

起伏海面散射引起浅海声传播损失的统计特性与快速声场预报方法*

刘若芸^{1,2} 彭朝晖^{1†} 张 波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 100049)

2022 年 10 月 10 日收到

2023 年 2 月 13 日定稿

摘要 基于海洋环境信息、起伏海面的小斜率近似和简正波模型,研究了浅海环境中不同季节起伏海面散射引起的声传播损失的统计特性,给出了海面散射声传播损失-风速拟合公式以及一种快速声场预报方法,可据此快速评估水下长期工作设备的工作性能。仿真结果表明,对于全年运行的水声设备,当传播距离超过 10 km 时,须考虑起伏海面散射对声传播的影响。起伏海面散射对声场的影响冬季大于夏季,在夏季负跃层环境中起伏海面散射对下发上收声场的影响大于下发下收声场。

关键词 起伏海面,海面散射,传播损失,声场统计特性,声场预报

PACS 数 43.30, 43.60

DOI: 10.12395/0371-0025.2022098

Statistical characteristics of acoustic transmission loss in shallow water caused by fluctuant surfaces and a fast sound field prediction method

LIU Ruoyun^{1,2} PENG Zhaohui^{1†} ZHANG Bo¹

(1 *State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences* Beijing 100190)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences* Beijing 100049)

Received Oct. 10, 2022

Revised Feb. 13, 2023

Abstract In this paper, the statistical characteristics of acoustic transmission loss in shallow water caused by fluctuant surface scattering in different seasons are studied based on the marine environmental data, small slope approximation of the fluctuant surface and normal mode method. A formula fitting the relationship between wind speeds and surface scattering transmission loss is proposed, accompanied with a fast method for sound field prediction. These works can contribute to the rapid evaluation of the performance of long-working underwater acoustic equipment. It is shown that for the underwater acoustic equipment, the influence of fluctuant surface scattering on sound propagation cannot be ignored, when the transmission distance exceeds 10 km. In addition, such influence in winter is greater than that in summer. Furthermore, in the negative thermocline environment in summer, the influence of fluctuant surface scattering on the sound filed with source below the thermocline and the receiver above the thermocline is greater than that on the sound filed with source and receiver both below the thermocline.

Keywords Fluctuant sea surface, Surface scattering, Transmission loss, Statistical characteristics of sound field, Sound field prediction

引言

声波在海洋中传播受声速时空分布、海底地

形、海底底质、随机起伏海面等多种因素的影响。尤其在浅海,声波在传播中会多次途经海面和海底,受其影响非常显著。风浪较大时,起伏海面对声波的散射可能导致接收信号能量的损失和起伏、信号

* 国家自然科学基金项目 (11774374, 11974017) 和中国科学院青年创新促进会项目 (2017028) 资助

† 通讯作者: 彭朝晖, pzh@mail.ioa.ac.cn

到达时间的起伏、信号相干性的变化,产生汇聚和发散效果、角度扩展、频率变化和频带展宽等。一般情况下,海面可看作绝对软边界,声波入射到平整海面后发生镜面反射,不会产生能量损失。而当海面呈现为随机不平整表面时,声波入射到起伏海面后会被散射到各个不同的方向,部分声线改为后向传播,部分掠射角增大的声线经海底反射后能量很快被损耗,声传播损失增加。在水声研究中,如果不考虑起伏海面散射引起的传播损失,可能会导致如海底吸收系数反演结果等的误差增大。水声设备运行过程中,如果忽略起伏海面散射的影响,将会错误评估声呐探测性能、水声通信误码率等参数,影响设备使用。

对起伏海面散射引起的传播损失的研究已取得重要进展。Kuperman 等指出起伏海面散射声传播损失与风速、风向、声速剖面和海底特性等因素有关^[1]。Weston 等给出了单频信号的海面散射声传播损失与频率、风速的拟合公式^[2]。王鸿樟总结了表面声道中起伏海面引起的简正波衰减系数与声波频率、起伏海面相关半径的关系^[3]。文献 [4-10] 中研究了风速、海面粗糙度、声波频率、入射角和散射角等因素对海面散射强度的影响。文献 [11-13] 中研究了起伏海面对空气中声源激发的水下声场的影响,分析了风速、波高等因素和声传播损失的关系。以上研究验证了 PM 波浪谱等起伏海面模拟方法和小斜率近似法等散射模型的有效性,较为全面地总结了海面散射声传播损失的影响因素,为研究起伏海面下的声传播规律奠定了基础,但其仅讨论了海面散射引起的平均传播损失,未考虑海面波浪的随机时变特性。

为解决这一问题,陈文剑等讨论了随机起伏海面的散射对水声信道特性的影响^[14];刘若芸等^[15]和汪洋等^[16]分析了起伏海面下浅海声传播损失的随机变化情况;涂星滨研究了风浪对高频单载波水声通信系统的影响^[17]。他们的研究表明,随机起伏海面对声波的散射会引起海面反射声线路径的变化,改变信道的时变特性,令声场相位、声传播损失和声信号的到达时间在一定范围内随机波动,进而影响水声通信的性能。这些基于波浪时变性的研究可应用于风浪条件下随机声场的预报和水声通信的优化。

除上述仿真研究外,研究者们也通过实验研究了起伏海面散射引起的传播损失。王先华等对实验数据的分析表明,浅海环境中风速为 11 m/s 时 1000 Hz 声波的散射传播损失约为 5 dB^[18]。孟昭然等通过水池实验验证了起伏水面的散射强度与入射

角和散射角的关系^[19]。邹哲光等研究了不同风速条件下高频宽带声信号经一次起伏海面散射后声压幅度的起伏^[20]。刘今等发现,浪高 2 m 的涌浪海面散射引起的表面声道中 1000 Hz 声波的传播损失可达 10 dB^[21]。姚美娟等分析实验数据得出,三至四级海况下 3 kHz 声波在水深 1000 m 海域传播几千米时,起伏海面引起的传播损失约为 4~6 dB^[22]。冯丹平等的实验表明,对于二级海况下深海环境中的 200 Hz 和 400 Hz 声场,影区起伏海面散射引起的声传播损失高达 30 dB;而在汇聚区,声场能量主要来自于折射声线,因此起伏海面对声传播损失的影响较小^[23]。以上结果表明,起伏海面可能会对各种海洋环境中的声场产生影响,说明了在水声研究中考虑海面散射引起的声传播损失的必要性。

上述工作对海面散射声传播损失的影响因素进行了较为充分的研究,并进行了实验验证,但主要是对单次实验或有限时间内的海面散射声传播损失进行分析。对于常年运行的水下声学设备,其工作性能受到不断变化的海面风场和季节性气候的影响。若基于某一次现场声传播损失测量结果或者分析结果,对同一海域不同季节、不同海面风场情况下的设备工作性能进行快速评估,其结果难免有偏差。

为了满足这种实际需求,本文基于某海域全年水文和气象数据,研究了海面散射声传播损失的季节变化规律及其产生机理,并给出了海面散射声传播损失-风速拟合公式和基于海洋环境信息的快速声场预报方法。本文总结了海面散射声传播损失与季节、传播距离的关系并解释其机理,有助于更准确地预报风浪条件下的声传播损失。将本文的拟合公式和快速声场预报方法应用于水声研究中,可实现同一海域不同季节、不同海况下水声设备工作性能(如声呐探测距离和水声通信误码率等重要参数)的快速评估和水声实验的误差分析。若结合风浪预报等先验信息,还可预报设备性能,预估实验效果。此外,本文给出的声场能量全年受起伏海面影响的概率,可为长期运行的水声设备的设计提供参考。

1 起伏海面下的声场计算方法

计算起伏海面下声场的常用方法主要有两类。一类是直接将某个起伏海面的位移函数作为边界条件,用抛物方程(PE)模型计算声场;另一类是根据起伏海面的粗糙度计算等效反射系数,再用简正波模型计算声场。前者需要先根据风速随机生成一个起伏海面,然后利用 PE 模型计算这个起伏海面下的声

场。这样得到的结果具有一定的随机性,不能代表该风速下声场的整体情况。若要获得某一风速下的平均声场,则需利用蒙特卡罗方法计算多次模拟的平均结果,计算量大,耗时长。若采用简正波模型,通过一次计算就可以得到该风速下的平均声场。姚美娟等已证明两种结果基本一致^[24]。为提高计算速度,采用简正波模型,使用 KRAKEN (简正波声场计算软件) 分别计算相干传播损失和非相干传播损失。相干传播损失可通过简正波的直接叠加得到:

$$TL(r,z) = -20 \log_{10} \left| \frac{1}{\rho(z_s)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} e^{-i\pi/4} \sum_{m=1}^{\infty} \Psi_m(z_s) \Psi_m(z) \frac{e^{ik_{rm}r}}{\sqrt{k_{rm}}} \right|. \quad (1)$$

