG (d), and HDC (e) in 2015

The two vertical dashed lines indicate the range of double-frequency microseisms between period 2 s and 10 s, and θ_H is counted clockwise from the north

数所确定的峰值对大西洋中北部双频微地动峰值的源区方位角进行判断。例如台站 MBO 双频微地动在周期 2—6 s 和 6—10 s 出现峰值, 发生了分裂(图 3b), 且两个周期范围的主导源区方位角均在 $0^\circ \pm 30^\circ$ 的范围(图 4b)。这里需要注意的是, 同一方位的源区有可能是同一源区, 也有可能是不同源区。

不同方位的源区可能造成双频微地动的分裂。例如台站 MPG 的双峰分布在 2—6 s 和 6—10 s 周期范围内, 在 4 s 和 8 s 分别出现峰值(图 3d), 两个峰值的源区方位角不同, 其中周

期范围为 2—7 s 的双频微地动主要来源于 $0^\circ \pm 30^\circ$ 方位角范围, 周期为 7—10 s 的微地动主要来源于 210° — 240° 方位角范围(图 4d).

相同方位角的主导源区与不同方位角的源区同时作用可产生不同周期的微地动, 即双频微地动的分裂. 例如: 台站 PFVI 的两个峰值分别出现在 2—6 s 和 6—10 s 周期(图 3a), 其中 2—6 s 峰值双频微地动的主导源区方位角分别位于 270° — 330° 和 140° — 210° 范围, 而 6—10 s 源区方位角主要集中在 140° — 210° (图 4a); 台站 HDC 双频微地动双峰也出现在 2—6 s 和 6—10 s 周期范围内, 分别在 3 s 和 8 s 周期左右出现峰值(图 3e), 其中 2—3 s, 4—5 s 和 7—10 s 源区方位角均主要处于 100° — 180° , 3—4 s 和 5—6 s 源区方位角在 0° — 360° 均有分布(图 4e).

但是, 相同方位角的源区亦或不同方位角的源区同时作用时, 虽然产生不同周期的微地动, 但未必会观测到明显的双频微地动分裂, 如台站 FDF, 其能量大体均匀分布在 2—8 s 周期内, 未观测到双频微地动分裂(图 2a, 3a), 这个周期范围内的源区方位角主要为 170° — 220° , 也有小部分为 $0^\circ \pm 30^\circ$ (图 4c).

4 噪声源区的季节性变化

由上述可知大西洋中北部微地动噪声功率谱密度会随季节而变化(图 2), 但这里主要探究季节对于大西洋中北部双频微地动噪声源的影响, 因此频带选择范围需对应于双频微地动出现的周期 2—10 s, 即频率 0.1—0.5 Hz. 图 5 给出了大西洋中北部五个地震台站在 2015 年冬季和夏季双频微地动频段的噪声源区方位角 θ_H 的变化. 图中台站 PFVI, FDF 和 MPG 分别选取 1 月份和 7 月份的数据代表冬季和夏季; 台站 MBO 由于七八月份数据空缺, 选取 1 月份和 6 月份数据代表冬季和夏季; 台站 HDC 由于六七月份数据空缺, 选取 1 月份和 8 月份数据来分别代表冬季和夏季.

由图 5 可以看出, 夏季和冬季大西洋中北部台站双频微地动噪声的主要源区涵盖较大的方位展布, 且夏季与冬季的源区方位角分布有较大部分重叠. 台站 PFVI 夏季和冬季双频微地动源区的方位角类似, 源区主要为台站以南的大西洋中部和南部, 少数为台站以北大西洋区域, 而在冬季来自台站以北大西洋的源区所占比例增大(图 5a). 台站 MBO 夏季和冬季双频微地动源区主要来自台站以北的大西洋, 少数来自台站以南的大西洋(图 5b). 台站 FDF 冬夏两个季节的源区均来自于台站西南, 很可能来自于位于台站西南方位的加勒比海和大西洋(图 5c). 台站 MPG 冬季的双频微地动源区主要来自台站以北的大西洋, 而夏季有两个主导源区: 台站东北方位的大西洋和台站西南方位的太平洋(图 5d). 台站 HDC 夏季和冬季的双频微地动源区在各方向均有展布, 但主导方位角指向台站东南, 对应于加勒比海, 其它方位的来自于太平洋和大西洋(图 5e).

