

特色专题

基于海洋环境噪声的地声参数反演

付佳宝^{1,2}, 黎洁^{1,2*}, 范军^{1,2}, 王斌^{1,2}

摘要 海洋环境噪声是海洋中自然现象和人类活动产生的声音总和。随着被动声学技术和信号处理方法的进步,这种噪声已从传统干扰源转变为获取海底信息的重要途径,可用于反演海底声速、声波衰减等关键参数。总结了当前利用海洋环境噪声反演海底地声参数的主要方法,根据原理将其分为3类:(1)基于噪声场空间特性的反演方法;(2)基于噪声互相关重构信道格林函数的反演方法;(3)基于数据驱动与智能优化算法的反演方法。分析了现有方法在复杂环境下稳健性不足、适用性受限等问题,并展望了未来研究方向,包括非平稳噪声场建模与特征提取优化、多源异构数据协同反演以及人工智能与物理机制的深度融合等。该研究对促进海底参数反演方法的实际应用、提升海洋环境监测能力具有重要价值。

关键词 海洋环境噪声;地声参数反演;垂直指向性;噪声互相关;格林函数;机器学习

地声参数反演是海洋声学研究中的关键问题,其主要目的是估计海底介质的物理特性,如海底分层结构、沉积层声速、密度和吸收系数等。这些参数的准确获取对于海洋声传播建模、海底地质探测和水下目标识别等均具有支撑作用^[1]。

传统的地声参数反演方法主要包括直接测量法^[2-3]和主动声源法^[4-5]。其中,直接测量法通过对海底沉积物进行局部采样并结合声学测试来获取声学参数,其采样过程复杂且测量结果仅能反映有限区域的特性。主动声源法通过发射特定声信号并接收声波传播响应来反演地声参数。这类方法具有较强的可控性和较为成熟的理论与数据处理流程,在水声工程中应用广泛^[6]。然而,主动声源法在应用时操作复杂且成本较高,在敏感海域或执行隐蔽任务时也易引发

系统暴露,降低安全性;此外,频繁使用主动声源还可能干扰海洋生态系统,限制其在特定环境下的可持续应用。20世纪中期,Knudsen等^[7]和Urlick^[8]基于理论建模与实测数据,将海洋环境噪声划分为表面噪声、生物活动噪声、人为活动噪声和热噪声等。Wenz^[9]提出经典的“Wenz谱”,系统描述了海洋环境噪声的普遍规律。其中,航船噪声主要集中在10~500 Hz的低频段,风成噪声主要集中在500~25000 Hz的中高频段,与水声中常用的主动声源频段近似。但相较于主动声源,海洋环境噪声无需额外激励,是海洋中永久存在的声场,包含了水下信道中水体及海底等环境信息^[10]。因此,通过分析环境噪声场的物理特性及时空变化规律等,可在无源条件下实现对地声参数的估计。

目前,基于海洋环境噪声的地声反演快速发展,形成了多种具有代表性的方法^[1]。本文将系统梳理其研究进展,重点归纳、分析和总结目前地声参数反演的方法,旨在为今后基于海洋噪声的地声参数反演方法发展提供参考。

1. 上海交通大学,海洋智能装备与系统教育部重点实验室,上海 200240

2. 上海交通大学,船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240

收稿日期:2025-05-06;修回日期:2025-09-08

基金项目:国家自然科学基金面上项目(12174256)

作者简介:付佳宝,博士研究生,研究方向为海洋环境噪声地声反演、水中目标探测等,电子信箱:jiaobao_fu@sjtu.edu.cn;黎洁(通信作者),副研究员,研究方向为海洋环境噪声地声反演、水中目标声散射等,电子信箱:jie_li@sjtu.edu.cn

引用格式:付佳宝,黎洁,范军,等.基于海洋环境噪声的地声参数反演[J].科技导报,2026,44(4):104-113;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.05.00021