非相干传播损失可通过简正波的非相干叠加得到:

$$TL_{inc}(r,z) = -20 \log_{10} \frac{1}{\rho(z_s)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \sqrt{\sum_{m=1}^{\infty} \left| \Psi_m(z_s) \Psi_m(z) \frac{e^{ik_{rm}r}}{\sqrt{k_{rm}}} \right|^2}. \quad (2)$$

式 (1) 和式 (2) 中, ρ 为海水密度, z_s 和 z 分别为声源深度和接收深度, r 为传播距离, k_{rm} 和 Ψ_m 分别为第 m 号简正波的本征值和本征函数。 k_{rm} 和 Ψ_m 可由亥姆霍兹方程和海面海底边界条件推出, 平整海面的边界条件为

$$\Psi(0) = 0, \quad (3)$$

起伏海面的边界条件将在下文给出。

本文讨论起伏海面散射对平均声场造成的能量损失。声波入射到随机起伏海面后可能散射到各个方向, 形成随机起伏声场。其平均声场的衰减机制等效于, 声波入射到起伏海面后, 反射波仍然在镜面反射方向, 但存在能量损失。等效的起伏海面散射示意图如图 1 所示, 其中 θ_i 是入射角, θ_s 是反射角, 声波入射到平均海面后的反射角等于入射角, 但此时等效反射系数的幅度小于 1。可由起伏海面的小斜率近似 (SSA) 推导出镜面反射方向的等效反射系数^[25]:

$$R_A(k_r) \approx \exp\left(-\frac{v_z^2 \sigma^2}{2}\right) \left[-1 + \kappa_{iz} \int W(K_1) h(K_1) dK_1 \right], \quad (4)$$

其中, k_r 是入射波的水平波数, $\kappa_{iz} = k \sin \theta_i$ 是入射波的垂直波数。波数可由 $k(z) = \omega/c(z)$ 得到, 其中 ω 表示声波的角频率, $c(z)$ 表示海水声速。用 κ_{iz} 表示反

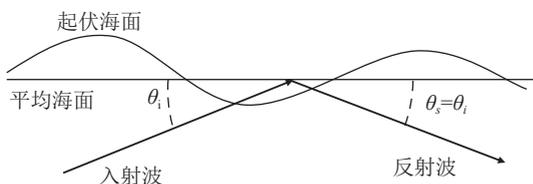


图 1 等效的起伏海面散射示意图

射波的垂直波数, 有 $\kappa_{iz} = -\kappa_{iz} = -k \sin \theta_i$ 。 v_z 表示入射波垂直波数和反射波垂直波数之差, 有 $v_z = \kappa_{iz} - \kappa_{sz} = 2k \sin \theta_i$ 。 σ 是海面的均方根波高, 用于描述海面的粗糙程度, 可通过下式计算:

$$\sigma = \frac{v^2}{20g_a}, \quad (5)$$

其中, v 表示海面上方 10 m 处风速, $g_a = 10 \text{ m/s}^2$ 。 $W(K_1)$ 是一维海浪谱, K_1 是海浪的波数。 $h(K_1)$ 是中间变量, 其表达式为

$$h(K_1) = \sqrt{k^2 - (k \cos \theta_i + K_1)^2} + \sqrt{k^2 - (k \cos \theta_i - K_1)^2} - 2k \sin \theta_i. \quad (6)$$

若式 (4) 只保留第 1 项则是基尔霍夫近似 (KA) 的结果: $R_A(k_{ix}) \approx \exp(-v_z^2 \sigma^2 / 2)$ 。由式 (4) 和式 (6) 可知, 反射系数的幅度 $|R_A|$ 随着均方根波高 σ 和入射角 θ_i 的增加而减小。

起伏海面下相干传播损失和非相干传播损失依然可由式 (1) 和式 (2) 计算, 但推导 k_{rm} 和 Ψ_m 时须改用起伏海面的边界条件:

$$\Psi(0) + g(k_r) \Psi'(0) = 0, \quad (7)$$

其中

$$g(k_r) = \frac{1}{i \sqrt{k^2(0) - k_r^2}} \frac{1 + R_A(k_r)}{1 - R_A(k_r)}, \quad (8)$$

式中起伏海面的反射系数 $R_A(k_r)$ 可由式 (4) 得出。将平整海面的反射系数 $R_A = -1$ 代入式 (7) 和式 (8), 式 (7) 将退化为式 (3)。

2 基于海洋环境信息统计分析声速分布和风速概率分布

对于某一固定浅海区域, 在海深和海底性质已知的情况下, 起伏海面散射对声场的作用强度与声速剖面有关^[1,15], 同时与海面风场有关^[1-2]。为研究东海某海域起伏海面散射引起的声传播损失的统计特性, 本文基于国家海洋环境预报中心提供的海洋环境信息数据, 统计分析该海域在不同季节的声速分布和风速概率分布。

该海域的海底地形如图 2 所示, 近似为平坦海底, 平均海深 70 m。海底底质为砂-粉砂-黏土 (STY), 根据 Hamilton 的海底声学参数模型^[26], STY 的声速为 1579 m/s, 密度为 1.596 g/cm³, 声衰减系数为

$$\alpha = K_a \cdot f, \quad (9)$$

其中, $K_a = 0.11$, 频率 f 的单位是 kHz, α 的单位是 dB/m。

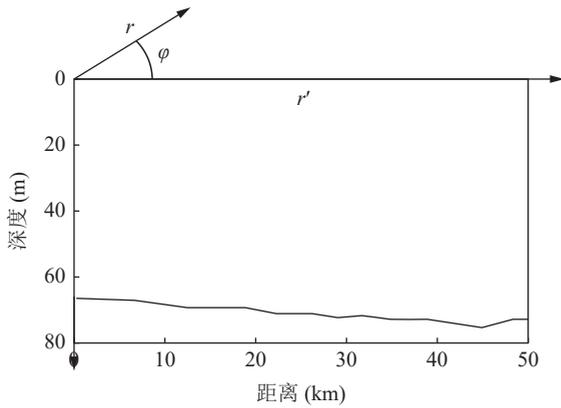


图2 东海某海域的地形图

2.1 声速分布的统计分析结果

为了统计该海域不同时间的声速分布情况, 分别对 2020 年海水温度和海水盐度变化进行分析。温度、盐度数据对应的海深范围是 0~50 m, 采样间隔是 24 h。由于日光照射强度的季节性变化加之风浪的搅拌作用, 海水温度呈现明显的季节性变化。其中较为明显的变化是, 夏季海洋表面受到日照, 海水温度升高且呈现负梯度分布。同时由于风浪的搅拌作用, 使得上层海水形成一个等温层, 而等温层下仍是一个温度负梯度层。因此, 分别按季节统计该海域的海水温度和海水盐度的平均值, 再根据海水中声速经验公式(乌德公式) 计算声速分布:

$$c = 1450 + 4.21T - 0.03T^2 + 1.14(S - 35) + 0.175P, \tag{10}$$

其中, c 表示声速(单位: m/s), T 表示海水中的温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), S 表示海水盐度(单位: ‰), P 表示海水中的静压力(单位: atm, $1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$)。声速统计结果如图 3 所示, 其中图 3(a) 为冬季(12 月至 2 月)结果, 图 3(b) 为春季(3 月至 5 月)结果, 图 3(c) 为夏季(6 月至 8 月)结果, 图 3(d) 为秋季(9 月至 11 月)结果。图中黑色、蓝色和红色曲线分别表示平均声速剖面、季初声速剖面和季末声速剖面, 季初或季末声速对应该季节的最大或最小声速。从图中可以看出, 夏季和秋季的平均声速较高, 在 1535 m/s 左右; 冬季和春季的平均声速较低, 大约为 1515 m/s。夏季平均声速剖面在水深 20 m 至 40 m 之间有一个负跃层, 其余三季平均声速基本呈现均匀分布。另外, 相邻季节季末、季初的声速分布是互相衔接的。

2.2 海面风场的统计分析结果

一般采用海面上方 10 m 处风速计算波高, 为了分析该海域的海面散射声传播损失的最大值和声场能量受起伏海面影响的时间占比, 对该海域 2020 年风速变化情况进行了统计。数据的采样间隔为 3 h, 统计结果如图 4 和图 5 所示。图 4 给出了不同季节的风速和风向, 极坐标系中某点与原点的距离表示风速, 该点的角度表示风向 φ_0 (从正北方向顺时针旋

