

引用格式: 李娜, 林建恒, 胡涛, 等. 东中国海夏季海洋环境噪声特性分析[J]. 声学技术, 2022, 41(3): 460-464. [LI Na, LIN Jianheng, Hu Tao, et al. Analysis on the characteristics of ocean ambient noise in the East China Sea in summer[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(3): 460-464.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.03.022

东中国海夏季海洋环境噪声特性分析

李娜¹, 林建恒¹, 胡涛², 江鹏飞¹, 孙军平¹, 衣雪娟¹, 单元春^{1,3}

(1. 中国科学院声学研究所北海研究站, 山东青岛 266114; 2. 中国科学院水声环境特性重点实验室, 北京 100190;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 海洋环境噪声不仅是水中目标探测的背景干扰声场之一, 还可用于反演海洋物理参数。文章基于实测东中国海某海区夏季海洋环境噪声数据, 分析其时频特性、统计特性以及风关特性。研究表明, 试验期间该海区 100 Hz 以下频段的海洋环境噪声级约为 110 dB, 频率为 100 和 300 Hz 的海洋环境噪声级分别服从自由度为 8 和 6 的卡方分布, 频率为 1 kHz 和 3 kHz 的噪声级服从正态分布; 海况对低频海洋环境噪声级概率分布无明显影响, 但是对高频段噪声级正态分布的均值和方差会产生一定影响; 随着频率的增加, 海洋环境噪声级与风速对数间的相关系数逐渐增大, 1 kHz 以上相关系数在 0.6~0.7 之间; 100 Hz 以上频段的噪声谱级基本不随深度发生变化。文中的结果可以为水中目标的探测以及浅海海洋环境噪声的应用研究提供技术支持。

关键词: 海洋环境噪声; 时频特性; 概率分布; 风关噪声

中图分类号: P733.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-03-0460-05

Analysis on the characteristics of ocean ambient noise in the East China Sea in summer

LI Na¹, LIN Jianheng¹, HU Tao², JIANG Pengfei¹, SUN Junping¹, YI Xuejuan¹, SHAN Yuanchun^{1,3}

(1. Qingdao Branch, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266114, Shandong, China;

2. Key Laboratory of Underwater Acoustic Environment Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Ocean ambient noise is not only the interference acoustic field with respect to underwater targets detection, but also can be used to invert ocean physical parameters. Based on the ocean ambient noise data measured in a certain area of the East China Sea in summer, the time-frequency characteristics, statistical characteristics and wind-related characteristics of ocean ambient noise are analyzed in this paper. It is shown that during the experiment, the ocean ambient noise spectral level in the frequency band below 100 Hz is about 110 dB. The ocean ambient noise spectral levels at 100 and 300 Hz obey the chi-square distribution with degrees of freedom 8 and 6 respectively, and the noise spectral levels at 1 kHz and 3 kHz obey the normal distribution. Sea conditions have no significant effect on the probability distribution of low-frequency ocean ambient noise spectral levels, but have some effects on the mean and variance of the normal distribution of the noise spectral level in the high frequency range. As the frequency increases, the correlation coefficient between ocean ambient noise level and the logarithm of wind speed gradually increases, and the correlation coefficient above 1 kHz is between 0.6~0.7. The wind noise spectral level above 100 Hz basically does not change with depth. The results of this paper can provide technical support for the underwater target detection and the research on the application of ocean ambient noise in shallow seas.