1 海洋环境噪声反演地声参数研究进展

随着被动声学技术的发展,海洋环境噪声逐渐从传统意义上的干扰,转变为地声信息的重要载体。早期的研究主要集中于噪声场的空间相关性建模。1962年,Cron和Sherman^[11]建立了仅适于深海情况的环境噪声理论模型(C/S模型):假设海表面的噪声源指向性为 $\cos^p\theta$,得到海洋噪声的空间相关性只与水听器间距有关。Chapman^[12]在考虑声传播与海底反射的基础上进一步扩展了C/S模型,推导了噪声强度与掠射角的关系及其垂直相关函数,扩展了噪声模型在浅海的适用性。Buckingham^[13]基于简正波理论,将等声速、低衰减的浅海波导中的噪声垂直相关系数等效表示为由模态结构决定的平面波方向密度函数。Plaisant^[14]利用射线理论描述海洋表面噪声的传播,得到了噪声强度和空间相关函数随俯仰角及水听器间距的变化。Kuperman和Ingenito^[15]基于全波场理论提出了分层海洋噪声模型(K/I模型,图1^[15]),完整求解了从噪声源点到接收点的传播解,包括离散简正波与连续谱共同构成的浅海噪声场,并描述了噪声场在垂直方向上的非均匀分布特性。Harrison^[16]基于射线理论,构建了浅海环境噪声解析模型,引入海面、海底反射系数与吸收系数,在近似忽略多途效应与近边界非均匀性的条件下,实现了对垂直方向上噪声强度分布与空间相干性的统一建模。

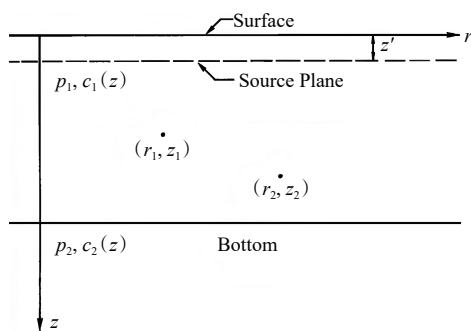


图1 浅海噪声场模型示意

在海洋噪声场建模理论不断完善和水声观测能力持续提升的基础上,研究者提出了多种利用海洋环境噪声进行地声参数反演的方法,逐步构建起以海洋环境噪声为核心的被动反演分析与应用框架。基于海洋环境噪声的地声反演方法归为3类:第一类是基于噪声场的空间结构特征,通过阵列获得噪声的角度

能量分布,结合垂直指向性曲线中的临界角特征,或提取不同掠射角方向的上行波与下行波的能量比值,推导反射系数并构建反射损失谱,从而反演海底临界角、沉积层声速、密度、吸收系数及厚度等参数。第二类是基于噪声互相关近似重构两接收点间格林函数,提取包含多途传播路径特征的信息,实现地声反演。第三类则引入特征压缩与深度学习等技术,提升反演效率并增强反演方法在复杂环境中的适应性。上述3类方法分别从噪声场结构建模、信道传播响应重构及数据驱动优化的角度出发,构成了目前被动地声反演研究的主要技术体系。

2 基于海洋环境噪声的地声反演方法分类与技术分析

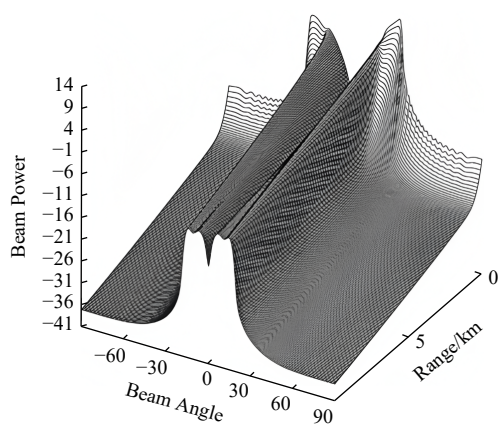
2.1 基于噪声场空间特性的反演方法

2.1.1 利用垂直指向性反演海底临界角与地声参数

基于噪声垂直指向性的反演方法通过分析不同掠射角上的能量分布,获取影响声传播的地声参数。Buckingham等^[17]指出,在无局部干扰的浅海波导中,由远距离噪声源激发的声场呈现明显的角度指向性,能量主要分布于 0° 至临界掠射角之间,并在临界角两侧迅速衰减。在此基础上,Yang等^[18]假设噪声源均匀分布于无限大海面,将噪声总场表示为远场离散模态项与近场连续谱项的混合叠加,即