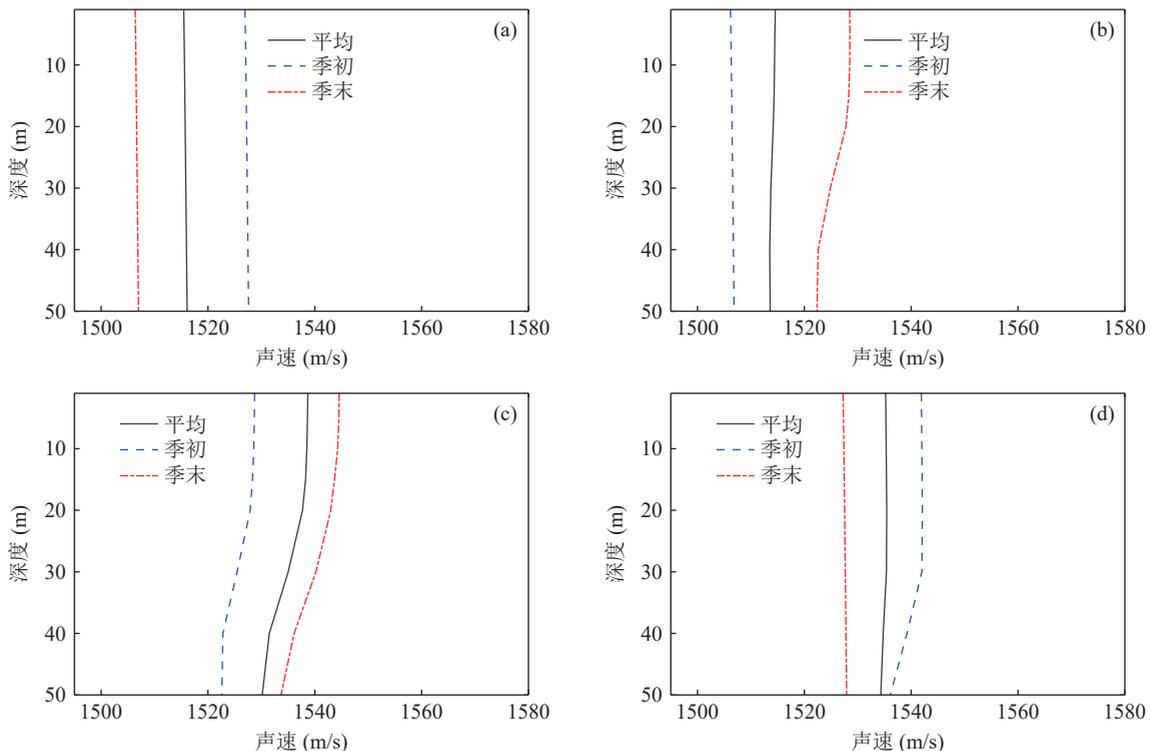


图3 各季节海水声速分布 (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季

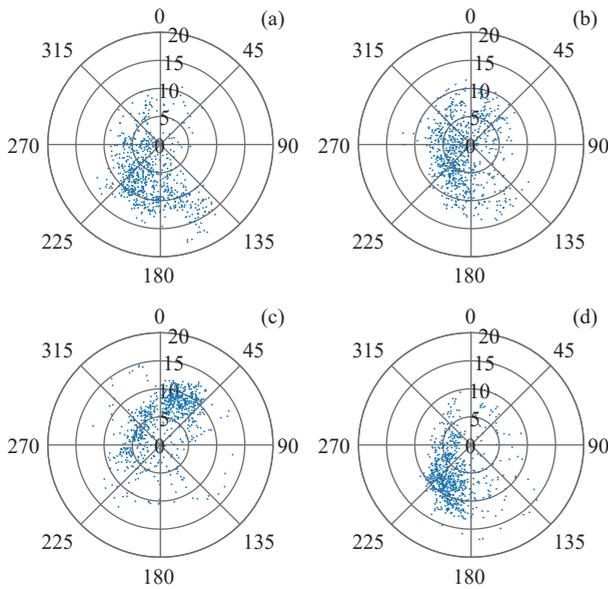


图4 不同季节的风速和风向 (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季

转的角度)。从图中可以看出风向呈现出季节性变化, 冬季和秋季的风向在西南方向附近 (对应图中 225°), 春季风向变化范围较大, 整体偏西 (对应图中 270°), 而在夏季风向整体向北 (对应图中 0°)。这是因为东海位于太平洋和亚欧大陆交界处, 海面风场受到季风的影响。假设图 2 中的距离方向为 r' 轴, 深度方向为 z 轴, 声源位于 z 轴上, 水听器位于 $r'-z$ 平面上。 r 轴指向正北方向, r 和 r' 的夹角为 φ 。若用 v_0 表示风速, 则距离方向 (r' 方向) 上的风速分量 v 为

$$v = v_0 \cos(\varphi - \varphi_0). \quad (11)$$

图 5 给出了全年海面风速随时间的起伏变化, 其中蓝色曲线表示风速 v_0 , 橙色曲线表示距离方向上的风速 v 。从图中可以看出该海域风速 v_0 在 0~18 m/s 范围随机变化, 而距离方向上的风速 v 的变化范围为 0~13 m/s。为了分析不同季节中声场能量受起伏海面影响的时间占比, 分别按季节对距离方向上的风速 v 的概率分布进行统计。将风速范围

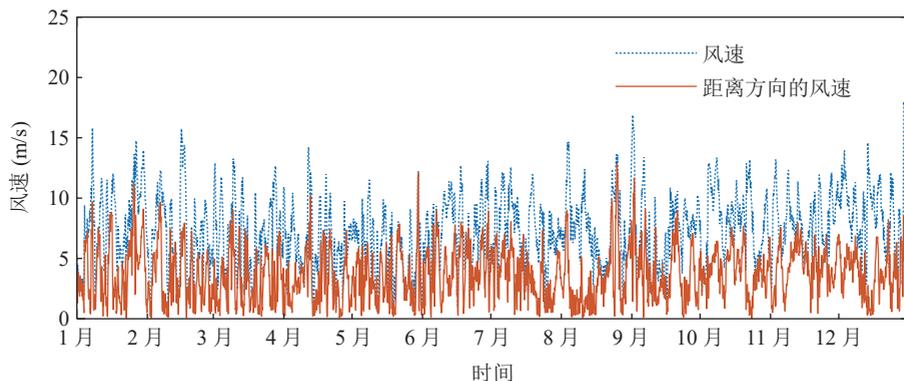


图5 全年海面风速变化

0~13 m/s 分为 6 组: 0~3 m/s 为一组 (该风速范围内的波浪起伏可以忽略不计), 3~13 m/s 以 2 m/s 间隔分为 5 组, 图 6 给出了每组风速出现的概率。

3 起伏海面散射引起的声传播损失

研究第 2 节所述海域中起伏海面散射引起的声传播损失。假设水听器位于海底, 分别研究声源位于水下 7 m 和水下 50 m 时的情况, 其中 7 m 处声源代表接近水面的目标, 50 m 处声源代表水下目标。声源的中心频率分别为 200 Hz 和 1000 Hz, 频带宽度为 1/3 倍频程。根据收发互易原理, 上述问题等效于声源位于海底, 接收深度分别为水下 7 m 和水下 50 m。本节将分析这两个接收深度在不同季节中的海面散射声传播损失, 并据此给出海面散射声传播损失 - 风速拟合公式, 然后结合风场统计结果计算传播损失的概率分布和声场能量受起伏海面散射影响的概率。

3.1 不同季节的海面散射声传播损失

用下式计算起伏海面散射引起的声传播损失:

$$\Delta TL_v = TL_{Inc,v} - TL_{Inc,0}. \quad (12)$$

为避免 ΔTL 随距离振荡, 使结果更有代表性, 采用式 (2) 计算得出的非相干传播损失, 其中 $TL_{Inc,v}$ 表示风速为 v 时起伏海面下的非相干传播损失, $TL_{Inc,0}$ 表示同一时段 (声速剖面一致) 平整海面下的非相干传播损失。为计算不同季节的海面散射声传播损失, 需要根据每个季节的平均声速剖面 (图 3), 使用 KRAKEN 程序分别计算每个季节不同风速下 (对应不同海面起伏程度) 的非相干传播损失。根据图 6 的风速统计结果, 仿真计算对应的风速范围应为 0~13 m/s。由式 (5), 风速在 0~5 m/s 范围内时, 海面的均方根波高不超过 0.125 m。经验证, 此时起伏海面对声场的影响很小, 可忽略不计, 因此可视为平整

