台风对深海海洋环境噪声的影响

刘姗姗^{①②}, 李风华^{①*}^① 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 北京 100190;^② 中国科学院大学, 北京 100190

*联系人, E-mail: lfh@mail.ioa.ac.cn

收稿日期: 2016-02-03; 接受日期: 2016-04-11; 网络出版日期: 2016-08-09

国家自然科学基金资助项目(编号: 11125420)

摘要 中低频海洋环境噪声受海表面风速的影响显著, 台风经过时, 海表面风速在短时间内迅速增大, 因此海洋环境噪声强度显著增加. 本文通过分析两次台风经过垂直接收阵附近时接收器记录的海洋环境噪声, 研究了台风条件下, 环境噪声强度随风速和频率变化的关系. 文中结合风成噪声源级模型和台风激发的水下噪声场模型对台风影响下的深海环境噪声场进行了理论仿真, 并将仿真结果与实测噪声数据进行最小二乘曲线拟合, 得到噪声源级模型中风速和频率的指数项系数的取值. 结果表明: 台风对高频噪声的影响更显著, 200 Hz以下的噪声受风速变化的影响较小. 环境噪声强度近似与风速的三次方成正比, 且当风速的指数项为3时, 频率的指数项取值在-0.85附近.

关键词 台风, 海洋环境噪声, 风速, 频率**PACS:** 43.30.Nb, 43.30.Zk, 43.30.Bp, 43.50.Rq

海洋环境噪声是海洋中普遍存在的背景声场, 根据噪声源成因的不同可分为动力噪声、生物噪声、地震噪声、工业噪声等, 不同成因的海洋环境噪声, 其谱特征也不相同.

关于海洋环境噪声的研究最早可追溯到二战时期, 1948年Knudsen等人^[1]基于二战期间海上测量的100 Hz–26 kHz海洋环境噪声数据, 总结得到Knudsen曲线, 首次指出噪声强度与海况、风力相关. 1962年, Wenz^[2]在分析了大量实测数据的基础上, 总结得到深海噪声谱曲线, Wenz曲线指出在50 Hz–20 kHz的频段内, 噪声强度与风速、海况高度相关, 其中1 kHz以上

的频段, 噪声谱级每倍频程衰减5–6 dB. Knudsen谱和Wenz谱表明浅海区噪声谱与外海深海区的噪声谱有显著差异, 且对于所关注频段的海洋环境噪声, 总有一种起主要作用的噪声源, 例如数百至上千赫兹的频段, 主要受风成噪声的影响. 1969年, Perrone^[3]将实测环境噪声分别与海表面风速、波高做相关, 结果表明噪声相对风速的时延远小于其相对海况的时延. 1984年, Farmer和Lemon^[4]在分析外海观测点的噪声随风速的变化时, 也验证了噪声起伏与风速变化相关性更高. 上述研究表明: 风成噪声是中低频段海洋环境噪声的主要组成部分, 且风成噪声主要是由海表面风动现象

引用格式: 刘姗姗, 李风华. 台风对深海海洋环境噪声的影响. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 094305
Liu S Q, Li F H. Effects on deep ocean ambient noise caused by typhoon (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 094305, doi: 10.1360/SSPMA2016-00084

引起的.

基于海洋环境噪声与风速高度相关的特点,如果能够给出噪声强度与海表面风速的准确关系,就可以通过噪声的实测数据反演海表面风速,实现利用水下噪声采集系统监测海洋风暴的“构想”^[5]. 1964年, Piggott^[6]首次提出环境噪声谱级与海表面风速的对数存在线性关系,并在分析大量实验数据的基础上给出了相关系数的经验取值. 之后其他研究人员^[4,7-9]在实验中对Piggott模型进行了验证,得到的参数值与Piggott模型中的经验取值有一定的差别,究其原因,一方面是测量海域不同会导致低频海洋环境噪声受其他非风成噪声源的干扰,另一方面,高频高风速时风成噪声源的产生机理可能发生变化. 1980年, Wilson^[10,11]在分析海表面浪花形成的低频风成噪声时,定义了“白帽指数”(White Capping Index)的概念,并给出海表面噪声源级关于风速、频率的经验公式. 国内也开展了关于噪声与风速关系的研究,林建恒^[5]在分析国内海域环境噪声测量数据的基础上,提出按风速分段线性拟合环境噪声与对数风速关系曲线的方法,提出并确定最佳反演频段.