$$B(\theta) = n_0 B_0(\theta) + \sum_{m=1}^M n_m B_m(\theta) \quad (1)$$

其中, θ 为掠射角, $B_0(\theta)$ 为近场噪声方向性函数, n_0 为其强度因子。 $B_m(\theta)$ 为第 m 阶简正模态的波束函数, n_m 为模态强度,其大小由声源对模态的激发以及海底损失决定,不同噪声源距离下噪声场垂直方向能量谱结构如图2^[18]所示。相关研究^[19-22]表明,在均匀海面噪声源场下,噪声场垂直指向性主要由上述2项构成,能量谱在临界掠射角附近呈现对称双峰和凹槽结构。其中,主峰对应多模态、传播高效的区间,凹槽出现在掠射角接近 0° 的区间。当掠射角大于临界角时,声场以近场连续谱为主,由于海底吸收作用,来自海面的正掠射角方向的能量大于来自海底反射的负方向。因此在测定噪声场垂直方向谱后,通过识别临界角可反演沉积层声速和衰减等参数。



近场噪声下能量主要集中在大角度方向(接近垂直入射),随着噪声源距离增加,能量在临界角附近迅速衰减,因此在远场噪声源激发下呈现“notch”结构

图2 当噪声源与接收阵列距离从近到远(0~10 km)变化时的垂直方向能量谱结构图

为提升反演方法在复杂环境下的适应性, Harrison^[23]将 Buckingham 的结论推广至非均匀声速情况,基于射线理论提出 CANARY 模型,获得非均匀剖面与倾斜海底下的声能角度分布与垂直阵列响应结构。Desharnais 等^[24]进一步引入了源深度与阵列姿态扰动修正机制,并结合非线性优化算法提高了反演精度与鲁棒性。在国内研究中,范军等^[25]基于射线声学推导了倾斜海底条件下的海洋环境噪声指向性公式,并分析大陆架区域不同声速分布对噪声指向性的影响,为复杂地形反演提供了计算依据。殷宝友等^[26]提出一种以简化海底模型为基础的混合建模方法,在小掠射角区域采用简正波法计算远场离散谱,大掠射角采用虚源法计算近场连续谱,并引入远场反射系数相位(P)、幅值(Q)以及近场海底反射系数 V_0 ,建立统一的反射损失框架,实现了简化分层海底的地声参数反演。江鹏飞等^[27]在此基础上提出了分步反演策略,针对不同地声参数对垂直指向性的不同掠射角区间的敏感度不同,用小掠射角部分反演声速与衰减系数,大掠射角部分反演海底密度与海底反射损失,有效降低了参数间的耦合,提高了反演精度与稳定性。考虑到噪声源分布和海面起伏的影响,江鹏飞等^[28]和周建波^[21]分别提出噪声源深度分布模型并分析海面起伏的影响效应,进一步完善了模型在实际海洋环境中的适应性。

2.1.2 利用垂直能量谱反演反射损失与地声参数

基于噪声场重构反射损失谱的反演方法,通过分

析声波在海底反射过程中的能量衰减,即海底反射损失(bottom loss, BL),实现对地声参数的反演。Aredov 和 Furdeuv^[29]最早提出噪声场的垂向能量分布可等效估计海底反射损失,并建立了噪声特性与海底参数之间的映射关系。Harrison 等^[30-33]基于实测数据验证了上述理论,并提出能流模型,如图 3^[30]所示。该模型将海洋环境噪声视为远场不相关的平面波源,认为上行能量主要来自海底反射,下行能量来自海面辐射。因此,不同掠射角和频率下的上/下行能流之比可近似表示 BL:

$$BL(\theta, \omega) \approx -10\lg(|R(\theta, \omega)|) = -10\lg\left(\left|\frac{B(-\theta, \omega)}{B(\theta, \omega)}\right|\right), 0 < \theta < \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