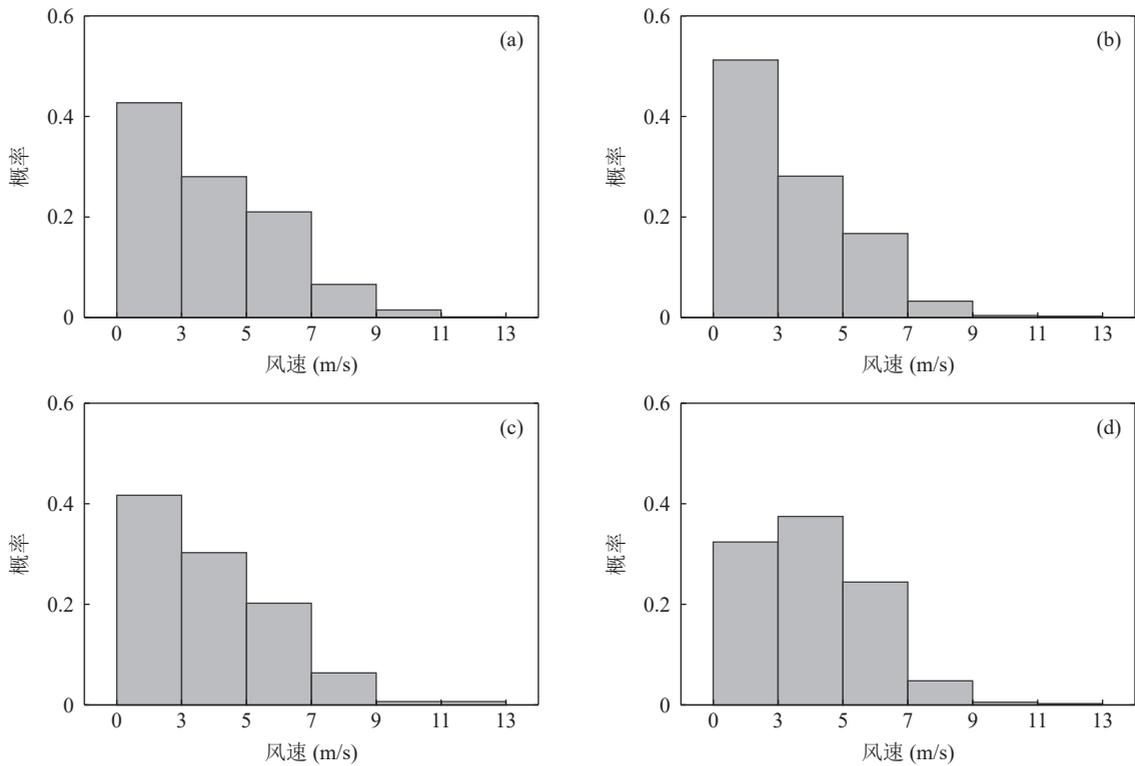


图 6 距离方向的风速 v 在不同季节的概率分布图 (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季

海面。风速在 5~13 m/s 范围内时, 可用每个区间的中点代表该区间的风速, 分别为 6 m/s, 8 m/s, 10 m/s, 12 m/s。由式 (5), 相应的均方根波高分别为 0.18 m, 0.32 m, 0.50 m, 0.72 m。值得注意的是, 当邻区的涌浪作用到本海域时, 涌浪叠加风浪, 海面起伏程度加剧, 真实的均方根波高将偏离式 (5) 的计算结果, 这时使用本文方法计算海面散射声传播损失将会产生误差。从全年范围来看, 本海域海面起伏主要由风浪引起, 因此本文仅统计风致起伏海面散射引起的声传播损失, 对涌浪和波浪叠加作用的讨论将在后续工作中展开。

3.1.1 接收深度 7 m

首先分析中心频率为 1000 Hz、接收深度为 7 m 的情况。根据式 (1) 分别计算冬季起伏海面下 (风速为 12 m/s) 和平整海面下的声传播损失, 结果如图 7 所示。由图可知, 起伏海面使声传播损失显著增加, 并且使声场干涉结构发生变化。

下面从简正波本征值的角度分析起伏海面下传播损失增加的原因。浅海中简正波的复数本征值可表示为^[18]

$$k_{rm} = k'_{rm} + i\xi_m, \quad (13)$$

其中, 实部 k'_{rm} 是简正波的水平波数, 虚部 ξ_m 是简正波的衰减系数, 即

$$\xi_m = \delta_m^s + \delta_m^b + \alpha_m^b + \alpha_m^w, \quad (14)$$

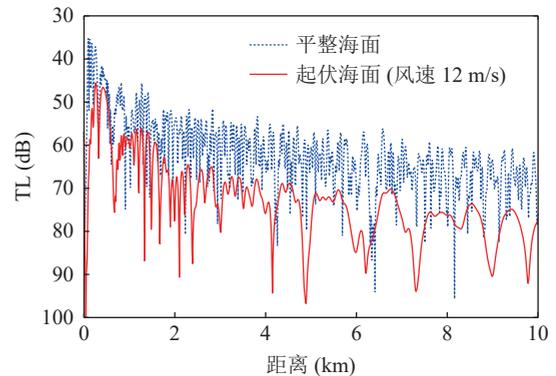


图 7 冬季起伏海面下和平整海面下的声传播损失 (频率 1000 Hz, 接收深度 7 m)

δ_m^s 和 δ_m^b 分别表示海面和海底散射引起的能量损失, α_m^b 和 α_m^w 分别表示海底吸收和海水吸收引起的能量损失。将式 (13) 代入式 (1), 得到

$$TL(r, z) = -20 \log_{10} \left| \frac{1}{\rho(z_s)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} e^{-\pi i/4} \sum_{m=1}^{\infty} \Psi_m(z_s) \Psi_m(z) \frac{e^{ik'_{rm}r} e^{-\xi_m r}}{\sqrt{k_{rm}}} \right|, \quad (15)$$

其中, $e^{-\xi_m r}$ 表示界面散射、海底吸收和海水吸收引起的能量损失。图 8 比较了冬季起伏海面下 (风速为 12 m/s) 和平整海面下前 60 号简正波的本征值, 其中图 8(a) 表示本征值的实部, 图 8(b) 表示本征值的虚部。从图中可以看出, 起伏海面下简正波本征值的实部 (水平波数) 和平整海面下一致, 而简正波本征

值的虚部(衰减系数)在起伏海面下的数值大于平整海面下的数值。再结合式(15)可知,简正波本征值虚部(衰减系数) ξ_m 的增加将导致声传播损失的增加。因此,起伏海面下的声传播损失大于平整海面下的传播损失。

对起伏海面和平整海面下声传播损失的差值,即起伏海面散射引起的声传播损失,进行统计分析。根据式(12)计算不同季节、不同风速条件下的海面散射声传播损失,如图9所示,随着距离增加,海面散射声传播损失先显著增加,而后趋于稳定。总体而言,在10~50 km范围内海面散射声传播损失随距离变化较小。图10给出了冬季风速为12 m/s时3组简正波的非相干叠加能量与总能量的比值,其中蓝色曲线表示低号简正波组的能量占比,

对应1~10号简正波,红色和黄色的曲线表示高号简正波组的能量占比,分别对应11~20号简正波和21~30号简正波。由于低号简正波随距离衰减较慢,而高号简正波随距离衰减较快,因此在不同距离上对声场有主要贡献的简正波不同。2 km内3组简正波都对声场有贡献,且11~20号简正波的能量占比最大;而在10 km以远,声场能量主要来自1~10号简正波。图11给出了3组简正波对应的掠射角和起伏海面下(风速为12 m/s)的反射系数,高号简正波对应的掠射角较大,同时其反射系数较小,即起伏表面对高号简正波的影响大于低号简正波。由以上分析可知,近距离声场的简正波数量较多,对应的掠射角范围较大,其中受起伏海面影响较大的高号简正波的能量占比较高,因此在近距离范围内,随着距离增