海洋环境噪声是由多种类型的声源共同作用形成的,且不同频段内起主要作用的声源类型不同,例如10 Hz–1 kHz频带范围内海洋环境噪声主要受海表面风成噪声和远处航船噪声(以下简称船噪声,不包括单个船只经过时产生的噪声)的影响,二者的能量分布在频带上重叠且难以分离. 当风速较小时,船噪声对海洋环境噪声的贡献不可忽略,导致噪声级与对数风速的相关性下降. 为了减少船噪声的干扰,研究人员尝试了多种方式,包括将实验地点放置在航运较少的海域或海湾内,利用指向性为垂直方向的线列阵采集噪声等. 除此以外,还可以利用极端天气情况下的噪声数据进行研究. 台风经过时,海面船只很少,排除了航船噪声对结果的干扰,且海表面风速在短时间内连续变化,因此台风天气时采集到的海洋环境噪声数据非常适合用于噪声与风速的相关性分析. Zhao^[12]测量了台风经过时水下1–50 m深度上的噪声级,与实测台风风速进行拟合,得到了不同频率噪声级与风速的关系.

建立海洋环境噪声与台风强度的关系模型,可以为利用声学的手段观测和预报台风奠定理论基础. 本文基于南中国海海域采集到的两次台风天气情况下

的海洋环境噪声数据,分析台风对不同频率噪声强度的影响,并总结出噪声强度随风速变化的一般规律. 文章结合风成噪声源级模型和台风激发的水下噪声场模型^[13]对接收声场进行理论仿真,分析噪声强度与频率的关系,并通过仿真结果与实验数据的拟合求解风成噪声源级模型中未知参量的取值.

1 理论模型

1.1 台风风速模型

台风是在相对均匀的热带海洋性气团中发展起来的,因而其气压、温度和风速的分布在水平方向常具有对称性,发展成熟的台风可被看作关于中心对称的圆形涡旋^[14],如图1所示. 依据风速的变化情况,台风沿水平半径方向可分为三个区域,分别是眼区、眼壁和外区,风速剖面如图2所示,影响半径一般在500–1000 km. 大多数台风在空间上的风速分布均符合上述结构,可选择合适的参数模型来描述台风风场.

现有的参数化模型中,使用较多的是Holland台风模型^[15],其数学表达式为

$$v(r) = \sqrt{AB(p_n - p_c) \frac{e^{-A/r^B}}{\rho_a r^B}}, \quad (1)$$

其中 v 表示海面10 m高度处的风速,单位m/s, p_n 和 p_c 分别表示无限远处的海表面气压和台风中心气压, ρ_a 为空气密度, A 和 B 为经验值,可由台风预报参数代入模型求得. 图2为应用Holland模型得到的台风风速随台风半径变化的剖面图,由图中可以看出台风中心风速为0,随着半径的增大风速迅速增加,在眼壁附近达到

图1 201319号台风的卫星云图
Figure 1 Satellite image of Typhoon USAGI.

图2 (网络版彩图)台风风速剖面图
Figure 2 (Color online) Wind speed profile of typhoon.

最大值,随后风速沿半径向外不断减小. Holland模型可以较准确地描述结构对称的台风风场,因此,本文利用该模型计算不同位置处的海表面风速.

1.2 风成噪声源级模型

研究风成噪声时需要用到风成噪声声源级 SI ,即单位面积海面产生的噪声源级.风成噪声声源级由风速和频率共同决定,文中选用Wilson提出的以“白帽指数”为变量的经验公式计算风成噪声源级,并结合Piggott模型对其进行简化.