其中, $B(-\theta, \omega)$ 和 $B(\theta, \omega)$ 分别表示角度 θ 和频率 ω 下的上、下行波能量谱。利用垂直线阵可区分其传播几何关系,如图 4^[34]所示。通过解析反射损失 BL 随掠射角与频率的变化,可提取反射损失谱中临界角位置,并结合 Snell 定律反演沉积层声速等地声参数。

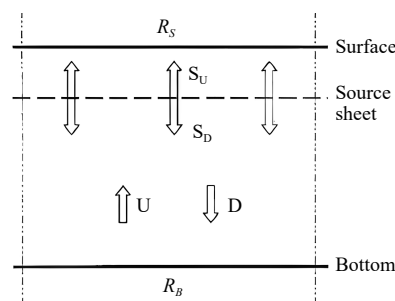
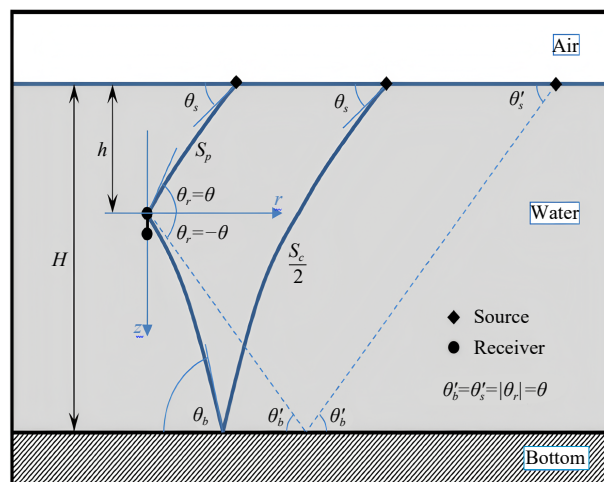


图3 浅海噪声场能流示意



虚线表示恒定声速下的直线传播路径,实线表示非均匀声速下的折射路径

图4 垂直线阵声波传播几何关系示意

在单层海底中,声波在掠射角小于临界角时发生全反射,反射损失较小;当掠射角超过临界角后,部分能量将透射进入海底,反射损失增加。在双层海底中,反射损失谱随频率呈现周期性干涉条纹,其间距由沉积层厚度与分层声速的共同影响,满足关系 $\Delta f \approx c/(2h\cos\theta)$ 。在更复杂的分层环境中,条纹会出现多层叠加与干涉效应的耦合特征。因此,通过拟合反射损失谱中的条纹周期与相位变化,可反演海底的层厚与声速。Harrison^[30-31]以半无限水体-两层沉积层-半无限海底为模型,如图5^[31]所示,采用逐步搜索与多参数拟合:先根据临界掠射角的位置反演沉积层声速,再由条纹间距反演沉积层厚度,最后调整密度与衰减系数,匹配条纹和小掠射角区域特性,从而实现声速、厚度、密度和衰减的联合反演。