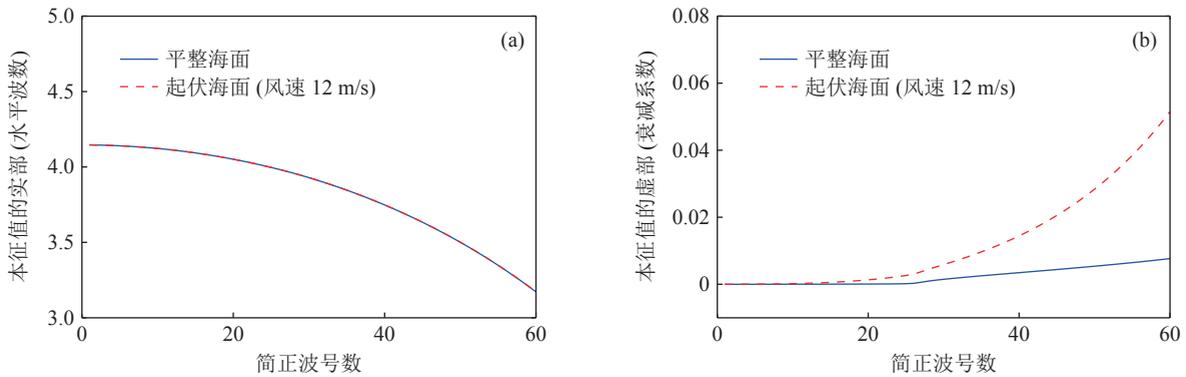


图8 冬季起伏海面下和平整海面下简正波的本征值(频率1000 Hz) (a)本征值的实部; (b)本征值的虚部

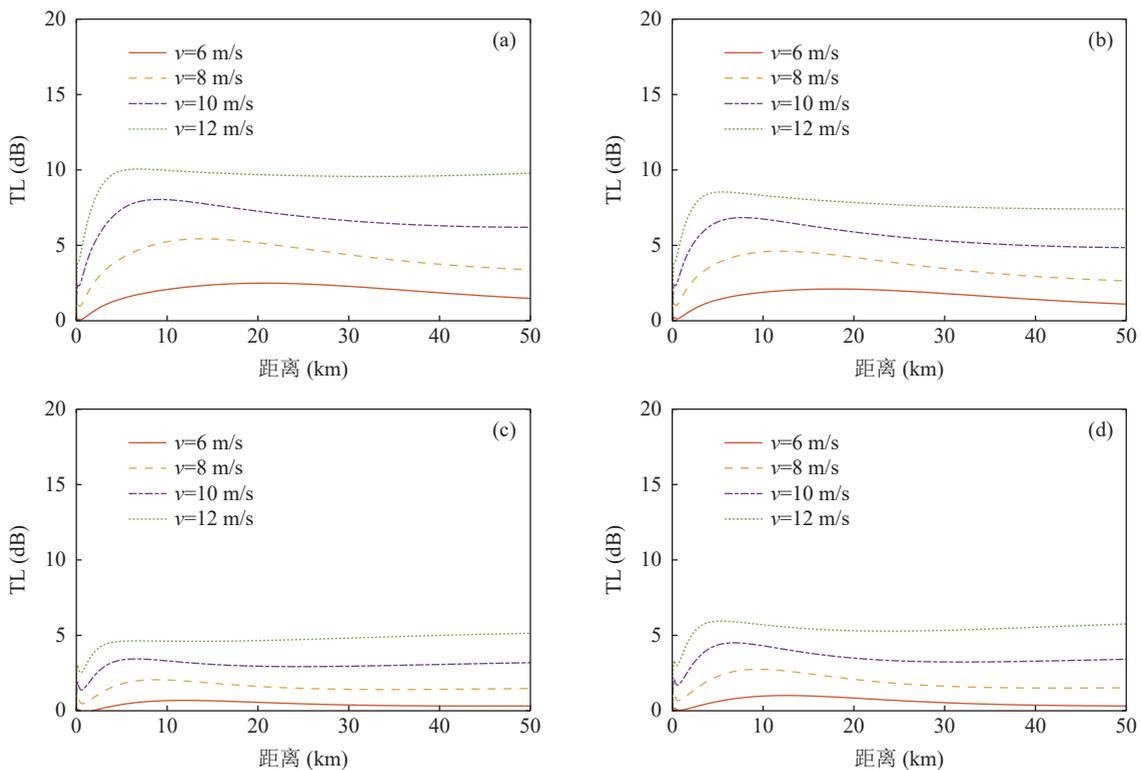


图9 不同风速下海面散射声传播损失(频率1000 Hz,接收深度7 m) (a)冬季; (b)春季; (c)夏季; (d)秋季

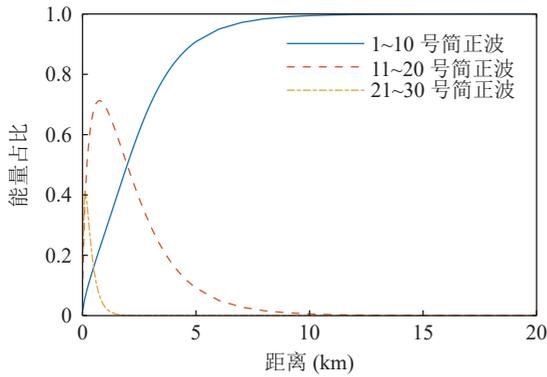


图 10 不同筒正波的能量占比 (冬季, 频率 1000 Hz, 接收深度 7 m, 风速 12 m/s)

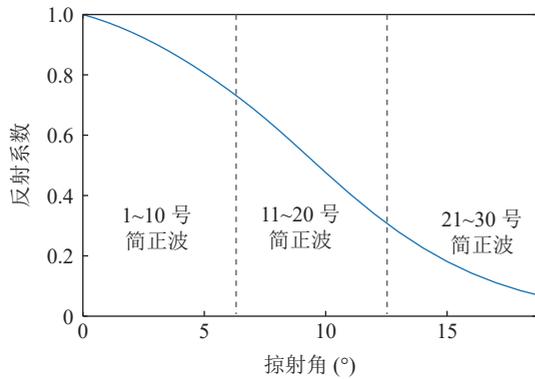


图 11 不同筒正波对应的掠射角和反射系数 (冬季, 频率 1000 Hz, 风速 12 m/s)

加, 累积的海面散射声传播损失增加较快。远距离声场的筒正波数量较少, 其中绝大部分是低号筒正波, 对应的掠射角范围较小且掠射角很小, 并且低号筒正波受起伏海面的影响相对较小, 因此在远距离范围内, 随着距离增加, 累积的海面散射声传播损失变化较为缓慢。以上是不同距离上海面散射声传播损失不同的主要原因。

不同季节的海面散射声传播损失存在差异 (图 9), 为进一步比较, 图 12 给出了不同季节传播距离 10 km 处的海面散射声传播损失。同一风速下, 海面散射声传播损失的幅度呈现季节性变化, 按照夏季、秋季、春季和冬季的顺序递增。风速为 12 m/s 时, 夏季、秋季、春季和冬季在 10 km 附近的海面散射声传播损失依次为 4.6 dB, 5.7 dB, 8.2 dB, 9.8 dB。冬季和夏季相差 5.2 dB, 差异最为显著, 这是因为冬季海水声速基本呈均匀分布, 声线沿直线传播, 绝大部分声线需要经过起伏海面的散射; 而夏季上层海水呈现微弱的负梯度, 使得声线在上层海水传播时向下弯折, 其中部分掠射角较小的声线在上层海水中反转、不经海面散射, 因此夏季上层声场能量受起伏海面的影响相对较小。同时, 起伏海面散射引起

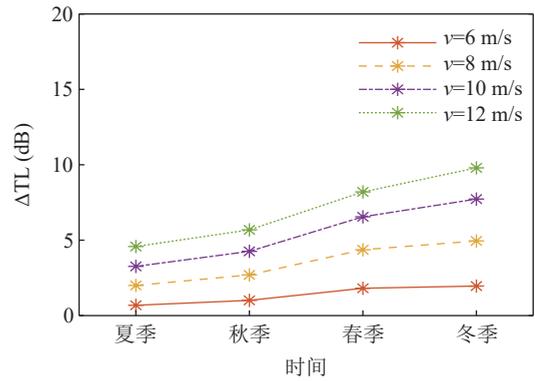


图 12 不同季节的海面散射声传播损失 (频率 1000 Hz, 接收深度 7 m, 传播距离 10 km)

的声传播损失随风速增加而增加, 冬季风速分别为 6 m/s, 8 m/s, 10 m/s, 12 m/s 时, 海面散射声传播损失约为 2.0 dB, 5.0 dB, 7.7 dB, 9.8 dB。从以上分析可知, 海面散射声传播损失与季节、风速和传播距离有关。

下面给出每个季节中季初或季末海面散射声传播损失与平均结果的偏离。图 9 是根据每个季度的平均声速剖面计算的平均海面散射声传播损失。季初和季末时海水的声速剖面明显偏离平均声速剖面, 如图 3 所示, 因此相同风速下季初和季末的海面散射声传播损失将偏离图 9 中的平均结果。图 13 给出最大风速 (12 m/s) 下季初、季末和平均海面散射声传播损失, 图中三者的对比验证了以上推论。同时可知, 在冬季、春季、夏季和秋季, 季初或季末海面散射声传播损失与季度平均海面散射声传播损失的最大差异分别在 2 dB, 3 dB, 1 dB, 3 dB 之内。

3.1.2 接收深度 50 m

本小节继续分析中心频率为 1000 Hz、接收深度为 50 m 的情况。图 14 给出根据平均声速剖面计算的冬季和夏季不同风速下的海面散射声传播损失, 季初或季末海面散射声传播损失与图中结果偏离 2 dB 以内。从图中可以看出两个季节海面散射声传播损失的差异非常显著, 风速为 12 m/s、传播距离为 10 km 时, 冬季海面散射声传播损失可达 10 dB, 夏季海面散射声传播损失不超过 3 dB, 二者相差 7 dB。由图 9 和图 14 可以看出, 夏季接收深度 50 m 的海面散射声传播损失明显小于接收深度 7 m 的海面散射声传播损失。这是因为夏季海水声速随深度呈负梯度变化, 且在深度 20 m 至 40 m 之间存在一个梯度较大的负跃层。从海底声源发射出的声线向上传播, 其中小掠射角的声线在负跃层内反转、不经过海面的反射 (即折射-海底反射声线), 而掠射角较大的声线 (即海面-海底反射声线) 传播到跃层上方并与