Wilson风成噪声源级模型将噪声源强度表示为与风速有关的白帽指数 $R(v)$ 和频率 f 的函数

$$SI(v, f) = C \times R(v) \times f^p, \quad (2)$$

其中 C 是与频率无关的常数,白帽指数 $R(v)$ 是风速的三次方多项式^[11].

Piggott模型^[6]是基于大量实测数据的分析总结得到的,其表达式如下:

$$SI(v, f) = A(f) \times v^{n(f)}, \quad (3)$$

其中 A 和 n 与频率有关,不同海域的 A 取值略有差异,而 n 的取值范围为 3.1 ± 0.3 .

本文结合Piggott经验公式对Wilson噪声源模型中的风速项进行简化,将噪声源强度表示为

$$SI(v, f) = C \times f^p \times v^n, \quad (4)$$

式中 C , p 和 n 均为待求解的参量,下文将结合上式进行水下噪声场模型的推导.

1.3 台风激发水下噪声场模型

台风经过时,扰动海-气界面,产生的噪声源可看作位于海面附近深度 z' 处的平面上均匀分布的非相干点源,噪声源强度的大小取决于该点的风速.接收点处的声场是所有噪声点源声场的叠加,声源与接收器的相对位置如图3所示,设声源水平位置为 r' , r'' ,接收器位于 (r, z) 处,空间格林函数为 $g(r, r'; z, z')$.

假设台风激发的各点声源非相干,则声源的相关函数为

$$\langle S(r')S(r'') \rangle = SI(r', f)\delta(r' - r''), \quad (5)$$

其中 $SI(r', f)$ 为台风激发的噪声源强度,根据公式(4)和(1),噪声源强度可进一步表示为

$$SI(r', f) = C \times f^p \times \left\{ \sqrt{AB(p_n - p_c) \frac{e^{-A/r^B}}{\rho_a r^B}} \right\}^n. \quad (6)$$

接收点 (r, z) 处的声场强度为

$$I(r, z, f) = \int SI(r', f) |g(r, r'; z, z')|^2 d^2 r'. \quad (7)$$

水平不变的海洋环境下,格林函数可以表示为简正波求和的形式

$$g(R, z) = \frac{ie^{-i\pi/4}}{\rho_w \sqrt{8\pi R}} \sum_m \Phi_m(z_s) \Phi_m(z) \frac{e^{ik_m R}}{\sqrt{k_m}}, \quad (8)$$

式中 $k_m = \mu_m + i\beta_m$ 是第 m 阶模态的本征值, Φ_m 是 m 阶本征函数, $R = |r - r'|$ 为噪声源与接收器的水平

图3 声源与接收器相对位置示意图
Figure 3 Spatial relative positions of the source and the receiver.

距离, ρ_w 为海水密度. 对公式(7)作变量代换, 使得 $SI(\mathbf{r}', f) = SI(R, \theta, f)$, 将公式(8)带入公式(7)得

$$I(f) = \frac{1}{8\pi\rho_w^2} \sum_m \frac{|\Phi_m(z_s)\Phi_m(z)|^2}{\mu_m} \times \int_0^{R_{\max}} \int_0^{2\pi} SI(R, \theta, f) e^{-2\beta_m R} dR d\theta. \quad (9)$$

当台风眼位置距离接收点较远时, $e^{-2\beta_m R}$ 项的衰减速度远大于 $SI(R, \theta, f)$, 上式可进一步简化为^[13]

$$I(f) \approx \frac{1}{8\pi\rho_w^2} \sum_m \frac{|\Phi_m(z_s)\Phi_m(z)|^2}{\mu_m} \times SI(f)_0, \quad (10)$$

$$SI(f)_0 = C \times f^p \times v_0^n, \quad (11)$$

其中 v_0 表示接收器上方的海表面风速, $SI(f)_0$ 是风速 v_0 作用下的声源强度. 下文将利用公式(10)计算接收位置的噪声场, 并通过仿真结果与实测台风噪声数据的拟合, 求解 C , p 和 n 值.