由上述分析可见, 大西洋东岸中北部台站的双频微地动在夏季受台站以南大西洋源区影响更多, 冬季受台站以北大西洋源区的影响更多或者这部分比例有所增加, 如台站 PFVI 和 MBO (图 5a, b). 位于大西洋西岸、靠近加勒比海的台站 FDF 以及与其处于相近纬度、紧邻加勒比海和太平洋的台站 HDC, 其源区在冬季和夏季均指向加勒比海(图 5c 和 5e). 而位于大西洋西岸纬度最低的台站 MPG, 其冬季主要受台站以北大西洋源区的影响, 夏季则同时受到台站以北大西洋源区的影响和台站西南方位很可能来源于太平洋源区的影响(图 5d).

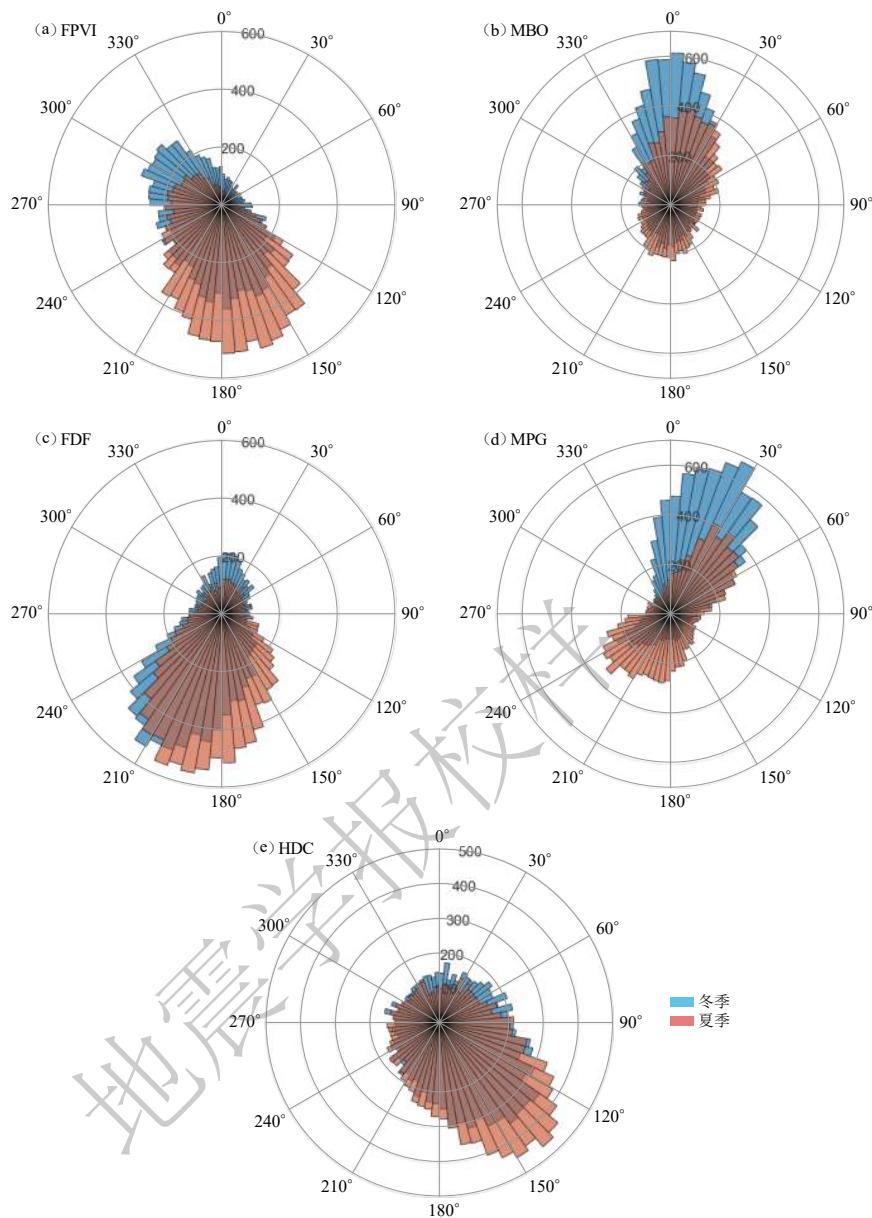


图 5 台站 PFVI (a), MBO (b), FDF (c), MPG (d) 和 HDC (e) 2015 年双频微地动源区方位角 θ_H 的季节变化图(圆圈上的数字表示方位角数据的个数)

Fig. 5 Seasonal variations of source azimuth θ_H for double-frequency microseisms at the stations PFVI (a), MBO (b), FDF (c), MPG (d), and HDC (e) in 2015 where the numbers on the circles denote the number of azimuth data

5 结论