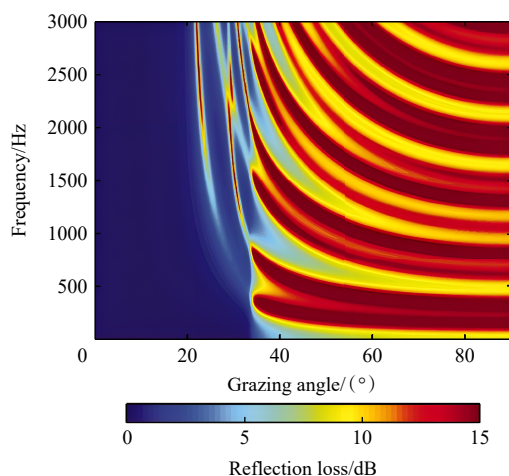


图5 半无限水体-两层沉积层-半无限海底环境下的海底反射损失

李赫等^[35]基于Harrison能流模型,利用垂直阵噪声提取海底反射系数谱,通过分析BL随掠射角变化的震荡结构实现了对双层海底声速与厚度的反演。Quijano等^[36]在该模型下考虑风成噪声指向性,将风速与频率相关的信噪比作为联合参数纳入建模体系,构建贝叶斯反演框架,并发展跨维方法以实现参数和模型结构的联合不确定性推断。江鹏飞等^[37]提出仅用2个垂直水听器的非迭代方法,直接提取海底反射系数谱,实现在低成本条件下的快速反演。Wang等^[38]结合波数积分前向模型与遗传算法,在宽掠射角反射损失谱基础上联合正演与反演计算,获得局部沉积层的声速与吸收系数,并在复杂边界条件下表现出更好的稳健性。

2.2 基于噪声互相关重构信道格林函数的反演方法

基于噪声互相关重构信道格林函数的反演方法利用接收阵列的噪声信号,计算接收点之间的互相关函数,通过分析重构格林函数中的直达波、反射波及临界角头波等多途传播结构,可反演水深、沉积层声速、厚度等地声参数。

该方法源于地震学,Rickett等^[39]发现2个被动传感器噪声信号的互相关在数学上等价于虚源-接收的冲激响应。Wapenaar等^[40-41]进一步提出地震干涉理论,建立了基于互相关函数重建三维格林函数的数学框架。该理论基于格林恒等式和互易原理,指出在各向同性、无耗散的均匀介质中,若噪声源均匀分布并形成扩散场(diffuse field),则接收点 x_A 和 x_B 的噪声信号 $u(x,t)$ 的互相关函数可近似重建其格林函数响应^[42-45]:

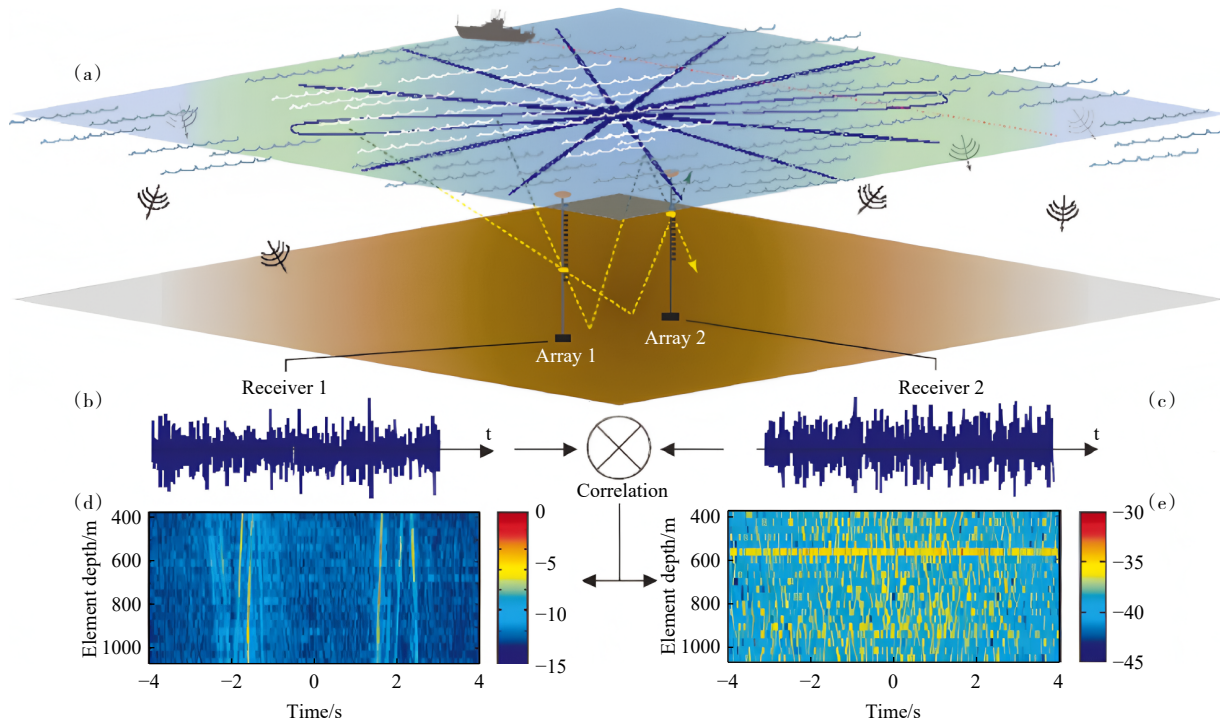
$$\{G(x_B, x_A, t) + G(x_B, x_A, -t)\} * S_N(t) = \langle u(x_B, t) * u(x_A, -t) \rangle \quad (3)$$