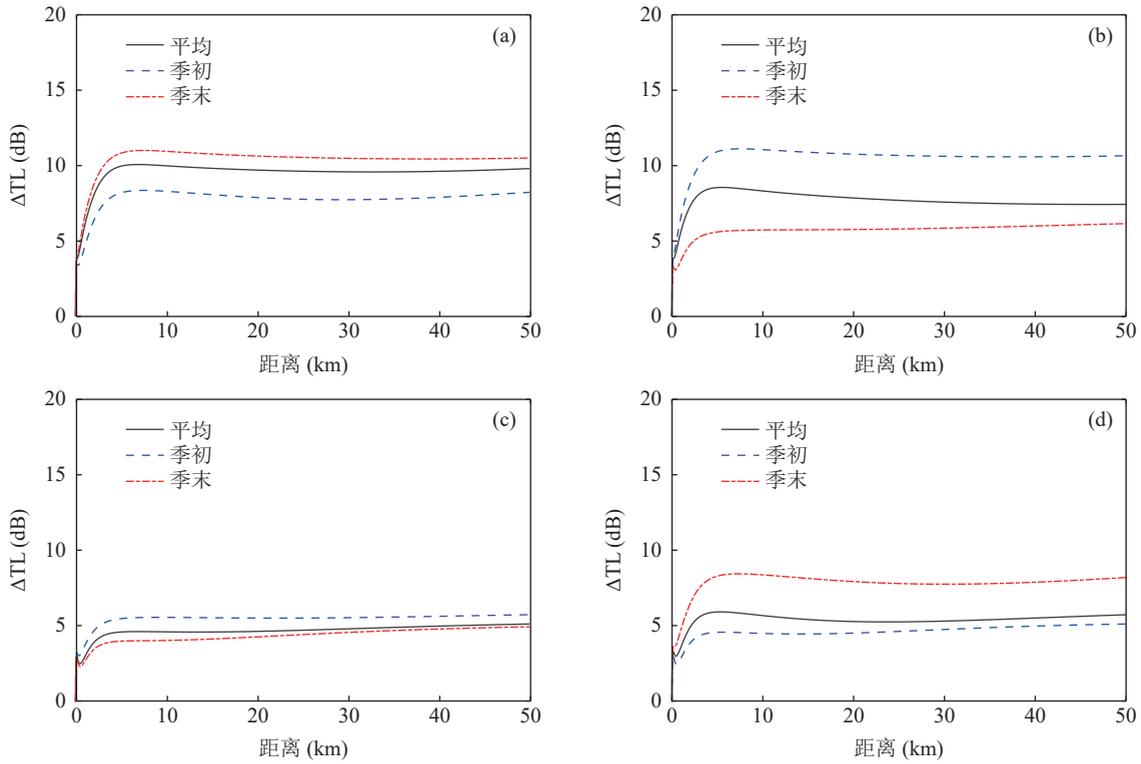


图 13 季初、季末和平均海面散射声传播损失 (频率 1000 Hz, 接收深度 7 m, 风速 12 m/s) (a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季

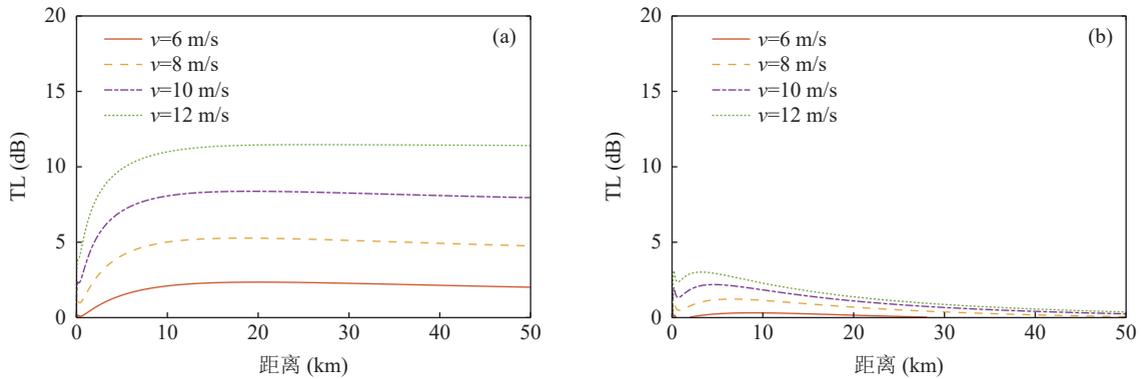


图 14 不同风速下海面散射声传播损失 (频率 1000 Hz, 接收深度 50 m) (a) 冬季; (b) 夏季

海面作用。到达深度 7 m 的声线大部分是海面-海底反射声线, 小部分是折射-海底反射声线; 而到达深度 50 m 的声线大部分是折射-海底反射声线, 小部分是海面-海底反射声线, 即经海面散射的声线较少。因此, 下发下收的海面散射声传播损失小于下发上收。此外, 夏季接收距离 10 km 内海面散射声传播损失随距离增加, 10 km 外海面散射声传播损失随距离减小, 如图 14(b) 所示。随着距离增加, 到达接收位置的海面-海底反射声线经海面反射的次数增加, 导致这类声线的传播损失随之增加。因此在 10 km 内海面散射声传播损失随着距离增加而增加。但是这类声线的掠射角较大, 海底反射系数较小 (图 15), 在传播过程中能量迅速衰减。因此, 随着距离增加, 这类声线的能量在声场中的占比逐渐降

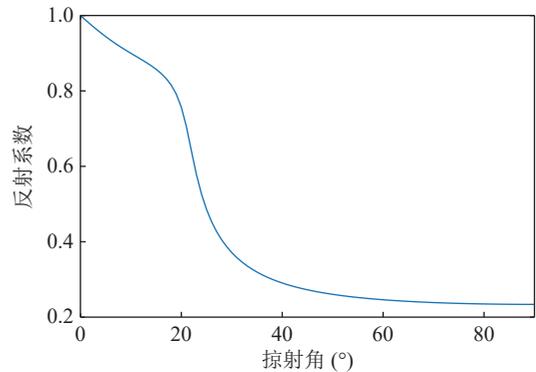


图 15 海底反射系数 (频率 1000 Hz)

低, 使得由此产生的起伏海面下声场和平整海面下声场的差异逐渐减小。在 10 km 外, 这种机制的效果超过了海面反射次数累积的效果, 导致海面散射

声传播损失随距离减小。图 9 和图 14 的结果在水声实验中可以用于估计海面散射声传播损失, 从而在数据分析中排除相关影响、减小实验误差; 同时可用于评估不同季节、不同风速下水声设备的工作性能。

3.2 海面散射声传播损失 – 风速拟合公式

下面给出起伏海面散射引起的声传播损失 ΔTL 关于风速 v 的拟合公式。Weston 假设传播距离 23 km 处海面散射声传播损失 ΔTL 关于频率 f 和风速 v 的函数为^[2]

$$\Delta TL = K f^{1.5} v^\beta, \tag{16}$$

其中, K 是和海洋环境相关的系数, f 的单位是 kHz, ΔTL 的单位是 dB。本文讨论中心频率 1000 Hz、接收深度 7 m、风速范围 0~16 m/s 条件下的 ΔTL 和 v 的关系。10~50 km 范围内海面散射声传播损失的变化较小, 如图 9 所示, 因此不妨用 20 km 的 ΔTL 数据代表该范围内的海面散射声传播损失。Weston 给出的风速系数 $\beta = 4$, 但在本问题中, $\beta = 4$ 时 ΔTL 与 v^β 不是线性关系。尝试将不同的 β 代入式 (16), 用最小二乘法进行线性拟合并计算系数 K 。经多次试验得到, $\beta = 2$ 时冬季和夏季的 ΔTL 都与 v^β 呈线性关系, 结果如图 16 所示。其中冬季海面散射声传播损失的拟合公式为

$$\Delta TL_{v,Wi} = 0.0667 f^{1.5} v^2, \tag{17}$$

夏季海面散射声传播损失的拟合公式为

$$\Delta TL_{v,Su} = 0.0322 f^{1.5} v^2. \tag{18}$$

在该海域中, 当中心频率为 1000 Hz、接收深度为 7 m 时, 可以用式 (17) 和式 (18) 快速地粗略计算 10~50 km 范围内起伏海面散射引起的声传播损失。

3.3 起伏海面下声传播损失的概率分布

在同一个季节中海面风速随时间不断变化, 海面的起伏程度也随之变化, 因此同一个季节中的声传播损失将在一定范围内起伏变化。根据图 6 的风速统计结果和每个季节不同风速下的相干传播损失, 可以计算不同季节中声传播损失的概率分布, 接收深度 7 m 和 50 m 的结果分别如图 17 和图 18 所示。其中冬季传播损失的分布较为分散, 夏季传播损失的分布较为集中, 同时下发下收传播损失的分布比下发上收更加集中。整体而言, 起伏海面对冬季声场的影响大于夏季, 对夏季下发下收声场的影响大于下发上收, 与上文的结论相符。