Key words: ocean ambient noise; time-frequency characteristics; probability distributions; wind-generated noise

0 引言

海洋环境噪声是海洋的驻留声场, 一方面它携

带了许多海洋环境信息, 如水文特性、海底底质特性以及风速、海况等信息, 利用环境噪声数据可以快速有效地反演海洋环境参数^[1-3]; 另一方面海洋环境噪声作为目标检测的主要背景干扰之一^[4], 直接影响声呐系统的正常工作, 限制被动声呐设备性能的发挥。Knudson 等^[5]和 Wenz^[6]根据大量实测数据细致地描述了 20 世纪相关海域海洋环境噪声的源特性和谱特性, 得到了经典的环境噪声谱曲线, 不同的噪声源产生的噪声谱曲线斜率不同。

收稿日期: 2021-11-12; 修回日期: 2021-12-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11804361)、中国科学院声学研究所前沿探索基金(QYTS202008)资助项目。

作者简介: 李娜(1993-), 女, 内蒙古包头人, 硕士, 研究方向为舰船辐射噪声。

通信作者: 林建恒, E-mail: linjh@mail.ioa.ac.cn

通常情况下, 20~500 Hz 频率范围内的主要噪声源为远处的航船噪声, 而 500 Hz~20 kHz 频段内的常见噪声源为风生噪声。关于航船噪声源, JIANG 等^[7]分析了近年来我国黄海海域的商船辐射噪声特性, 建立了现代商船辐射噪声的源级模型, 提高了低频海洋环境噪声的预测精度。彭子龙^[8]根据舟山群岛测得的大量非合作船信号, 基于统计规律建立了航船声源级模型, 在 200 Hz 以下频段, 改进了 RANDI-3 模型。关于风关噪声源, 林建恒等^[9]在分段反演风速方法的基础上, 考虑海域和水声传播条件的影响, 提出了一种海洋环境噪声估计风速的修正方法, 该方法具有较好的鲁棒性。蒋东阁^[10]基于南海深水海域三次海洋环境噪声实验数据, 建立了射线理论风生噪声模型, 并修正了 Harrison 的源级公式。孙磊等^[11]通过分析南海某海域的环境噪声实测数据, 定量研究各频率点的风关特性, 得出 1 kHz 频率点附近海洋环境噪声级受海洋面风影响最为明显。近年来, 海洋环境噪声的统计特性也是研究的重要方向之一, 文献[12-14]从概率分布、方差与标准差、偏度与峰度等角度对不同海域实测海洋环境噪声谱级的统计特性进行了分析。

本文基于我国东海某海域夏季海洋环境噪声实测数据, 分别从其时频特性、噪声级的概率分布情况以及风关特性三个方面进行分析, 给出了夏季东海海洋环境噪声的相关特性。

1 海洋环境噪声试验情况简介

试验地点位于我国东海某海域, 海深约 325 m, 测量设备为 32 元等间距水听器垂直阵, 布放深度为 74~263 m, 海洋环境噪声数据的采集时长为 10 d, 采样频率为 17.067 kHz。图 1 是试验期间利用温盐深仪(Conductance Temperature Depth, CTD)测得的声速剖面, 由于夏季海洋表面受日照的影响, 形成负声速梯度剖面。图 2 是试验期间的风速

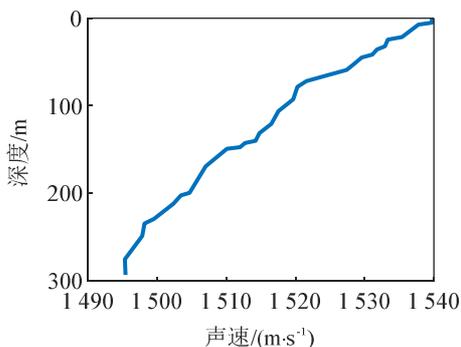


图 1 实验海域声速剖面图
Fig.1 Sound speed profile in the experimental waters

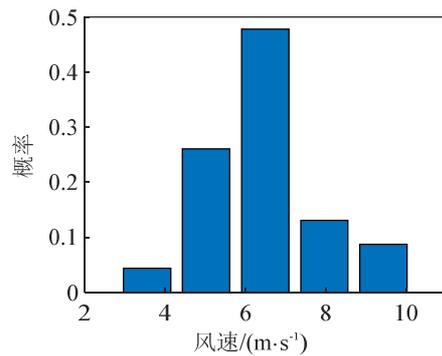


图 2 实验期间风速的概率分布
Fig.2 Probability distribution of wind speed during the experiment