本文通过处理大西洋中北部两侧五个地震台站 2015 年全年的地震数据, 绘制全年功率谱密度和概率密度函数, 并通过极化分析对双频微地动频段内不同周期主导源区的方位角

分布进行了分析, 得出的主要结论如下:

1) 大西洋中北部两侧台站的双频微地动功率谱密度随季节的变化规律不一致。在纬度较高地区的一些台站, 其双频微地动冬季振幅较大, 夏季振幅较小, 在靠近赤道区域的一些台站, 其双频微地动振幅全年稳定。在本文中台站 MBO 观测到的双频微地动能量为冬季强而夏季弱, 台站 MPG 虽然靠近赤道, 但其能量却随季节变化明显, 冬季能量更强, 夏季能量较弱。

2) 大西洋中北部台站的双频微地动分裂现象明显, 从功率谱密度和概率密度函数来看均有很明显的双峰特征, 且峰值的主导源区方位角分布结果表明处于相同方位角和不同方位角的源区都有可能造成双频微地动的分裂。

3) 大西洋中北部两侧台站双频微地动的主导源区方位角随季节变化的情况不一, 大部分台站的双频微地动的主要源区方位角在夏季和冬季变化不大, 且两季的源区方位角呈大范围的重合。对大西洋东岸中北部台站的双频微地动而言, 其夏季受台站以南大西洋源区的影响更多, 冬季受台站以北大西洋源区的影响更多或者这部分比例有所增加。对大西洋西岸靠近加勒比海的台站而言, 其双频微地动源区的方位角在冬季和夏季均更多地指向加勒比海, 而位于大西洋西岸纬度最低的台站, 其双频微地动冬季主要受台站以北大西洋的源区影响, 夏季则同时受到台站以北大西洋的影响和台站西南方位很可能来源于太平洋源区的影响。