2 实验简介

2013年声场声信息国家重点实验室在南海进行了一次深海声传播实验, 其中一条垂直接收阵布放于巴士海峡附近, 记录了长达3个月(7-10月)的水下环境噪声, 期间有两次台风(“西马仑”、“天兔”)从垂直阵附近经过. 垂直阵所在位置的海深是3235 m, 阵上布放有若干个接收水听器, 覆盖了浅海及声道轴附近的深度, 受台风影响, 水听器接收到的噪声信号有明显的起伏. 以下主要针对台风经过的时间段, 分析环境噪声随风速和频率的变化规律. 图4和5分别为2013年第8号台风“西马仑”和19号台风“天兔”与接收阵的相对距离示意图, 两台风分别于7月17日17点和9月21日20点前后经过接收阵, 与接收阵的最近距离分别是36和41 km.

3 风速对环境噪声的影响

对垂直阵记录的噪声数据进行分析, 发现台风经过时, 水下噪声强度起伏明显, 图6和7所示是噪声强度随时间-频率变化的二维彩图, 在7月17日06:00至18日08:00间以及9月20日22:00至22日22:00间, 图中有明显的亮线, 500 Hz以上的噪声强度显著升高, 对比图4和5可以看出, 噪声强度升高的时间段与台风经过接收器附近的时间段一致.

图4 台风“西马仑”与接收器的相对距离
Figure 4 Horizontal distance between the typhoon eye of CIMARON and the receiver location.

图5 台风“天兔”与接收器的相对距离
Figure 5 Horizontal distance between the typhoon eye of USAGI and the receiver location.

不同深度处水听器接收到的1 kHz噪声谱级对比结果如图8和9所示, 由图中可以看出, 在台风经过的时间段, 不同时刻的噪声谱级在深度方向上差异不大, 可见深度对环境噪声的影响较弱, 因此本文仅以深度973 m处的噪声级为例, 分析风速对环境噪声的影响. 根据气象台预报给出的台风中心位置计算出台风

图6 “西马仑”经过期间, 噪声谱级的时频二维彩图
Figure 6 Time-frequency color graph of noise spectrum, CIMARON.

中心与垂直阵的水平相对距离, 再结合最大风速、中心气压、风圈半径等预报信息, 基于Holland台风风速模型, 计算得到垂直阵上方的海表面风速如图10和11所示, 对比噪声谱级随时间的分布曲线(图8和9)可以看出噪声谱级出现最大值的时间段与台风中心靠近接收器的时间段相一致. 这一结果证实: 随着台风中心的靠近, 海表面风速增加, 环境噪声在短时间内显著增强, 而伴随着台风中心远离接收点所在位置, 海表面风速减小, 环境噪声强度也随之减小. 将实验获得的噪声谱级与风速的对数进行拟合, 结果如图12和13所示, 图中圆圈表示不同中心频率的实测噪声数据, 实

图7 “天兔”经过期间, 噪声谱级的时频二维彩图
Figure 7 Time-frequency color graph of noise spectrum, USAGI.

线表示拟合直线, 当直线斜率等于3时, 与实测数据的匹配程度较高, 表明噪声谱级近似与风速的三次方成正比关系, 这一结果与其他文献对不同海域的环境噪声进行分析得到的结论相一致^[7,8].

4 噪声强度与频率的关系

图13(a)和(b)表明噪声强度同时也受频率的影响. 认为噪声强度与风速的三次方成正比, 结合台风风速模型、风成噪声源级模型和水下噪声场模型, 对噪声强度与频率的关系进行理论仿真. 将公式(1)代入(11)得到噪声源级的风速表示式, 根据公式(10)计算

图8 不同深度处, 三分之一倍频程平均噪声谱级, 中心频率1 kHz
Figure 8 1/3 Octave averaged noise spectrum of different depths, central frequency 1 kHz.

图9 (网络版彩图)不同深度处, 三分之一倍频程平均噪声谱级, 中心频率1 kHz

Figure 9 (Color online) 1/3 Octave averaged noise spectrum of different depths, central frequency 1 kHz.