概率分布柱状图, 数据源自美国国家环境预报中心(NCEP), 风速的时间采样间隔为 6 h。

2 海洋环境噪声数据处理

2.1 海洋环境噪声谱级

将实测的有效海洋环境噪声数据分成 L 段, 每一段用 $x_l(n)$, $l=1, 2, \dots, L$ 表示, 则环境噪声的谱级可表示为

$$L_N(f_j) = 10 \lg \left[\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |P_{jl}|^2 \right] - M_v - D \quad (1)$$

其中:

$$|P_{jl}|^2 = \frac{2}{N f_s} \cdot \frac{1}{(n_2 - n_1 + 1)} \sum_{j=n_1}^{n_2} |X_{jl}|^2 \quad (2)$$

式中: X_{jl} 为离散信号 $x_l(n)$ 的傅里叶变换谱, j 为频谱中的谱线索引, N 为傅里叶变换点数, f_s 为采样频率, $n_1 = f_L / f_s \cdot N + 1$ 、 $n_2 = f_H / f_s \cdot N + 1$ 分别为窄带信号的下限频率 f_L 与上限频率 f_H 对应的频率索引, M_v 和 D 分别为水听器的灵敏度和放大倍数。

图 3 是测量得到的海洋环境噪声时间-频率图, 分析频段为 20~5 000 Hz。从图 3 中可以看出, 试

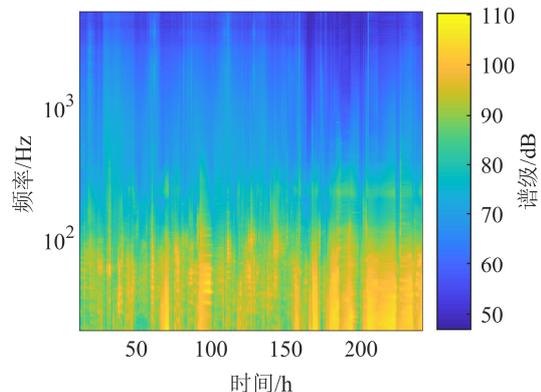


图 3 海洋环境噪声时频图
Fig.3 Time-frequency diagram of ocean ambient noise

验期间,该海域 100 Hz 以下频段的海洋环境噪声级约为 110 dB。在 100 Hz 以下频段,海洋环境的噪声级较高,随着频率的增加,噪声级逐渐减小。

2.2 海洋环境噪声谱级统计特性

由 Wenz 曲线可知,海洋环境噪声包含多种声源,声源的随机性和不确定性导致海洋环境噪声的变化呈现随机性的特点。下面从数理统计的角度,分析海洋环境噪声级在不同频段的概率分布情况。

卡方(χ^2)分布是数理统计中应用较为广泛的概率分布之一。 n 个独立标准正态变量的平方和服从卡方分布,其概率密度函数为

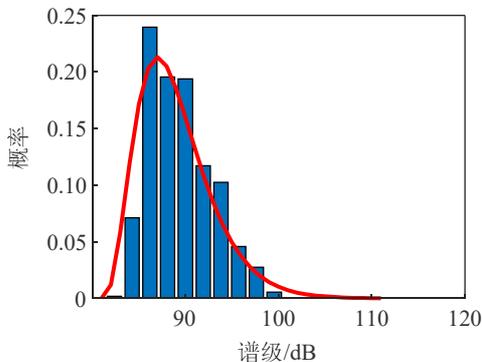
$$\chi^2(x; n) = \begin{cases} \frac{1}{2^{n/2} \Gamma(n/2)} e^{-\frac{x}{2}} x^{\frac{n}{2}-1}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