需要说明的是, 在功率谱密度图上双频微地动很可能呈现为三峰或四峰。由于目前没有量化双频微地动峰值, 故深入探讨有一定困难。大西洋中北部多个台站的双频微地动分裂明显, 推及全球范围的双频微地动分裂情况如何, 需要扩大数据范围来进行研究。此外, 在大西洋中北部两侧观测到的微地动强度随季节的变化与纬度的关系并非呈预期的单调关系, 原因也有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 郑露露, 林建民, 倪四道, 祝捍皓, 郑红. 2017. 台风激发的第二类地脉动特征及激发模式分析[J]. 地球物理学报, **60**(1): 187–197.
- Zheng L L, Lin J M, Ni S D, Zhu H H, Zheng H. 2017. Characteristics and generation mechanisms of double frequency microseisms generated by typhoons[J]. *Chineses Journal of Geophysics*, **60**(1): 187–197 (in Chinese).
- Bataille K, Chiu J M. 1991. Polarization analysis of high-frequency, three-component seismic data[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **81**(2): 622–642.
- Bromirski P D. 2001. Vibrations from the “Perfect Storm” [J]. *Geochem Geophys Geosyst*, **2**(7): 1030.
- Bromirski P D, Duennebier F K. 2002. The near-coastal microseism spectrum: Spatial and temporal wave climate relationships[J]. *J Geophys Res*, **107**(B8): ESE 5–1–ESE 5–20.
- Bromirski P D, Flick R E, Graham N. 1999. Ocean wave height determined from inland seismometer data: Implications for investigating wave climate changes in the NE Pacific[J]. *J Geophys Res: Oceans*, **104**(C9): 20753–20766.
- Bromirski P D, Duennebier F K, Stephen R A. 2005. Mid-ocean microseisms[J]. *Geochem Geophys Geosyst*, **6**(4): Q04009.
- Bromirski P D. 2009. Earth vibrations[J]. *Science*, **324**(5930): 1026–1027.
- Hasselmann K. 1963. A statistical analysis of the generation of microseisms[J]. *Rev Geophys*, **1**(2): 177–210.
- Haubrich R A, McCamy K. 1969. Microseisms: Coastal and pelagic sources[J]. *Rev Geophys*, **7**(3): 539–571.
- Koper K D, Hawley V L. 2010. Frequency dependent polarization analysis of ambient seismic noise recorded at a broadband seismometer in the central United States[J]. *Earthquake Science*, **23**(5): 439–447.
- Koper K D, Burlacu R. 2015. The fine structure of double-frequency microseisms recorded by seismometers in North America[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **120**(3): 1677–1691.

- Longuet-Higgins M S. 1950. A theory of the origin of microseisms[J]. *Philos Trans Roy Soc A: Math Phys Eng Sci*, **243**(857) : 1–35.
- McNamara D E, Buland R P. 2004. Ambient noise levels in the continental United States[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **94**(4) : 1517–1527.
- McNamara D E, Boaz R I. 2006. *Seismic Noise Analysis System Using Power Spectral Density Probability Density Functions: A Stand-Alone Software Package, Open-File Report 2005–1438*[R]. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey: 1–29.
- Obrebski M J, Arduini F, Stutzmann E, Schimmel M. 2012. How moderate sea states can generate loud seismic noise in the deep ocean[J]. *Geophys Res Lett*, **39**(11) : L11601.
- Park J, Vernon F L, Lindberg C R. 1987. Frequency dependent polarization analysis of high-frequency seismograms[J]. *J Geophys Res*, **92**(B12) : 12664–12674.
- Peterson J. 1993. *Observations and Modeling of Seismic Background Noise, Open-File Report 93–322*[R]. Albuquerque, New Mexico: U.S. Geological Survey: 1–94.
- Samson J C. 1983. Pure states, polarized waves, and principal components in the spectra of multiple, geophysical time-series[J]. *Geophys J R astr Soc*, **72**(3) : 647–664.
- 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**(B10) : B10306.
- Stutzmann E, Schimmel M, Patau G, Maggi A. 2009. Global climate imprint on seismic noise[J]. *Geochim Geophys Geosyst*, **10**(11) : Q11004.
- Sun T, Xue M, Le K P, Zhang Y W, Xu H P. 2013. Signatures of ocean storms on seismic records in South China Sea and East China Sea[J]. *Mar Geophys Res*, **34**(3/4) : 431–448.
- Tanimoto T, Ishimaru S, Alvizuri C. 2006. Seasonality in particle motion of microseisms[J]. *Geophys J Int*, **166**(1) : 253–266.
- Xiao H, Xue M, Pan M H, Gao J Y. 2018a. Characteristics of microseisms in South China[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **108**(5A) : 2713–2723.
- Xiao H, Xue M, Yang T, Liu C G, Hua Q F, Xia S H, Huang H B, Le B M, Yu Y Q, Huo D, Pan M H, Li L, Gao J Y. 2018b. The characteristics of microseisms in South China Sea: Results from a combined data set of OBSs, broadband land seismic stations, and a global wave height model[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **123**(5) : 3923–3942.