图10 台风“西马仑”经过时, 垂直阵上方海表面风速

Figure 10 Surface wind speed on top of receiver, Typhoon CIMARON.

图11 台风“天兔”经过时, 垂直阵上方海表面风速

Figure 11 Surface wind speed on top of receiver, Typhoon USAGI.

接收点处的噪声场, 用最小二乘曲线拟合求解仿真结果与实验数据匹配程度最高时, C 和 p 取值的最优解.

由公式(10)计算得到的接收深度 973 m 处的噪声强度仿真值与接收器实测的噪声数据对比结果如图14和15所示, 仿真结果与实测数据较为匹配. 特别地, 图15中实测噪声强度在峰值附近出现凹陷, 而仿真结果只有单个峰值, 且峰值位置的噪声强度高于实测值 2–5 dB. 分析这段时间的台风预报信息发现: 台风

天兔是一次超强台风, 且在移动过程中风场结构变化显著, 我国中央气象台和日本气象厅发布的台风预报数据在同一时刻的中心风速和风圈半径预报值有明显差异, 尤其表现在 9 月 20 至 21 日. 文中进行接收场噪声强度的仿真计算时采用我国中央气象台的预报数据作为先验信息, 代入 Holland 台风风速模型, 得到接收阵上方海表面风速如图11所示, 风速的变化曲线在峰值附近无凹陷的现象, 与图15中噪声的数值仿真结

图 12 (网络版彩图)“西马仑”经过时, 不同频率的实测噪声强度(圈点) 与风速的拟合结果(直线)

Figure 12 (Color online) Straight-line fitting between the experimental noise intensity (circle) and the wind (solid line) at different central frequencies, Typhoon CIMARON.

图 13 (网络版彩图)“天兔”经过时, 不同频率的实测噪声强度(圈点) 与风速的拟合结果(直线)

Figure 13 (Color online) Straight-line fitting between the experimental noise intensity (circle) and the wind (solid line) at different central frequencies, Typhoon USAGI.

图 14 (网络版彩图)“西马仑”经过时实验与仿真的噪声强度对比图

Figure 14 (Color online) The data/model comparison of the noise intensity, CIMARON.

图 15 (网络版彩图)“天兔”经过时实验与仿真的噪声强度对比图

Figure 15 (Color online) The data/model comparison of the noise intensity, USAGI.

果变化趋势一致,由此推断图15中噪声强度峰值附近的偏差是因为海表面风速的计算结果不准确导致的.

将公式(11)的等式两边同时取对数,可以写作

$$10\log_{10}SI(f) = p \times 10\log_{10}f + 10\log_{10}C + 10\log_{10}v_0. \quad (12)$$

由上式可见噪声源级同时与风速、频率的对数成比例. 表1所示是最小二乘曲线拟合得到的台风“西马仑”和“天兔”经过时,常数项 C 和指数项 p 的取值.两次台风经过时,常数项和参数项的值均变化不大,可以认为这种比例关系是稳定存在的.由两次噪声强度的分析结果可以得到结论:台风经过时,噪声强度与频率的指数次方成比例关系,指数项的取值在 -0.85 附近,与文献[14]中的结果一致.由于两次实验数据来自

表1 两次台风经过时的拟合参数

Table 1 Fitting parameters when two different typhoons pass over

台风名	时间	p	C (dB)
西马仑	2013-07	-0.83	66.44
天兔	2013-09	-0.86	65.84

同一接收点,海深及其他海洋环境参数均相同,因此指数项的取值是否受环境参数的影响有待进一步研究.