正态分布的概率密度函数为

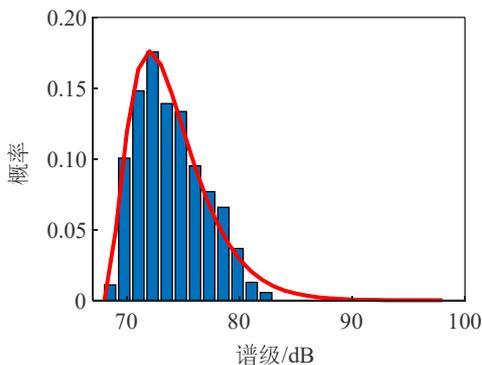
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

式中: μ 和 σ 分别表示随机变量 x 的均值和标准差。

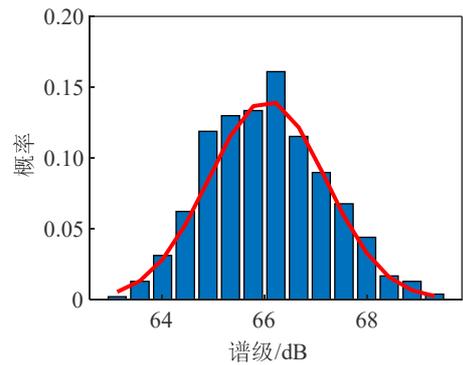
选取某日 7:00~18:00 时间段内采集得到的海洋环境噪声进行分析,由于风速的采样间隔较长,该分析时段对应的风速分别为 5.27 和 5.29 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 4 是不同频率(100 Hz、300 Hz、1 kHz、3 kHz)时,海洋环境噪声级的统计特性,其中柱状图是实测的海洋环境噪声级的概率分布图,红色曲线是与



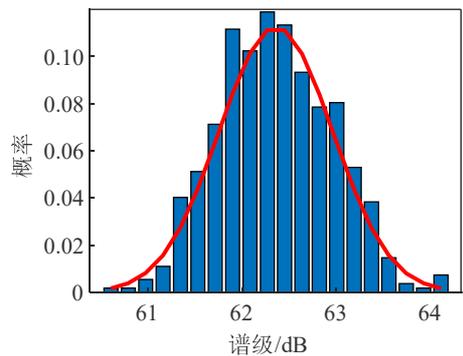
(a) 100 Hz



(b) 300 Hz



(c) 1 000 Hz



(d) 3 000 Hz

图 4 不同频率的海洋环境噪声级概率分布
Fig.4 Probability distributions of ocean ambient noise levels at different frequencies

之相应的概率分布拟合曲线。频率为 100 和 300 Hz 的海洋环境噪声级概率分布接近于 χ^2 分布,自由度分别为 8 和 6,而频率为 1 kHz 和 3 kHz 的海洋环境噪声级更接近于正态分布。这是由于在低频时,远处的航船噪声是环境噪声的主要声源,其随机性和不均匀性导致海洋环境噪声级呈现非正态分布的特性;而在高频时,风关噪声是主要的噪声源,实验当天的风速变化较小,故环境噪声级呈现稳定的正态分布特性。

图 5(a)~5(d)分别比较了实验期间海洋环境噪声级在不同频率、不同风速下的概率分布特性。观察图 5(a)、5(b),可以看出风速变化对 100 和 300 Hz 的海洋环境噪声级的概率分布影响较小,而随着风速变大、海况变差(如图 5(c)、5(d)所示),1 kHz 和 3 kHz 海洋环境噪声级概率分布的期望增大,方差也有所增加,分析其原因,一方面可能是由于风速数据的采样间隔较长,时间分辨率较低,一段时间内瞬时风速变化较大,风速增加风生噪声的强度也随之增加,背景噪声级的期望变高,导致海洋环境噪声级起伏较大;另一方面,考虑到海浪的各态历经性,方差增大,符合风作用下风浪生成阶段的海浪谱特征。