式中, $S_N(t)$ 为噪声源的自相关函数,*表示时间卷积。当 $S_N(t) \approx \delta(t)$ 时,互相关函数近似等于接收点间的格林函数。但实际中噪声源通常为非扩散型且单边分布(如地震或海洋噪声),难以满足传统格林函数重构所需的闭合源条件。Wapenaar^[46]指出,在不均匀介质中,内部多次散射可等效形成封闭传播路径,补偿缺失源项,也可实现格林函数的近似重构。

随后该理论框架被引入水声学并拓展至浅海波导环境。Roux等^[47]基于实测噪声数据成功提取出包含直达波、多路径反射波的相干波阵面结构,验证了互相关法在浅海中的适用性与准确性,技术示意如图6^[47]。Sabra等^[48]进一步完善了互相关和时域格林函数的关系,分析了噪声场指向性、水体衰减以及噪声源深度等对提取精度的影响,推动了互相关法在复杂水声环境中的发展。

2.2.1 利用被动测深法反演地声参数

Siderius等^[49]基于格林函数重构提出了被动测深法(passive fathometer),对垂直阵列不同接收点之间的 $\pm 90^\circ$ 噪声互相关,重构噪声经海底反射后的时域响应,结果如图7^[49]。通过识别直达波与反射波的传播时延,反演水深及海底分层结构等。Gerstoft等^[50]在一维波导假设下建立了数学模型,通过下行波场 $d_d(t)$ 与上行波场 $d_u(t)$ 的互相关函数提取反射序列,即:



(a)为海洋试验的基本说明图,水体中存在2个垂直阵,记为阵列1和阵列2;(b)(c)为阵列1和阵列2中两个阵元记录的噪声,对其做时域互相关处理;(d)为阵列1中深度为500 m的阵元与阵列2中的每一个阵元在同一时间接收到的信号进行互相关处理所得结果,可以看到直达波、海面反射波、海底反射波等相干结构;(e)为2个垂直阵列中阵元在不同时间段的噪声信号进行互相关处理所得结果,无明显特征