3.4 声场能量受起伏海面散射影响的概率

对 2020 年每个季节中起伏海面下声场能量受起伏海面散射影响的概率进行统计, 20 km 处的结果

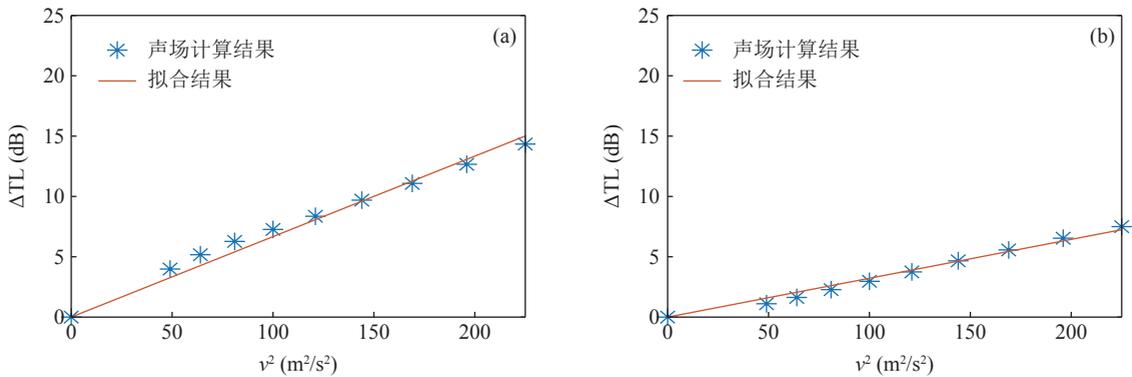


图 16 起伏海面散射声传播损失与风速的关系 (频率 1000 Hz, 接收深度 7 m, 传播距离 20 km) (a) 冬季; (b) 夏季

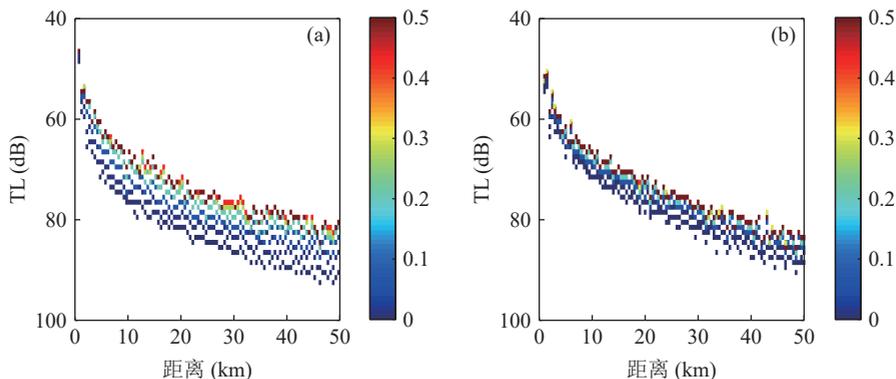


图 17 声传播损失的概率分布 (频率 1000 Hz, 接收深度 7 m) (a) 冬季; (b) 夏季

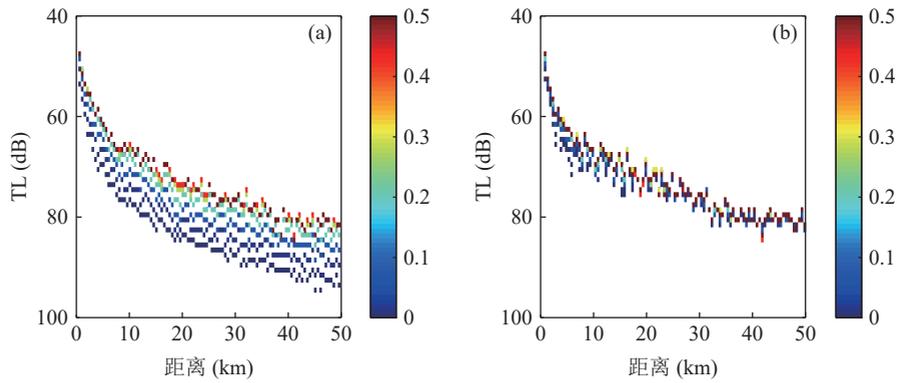


图 18 声传播损失的概率分布 (频率 1000 Hz, 接收深度 50 m) (a) 冬季; (b) 夏季

如表 1 所示。仿真中声源位于海底, 因此接收深度 7 m 和 50 m 分别对应下发上收和下发下收的情况, 表中分别给出了海面散射声传播损失大于 2 dB 和 5 dB 的风速范围和对应的概率。海面散射声传播损失大于 2 dB 时认为起伏海面对声场产生影响, 海面散射声传播损失大于 5 dB 时认为起伏海面对声场有显著影响。

表 1 展示了起伏海面散射对不同频率声场作用的差异。分别对 200 Hz 声场和 1000 Hz 声场在不同季节的结果求平均, 再对接收深度 7 m 和 50 m 的结果求平均, 可得全年中 20 km 处 200 Hz 和 1000 Hz 声场能量受起伏海面散射影响的平均概率分别是 0.8% 和 14.1%, 受到显著影响的平均概率分别是 0.1% 和 2.3%。由此可见, 起伏海面对 1000 Hz 声场的影响大于 200 Hz。根据瑞利公式 $Q = 2k\sigma \sin\theta_i = 4\pi f\sigma \sin\theta_i/c$, 在海面均方根波高和入射角度相同的

情况下, 瑞利参数随着频率的增加而增加, 因此起伏海面对高频声场的影响较大。

表 1 中 20 km 的结果可以推广到 10~50 km。从图 9 和图 14 可以看出, 当声波频率为 1000 Hz 时, 大部分情况下 10~50 km 范围内海面散射声传播损失的变化较小; 只有夏季接收深度为 50 m 时, 10~50 km 范围内海面散射声传播损失随距离增加而减小, 但其数值较小, 可忽略不计。因此可认为 10~50 km 范围内 1000 Hz 声场受起伏海面散射影响的概率约等于 20 km 处的概率。由此可以推出, 在 10~50 km 范围内 1000 Hz 声场全年受起伏海面散射影响的概率大约为 14%。因此, 对于浅海中全年运行的水声设备, 当声源频率为 1000 Hz、传播距离超过 10 km 时, 需考虑起伏海面散射对声场能量的影响。

从表 1 中也可以看出起伏海面的影响呈现季节性变化, 受影响的概率按照冬季、春季、秋季、夏季

表 1 2020 年声场能量受起伏海面影响的概率 (传播距离 20 km)

频率 (Hz)	接收深度 (m)	季节	起伏海面散射引起的声传播损失大于 2 dB		起伏海面散射引起的声传播损失大于 5 dB	
			风速 (m/s)	概率 (%)	风速 (m/s)	概率 (%)
200	7	冬季	≥ 10	1.6	≥ 12	0.1
		春季	≥ 10	0.7	≥ 12	0.3
		夏季	≥ 12	0.7	—	0
		秋季	≥ 12	0.3	—	0
	50	冬季	≥ 10	1.6	—	0
		春季	≥ 10	0.7	—	0
		夏季	—	0	—	0
		秋季	≥ 12	0.3	—	0
1000	7	冬季	≥ 6	29.3	≥ 8	8.2
		春季	≥ 6	20.7	≥ 10	0.7
		夏季	≥ 10	1.3	—	0
		秋季	≥ 8	5.6	≥ 12	0.3
	50	冬季	≥ 6	29.3	≥ 8	8.2
		春季	≥ 6	20.7	≥ 10	0.7
		夏季	—	0	—	0
		秋季	≥ 8	5.6	—	0

的顺序依次降低, 其中冬季和夏季的差异最为明显。频率为 1000 Hz、接收深度为 7 m 时, 上述四季对应的概率分别为 29.3%, 20.7%, 5.6%, 1.3%。此外, 频率分别为 200 Hz 和 1000 Hz 时, 深度 7 m 受影响的概率分别为 1.3% 和 0.7%, 而深度 50 m 受影响的概率都为 0。由此可知, 在夏季负跃层环境中起伏海面对下发上收声场的影响大于下发上收。

根据以上结果, 可以粗略估计其他年份不同季节中声场能量受起伏海面影响的风速下限和概率, 评估其对水声实验和水声设备工作性能的影响。

4 基于海洋环境信息的快速声场预报

本节提出一种基于海洋环境信息的快速声场预报方法, 该方法适用于在水下长期运行的声学设备。其实现流程如图 19 所示, 通过全年的温度盐度等环境信息数据可算出该海域每个月份的平均声速剖面, 再根据式 (1) 分别计算每个月份在无风和风速分别为 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, 10 m/s, 12 m/s 等条件下的声场, 其中声源深度与水声设备的布放深度一致。根据以上结果可以建立声速 - 风速 - 声场数据库, 需要预报该海域声场时, 只需测量风速或从气象预报中获取风速, 再根据月份和风速查询数据库即可快速得到声场数据, 无需再执行水文测量或声速数据反演以及计算声场等步骤。若对声速实时性要求较高, 需要反演声速剖面时, 该数据库中的每月平均声速剖面也可以作为评估反演结果的参考依据。