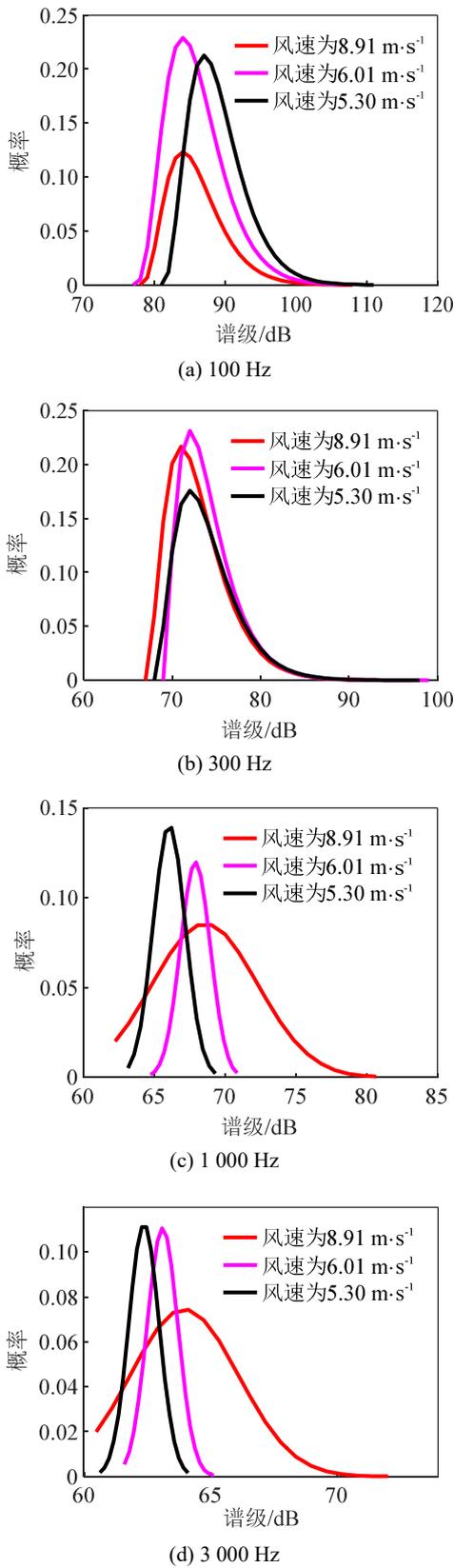


图 5 不同海况下不同频率的海洋环境噪声级概率分布
 Fig.5 Probability distributions of ocean ambient noise levels at different frequencies in different sea conditions

2.3 海洋环境噪声风关特性

根据皮尔逊相关系数公式，海面风速和海洋环

境噪声级的互相关系数可以表示为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中： x_i 、 y_i 分别表示海洋环境噪声级和相应的风速对数， \bar{x} 、 \bar{y} 分别表示环境噪声级和风速对数的时间平均，其中，风速对数的表达式为 $\lg V$ ， V 表示风速。

图 6 是不同风速下的海洋环境噪声 1/3 倍频程平均功率谱，在 20~320 Hz 频段内，环境噪声谱级与风速的变化无明显关系；在 320 Hz 以上频段，环境噪声谱级随风速增加而增大。图 7 是计算得到的海洋环境噪声谱级与风速对数的相关系数。在 20~320 Hz 频段，相关系数小于 0.4，该频段内主要噪声源为航船噪声，海洋环境噪声谱级与风速对数呈弱相关；在 400~1 000 Hz 频段内，相关系数逐渐增大，表明海面风速的变化对海洋环境噪声级的影响逐渐增大；在 1 000 Hz 以上时，相关系数达到 0.6 以上，海洋环境噪声谱级与风速对数呈现较强的相关性。