5 结论

本文采用南海海洋声传播实验中采集到的环境噪声数据,分析了台风对深海海洋环境噪声的影响,结果表明台风靠近时,水下环境噪声强度随海表面风速的增加而增加,随着台风的远离,海表面风速减小,噪声强度随之迅速下降.利用Holland台风风速模型,计算接收点上方海表面风速,将实测环境噪声谱级与风速的对数进行拟合,结果表明噪声强度近似与风速的三次方成正比.结合风成噪声源模型和台风激发的水下噪声场模型对接收点处的噪声场进行理论仿真,并将噪声强度的仿真结果与实测值进行最小二乘曲线拟合,结果表明噪声强度同时与风速和频率的指数次方成比例关系,当风速的指数项系数为3时,拟合得到频率的指数项系数在 -0.85 左右,比例系数在66左右,且两次台风经过时噪声强度随风速和频率的变化趋势基本一致.

参考文献

- Knudsen V O, Alford R S, Emling J W. Underwater ambient noise. *J Mar Res*, 1948, 7: 410–429
- Wenz G M. Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources. *J Acoust Soc Am*, 1962, 34: 1936–1956
- Perrone A J. Deep ocean ambient noise spectra in the Northwest Atlantic. *J Acoust Soc Am*, 1969, 46: 762–770
- Farmer D M, Lemon D D. The influence of bubbles on ambient noise in the ocean at high wind speeds. *J Phys Oceanogr*, 1984, 14: 1762–1778
- Lin J H, Chang D Q, Ma L, et al. Estimation of surface wind speed by ocean ambient noise (in Chinese). *Acts Acust*, 2001, 26: 217–221 [林建恒. 海洋环境噪声反演估计海面风速. *声学学报*, 2001, 26: 217–221]
- Piggott C L. Ambient sea noise at low frequencies in shallow water of the Scotian Shelf. *J Acoust Soc Am*, 1964, 36: 2152–2163
- Wilson J D, Makris N C. Quantifying hurricane destructive power wind speed and air-sea material exchange with natural undersea sound. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: 1–5
- Curtis K R, Howe B M, Mercer J A. Low-frequency ambient sound in the North Pacific: Long time series observations. *J Acoust Soc Am*, 1999, 106: 3189–3200
- Chapman N R, Cornish J W. Wind dependence of deep ocean ambient noise at low frequencies. *J Acoust Soc Am*, 1993, 93: 782–789
- Wilson J H. Low-frequency wind-generated noise produced by the impact of spray with the ocean's surface. *J Acoust Soc Am*, 1980, 68: 952–956
- Wilson J H. Wind-generated noise modeling. *J Acoust Soc Am*, 1983, 73: 211–216
- Zhao Z X. The sound of tropical cyclones. *J Phys Oceanogr*, 2014, 44: 2763–2778
- Wang J Y, Li F H. Preliminary study on underwater ambient noise generated by typhoons. *Chin Phys Lett*, 2015, 32: 044301–044303
- Wang J Y. Research on Properties of Underwater Ambient Noise Generated by Typhoons (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, 2015 [王璟琰. 台风激发水下声场特性研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院声学研究所, 2015]
- Holland G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon Weather Rev*, 1980, 108: 1212–1218

Effects on deep ocean ambient noise caused by typhoon

LIU ShanQi^{1,2} & LI FengHua^{1*}

¹State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Sea-surface wind speed has significant impacts on ocean ambient noise at medium and low frequency bands. When a typhoon comes close, sea-surface wind speed increases sharply, which results in the surge of the ambient noise level. By analyzing the sound data collected by a vertical array in deep ocean environment during two typhoon periods, both the wind speed and frequency dependencies of ambient noise are established. Noise field at receivers is calculated via numerical simulations with combination of the source intensity model of wind generated noise and the typhoon generated noise intensity model. Simulated noise intensity is fitted with the experimental data by least square method, through which the exponent of the wind speed and frequency in the source intensity model is determined. Our result indicate that the variations of wind speed caused by typhoon heavily impact on the noise at frequency band higher than 200 Hz. And specifically, the ambient noise intensity is approximately proportional to the 3rd power of the wind speed, where the exponent of frequency is around -0.85 .

typhoon, ocean ambient noise, wind speed, frequency

PACS: 43.30.Nb, 43.30.Zk, 43.30.Bp, 43.50.Rq

doi: [10.1360/SSPMA2016-00084](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00084)