下面给出一个示例。2022 年 6 月某日, 该海域

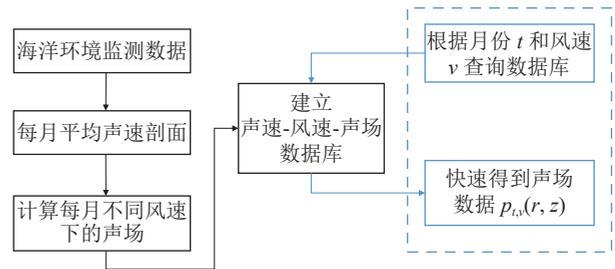


图 19 快速声场预报方法流程图

的风场预报为 6 级风, 风向为东偏南 15°, 由式 (6) 可知距离 r 方向上的风速分量为 11.9 m/s, 此时声信号的传播损失与数据库中 6 月风速为 12 m/s 时的声传播损失相近。直接查询数据库, 得到声源位于海底、频率 1000 Hz 的预报结果 (相干传播损失), 如图 20 所示。将平整海面下的声传播损失也绘制于图中, 再根据拟合公式 (式 (18)) 算得风速 12 m/s、下发上收、传播距离在 10~50 km 范围内的海面散射声传播损失大约为 5 dB。图 20(a) 为下发上收的情况, 接收深度为 7 m, 10~50 km 范围内海面散射声传播损失约为 5~6 dB, 与式 (18) 的计算结果基本相符。图 20(b) 为下发下收的情况, 接收深度为 50 m, 海面散射声传播损失不超过 3 dB, 与图 14(b) 给出的结果相符。根据图 20 和互易原理可知, 当天起伏海面的散射使得水面舰船发出的 1000 Hz 声信号传播到海底时能量下降 5 dB, 可能导致海底声阵探测能力和定位精度下降; 而水下目标发出的 1000 Hz 声信号传播到海底时能量下降不超过 3 dB, 对声阵工作性能的影响相对较小。

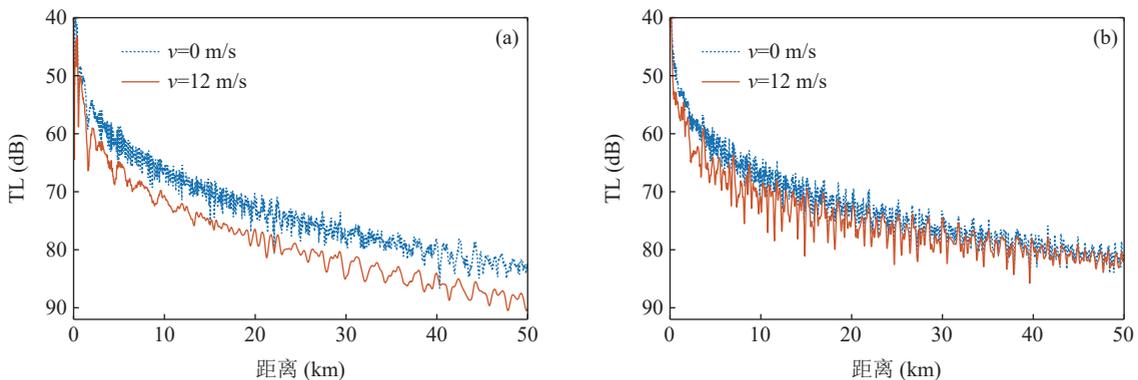


图 20 1000 Hz 的声场预报结果 (a) 接收深度 7 m, 下发上收; (b) 接收深度 50 m, 下发下收

5 结论

本文基于 2020 年的水文和气象数据, 计算了东海某浅海海域每个季度在平均声速分布和不同风速下的海面散射声传播损失, 给出了不同季节中声传

播损失的概率分布以及声场能量受起伏海面影响的概率, 总结了起伏海面散射引起的传播损失与季节和传播距离的关系, 并对其产生机理予以物理阐述。主要结论如下:

- (1) 对于浅海中全年运行的水声设备, 当传播距离超过 10 km 时, 需考虑起伏海面对声传播的影响。

(2) 声速剖面的季节性变化导致起伏海面散射引起的声传播损失也呈现季节性变化, 冬季海面散射声传播损失明显强于夏季, 并且在夏季负跃层环境中的下发上收的海面散射声传播损失大于下发下收。

(3) 海面散射声传播损失受到传播距离的影响, 1000 Hz 声波在 0~50 km 范围内传播时, 随着传播距离增加, 海面散射声传播损失先逐渐增加然后基本保持不变, 或先逐渐增加然后减小, 约在 10 km 处达到最大值。

本文给出的海面散射声传播损失 - 风速拟合公式、声场能量受起伏海面影响的概率以及基于海洋环境信息的快速声场预报方法等, 可用于水声研究的误差分析, 并为水声设备的设计和性能评估提供参考。

致谢 感谢国家海洋环境预报中心 (National Marine Environmental Forecasting Center) 万莉颖老师为本文提供了海洋环境信息的相关数据。

参 考 文 献

- Kuperman W A, Ingenito F. Attenuation of the coherent component of sound propagating in shallow water with rough boundaries. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1977; **61**(5): 1178—1187
- Weston D E, Ching P A. Wind effects in shallow-water acoustic transmission. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1989; **86**(4): 1530—1545
- 王鸿樟. 随机起伏表面引起的声音传播衰减. *声学学报*, 1986; **11**(3): 160—172
- 陈小泉, 马忠成. 小斜率近似方法分析粗糙界面声散射问题. *声学技术*, 2009; **28**(6): 725—728
- Kuo E Y T. Sea-surface scattering and propagation loss - Review, update, and new predictions. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 1988; **13**(4): 229—234
- Thorsos E I, Jackson D R. The validity of the perturbation approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1989; **86**(1): 261—277
- Thorsos E I. Acoustic scattering from a "Pierson-Moskowitz" sea surface. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1990; **88**(1): 335—349
- Ghadimi P, Bolghasi A, Feizi Chekab M A. Sea surface effects on sound scattering in the Persian Gulf region based on empirical relations. *J. Mar. Sci. Appl.*, 2015; **14**(2): 113—125
- Ghadimi P, Bolghasi A, Feizi Chekab M A. Acoustic simulation of scattering sound from a more realistic sea surface: consideration of two practical underwater sound sources. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2016; **38**(3): 773—787
- Bolghasi A, Ghadimi P, Chekab M A F. Sound scattering from rough bubbly ocean surface based on modified sea surface acoustic simulator and consideration of various incident angles and subsurface bubbles' radii. *J. Mar. Sci. Appl.*, 2016; **15**(3): 275—287
- 张灵珊, 彭朝晖. 粗糙海面空气中声源激发水下声场的影响. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014; **44**(9): 896—906
- Yan J, Su X J, Xu D, et al. Sound transmission from air into shallow water through rough sea surfaces by small slope approximation. *Chinese Journal of Acoustics*, 2020; **39**(1): 53—63
- Yan J, Su X J, Xu D. Sound transmission from air into deep ocean through rough sea surfaces by small slope approximation. *Chinese Journal of Acoustics*, 2016; **35**(4): 359—370
- 陈文剑, 郎鹏远, 尹爽, 等. 起伏海面环境下水声信道特性及估计方法. *应用声学*, 2018; **37**(5): 722—731
- Liu R Y, Li Z L. Effects of rough surface on sound propagation in shallow water. *Chin. Phys. B*, 2019; **28**(1): 423—430
- 汪洋, 刘清宇, 鹿力成, 等. 海面风浪影响下的浅海声传播预报方法. *哈尔滨工程大学学报*, 2020; **41**(8): 1163—1169
- 涂星滨. 风浪影响下的高频单载波水声通信技术. 博士学位论文, 厦门: 厦门大学, 2020: 41—54
- 王先华, 彭朝晖, 李整林. 海面波浪起伏对声传播的影响. *声学技术*, 2007; **26**(4): 551—556
- 孟昭然, 孙辉. 随机起伏界面声散射的实验与理论研究. *声学技术*, 2014; **33**(4): 299—303
- Zou Z, Badiéy M. Effects of wind speed on shallow-water broadband acoustic transmission. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2018; **43**(4): 1187—1199
- 刘今, 彭朝晖, 张灵珊, 等. 浅海涌浪对表面声道声传播的影响. *物理学报*, 2021; **70**(5): 195—204
- 姚美娟, 鹿力成, 郭圣明, 等. 小掠射角下高斯谱粗糙海面反射损失建模. *声学学报*, 2018; **43**(3): 315—322
- 冯丹平, 李伟清. 粗糙海面下的深海声传播特性. *舰船电子工程*, 2021; **41**(7): 189—192
- 姚美娟, 鹿力成, 郭圣明, 等. 几种典型的粗糙海面下的声传播计算方法. *哈尔滨工程大学学报*, 2019; **40**(4): 781—785, 850
- Williams K L, Thorsos E I, Elam W T. Examination of coherent surface reflection coefficient (CSRC) approximations in shallow water propagation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004; **116**(4): 1975—1984
- Hamilton E L. Geoacoustic modeling of the sea floor. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1980; **68**(5): 1313—1340