图 8(a)~8(b)比较了不同风速、不同频率时海洋环境噪声谱级随深度的变化。结果表明，风速越

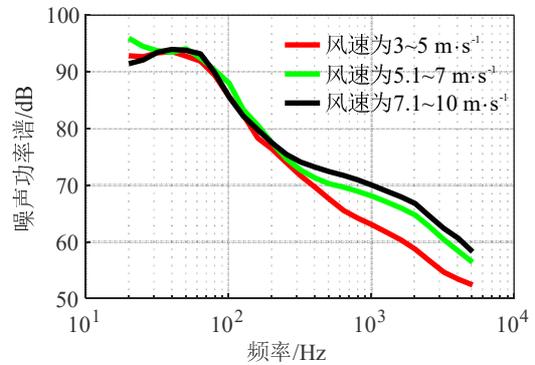


图 6 不同风速下的海洋环境噪声 1/3 倍频程平均功率谱
 Fig.6 One third octave average power spectra of ocean ambient noise at different wind speeds

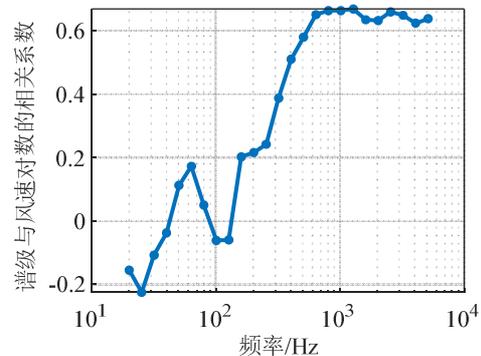


图 7 不同频率的海洋环境噪声级与风速对数的相关系数
 Fig.7 Correlation coefficients between the logarithm of wind speed and the ocean ambient noise level at different frequencies

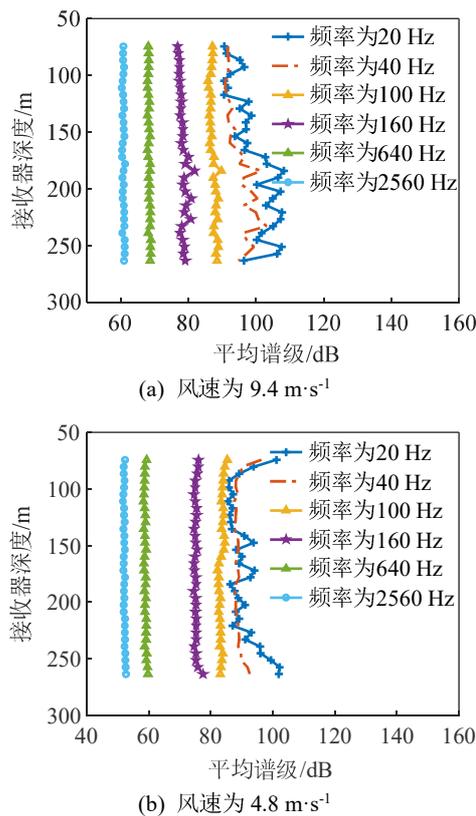


图8 不同风速时海洋环境噪声谱级垂直分布
Fig.8 Vertical distributions of ocean ambient noise spectrum levels at different wind speeds

大, 风关噪声的谱级越大, 且谱级几乎不随深度的变化而变化, 基本均匀分布在整个水体层中(海面和海底的噪声谱级未进行观测)。对比图 8(a)、8(b)发现, 频率 20 Hz 和 40 Hz 对应的噪声谱级随深度的变化而变得杂乱无章, 且 20 Hz 处的噪声谱级均大于 40 Hz 处的谱级。分析其原因, 低频部分噪声可能来自航船声源的远距离传播信号, 其谱级垂向复杂度可能与低阶简正波叠加有关。根据 Wenz 曲线分析, 20~50 Hz 的海洋环境噪声不仅包含航船噪声, 还包括地震扰动噪声、爆炸声以及海洋潮汐、湍流噪声, 频率越接近 50 Hz, 远处航船噪声对相应频段的噪声影响越大, 从两图中可见低于 40 Hz 的环境噪声谱级随深度的变化规律与高频不同, 这可能源自海洋潮汐、湍流的影响, 有待进一步研究。

3 结 论

本文基于实测的东中国海夏季某海域海洋环境噪声数据, 分别从时频图特性、噪声级统计特性和风关特性三个方面进行了分析, 结论如下:

- (1) 100 Hz 以下频段的海洋环境噪声级约为 110 dB, 随着频率的增加, 噪声级逐渐减小。
- (2) 海洋环境噪声级在 100 和 300 Hz 的低频

段服从自由度为 6~8 的 χ^2 分布, 在 1 000 Hz 和 3 000 Hz 高频段服从正态分布。不同海况对低频段的环境噪声级概率分布几乎无影响, 对高频段噪声级的正态分布的均值和方差会产生一定的影响;

(3) 在 20~320 Hz 频段内, 海洋环境噪声级与风速呈现弱相关, 随着频率的增加, 相关系数逐渐增大, 在 1 000 Hz 以上相关系数为 0.6~0.7。在不同频率时, 高频段的风关噪声的谱级基本不随深度变化。40 Hz 以下的谱级随深度变得杂乱, 这可能源自海洋潮汐、湍流噪声以及远处航船噪声低阶简正波叠加的影响, 有待进一步的分析研究。

参 考 文 献

- [1] 江鹏飞, 林建恒, 孙军平, 等. 考虑噪声源深度分布的海洋环境噪声模型及地声参数反演[J]. 物理学报, 2017, 66(1): 014306. JIANG Pengfei, LIN Jianheng, SUN Junping, et al. Ocean ambient noise model considering depth distribution of source and geo-acoustic inversion[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(1): 014306.
- [2] 李丙辉. 浅海风成海洋环境噪声场空间结构及海底参数反演研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [3] 李赫, 郭新毅, 马力. 利用海洋环境噪声空间特性估计浅海海底分层结构及地声参数[J]. 物理学报, 2019, 68(21): 154-165. LI He, GUO Xinyi, MA Li. Estimating structure and geoacoustic parameters of sub-bottom by using spatial characteristics of ocean ambient noise in shallow water[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(21): 154-165.
- [4] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
- [5] KNUDSEN V, ALFORD R S, EMLING J W. Underwater ambient noise[J]. Journal of Marine Research, 1948, 7(3):410-429.
- [6] WENZ G M. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1962, 34(12): 1936-195.
- [7] JIANG P F, LIN J H, SUN J P, et al. Source spectrum model for merchant ship radiated noise in the Yellow Sea of China[J]. Ocean Engineering, 2020, 216: 107607
- [8] 彭子龙. 舟山群岛海域航船噪声测量与建模[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [9] 林建恒, 蒋国健, 苑泉乐, 等. 一种海洋环境噪声估计风速的修正法[J]. 声学学报, 2006, 31(3): 276-280. LIN Jianheng, JIANG Guojian, YUAN Quanle, et al. A modified method of evaluating wind speed by ocean ambient noise[J]. Acta Acustica, 2006, 31(3): 276-280.
- [10] 蒋东阁. 深海风生海洋环境噪声特性研究[D]. 北京: 中国科学院大学.
- [11] 孙磊, 李琪, 常哲, 等. 南海某海域海洋环境噪声谱级风关特性分析[J]. 海洋测绘, 2019, 39(5): 66-69. SUN Lei, LI Qi, CHANG Zhe, et al. Analysis of wind-generated characteristics of ocean ambient noise spectrum in South China Sea[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2019, 39(5): 66-69.
- [12] CHAN H C, CHEN C F, WEI R C. Analysis of the significantly statistical duration to clarify the uncertainty of ambient noises due to environmental changes[J]. OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, 2008: 1-5.
- [13] 陆遥. 东沙海域海洋环境噪声特性分析及其风速相关性研究[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2016.
- [14] 郭新毅, 李凡, 铁广朋, 等. 海洋环境噪声研究发展概述及应用前景[J]. 物理, 2014, 43(11): 723-731. GUO Xinyi, LI Fan, TIE Guangpeng, et al. Overview of ocean ambient noise and application prospects[J]. Physics, 2014, 43(11): 723-731.