图6 利用海洋环境噪声互相关提取格林函数示意

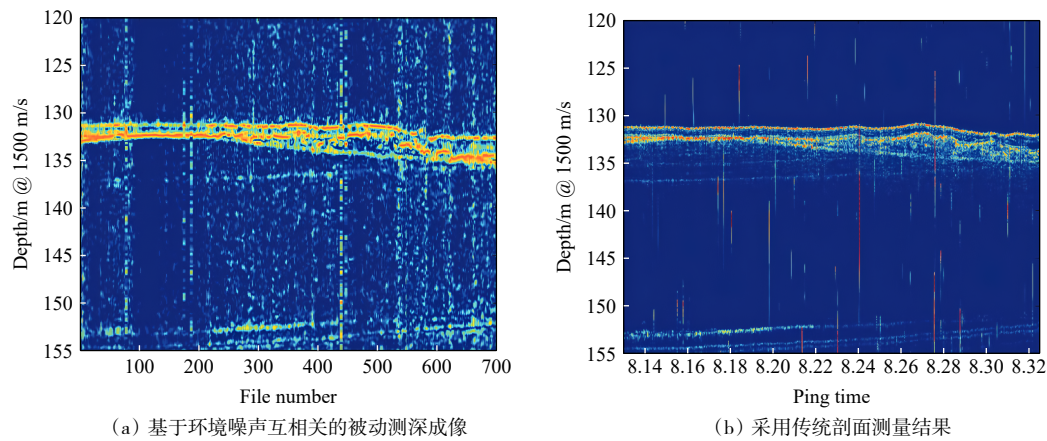


图7 利用环境噪声互相关处理结果与浅地层剖面得到的海底地形结果对比

$$c_{ud}(t) = d_u(t) * d_d(-t) = [w(t) * w(-t)] * h(t - 2\tau), \quad (4)$$

其中, $w(t)$ 为海面噪声信号, $h(t)$ 为海底反射响应, τ 为从阵列至海底的单程传播时间。在白噪声假设下,互相关的主峰延迟约等于2倍水深传播时间, $h(t)$ 序列中的多峰结构反映多层沉积层的反射信息。

为增强反射波互相关特征并抑制水平噪声, Siderius 等^[51]提出基于最小方差无失真响应(minimum

variance distortionless response, MVDR)的自适应被动测深法,通过波束形成构造上下行波束指向性权重,突出目标方向能量并重建反射损失序列,实现分层海底反演。国内学者也提出了多种信号增强策略:王奉宝^[52]采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)结合波数滤波技术提升主峰清晰度与到达识别能力。马超群等^[53]利用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)与经验正交函数(empirical

orthogonal function, EOF)提取垂向主模态,有效抑制水平噪声,增强了海底反射波的信噪比。此外,周建波等^[54]利用矢量水听器在垂直方向上的“8字”指向性抑制水平方向的噪声干扰,并结合垂直振速信息提取传递函数,实现了在复杂噪声背景下对沉积层声速和厚度的稳健反演。

2.2.2 利用虚拟头波法反演地声参数

除直达波与反射波外,头波是在临界角方向入射,沿双层介质界面以下层介质声速高速传播的一类界面波。Bevans等^[55]在浅海布设水平阵,利用飞机噪声激发头波,并通过匹配实测和理论头波水平相干函数的过零点反演沉积层声速。Siderius等^[56-59]提出在海底临界角方向的波束上进行互相关处理,提取环境噪声中的虚拟头波(virtual head wave)。虚拟头波和真实头波一样,具有高传播速度、临界入射角和强指向性特征。不同之处在于,虚拟头波并非实际点源激发,是由2个接收点信号之间的互相关所“重构”出的传播响应,因此到达时间相较于真实头波存在偏移。由于该方法不局限于垂直阵列,且可以拓展到临界角方向的传播路径,因此也被称为广义被动测深技术(generalized passive fathometer)。

Li等^[59-60]从格林函数重构的角度出发,探讨了虚

拟头波的形成机制及其在海底反演中的应用,随后提出一种适用于非均匀波导下的虚拟头波反演方法,利用头波传播时间并结合互相关函数提取出虚拟头波时间到达结构,实现水深与沉积层声速的反演。进一步,Li等^[61]将该模型推广至分层海底,如图8所示,指出分层波导中的每层界面均可产生虚拟头波结构,其传播时延与到达角度由各层的声速与厚度共同影响。在水-沉积层之间的第一层界面,虚拟头波互相关结构呈现出周期性特征;在更深层界面处的声波传播路径更加复杂,头波互相关结构虽不具周期性,但仍存在可识别的特征性传播规律。通过提取多层海底的虚拟头波时延结构,验证了该方法在Pekeris波导下、非均匀剖面及多层海底等复杂环境中的适用性,反演结果见图9^[61]。

为验证基于虚拟头波反演方法的稳健性,Yang等^[62]使用两条水平阵连续记录9个月的浅海噪声,通过波束形成与互相关提取头波结构,发现头波到达时延在不同季节条件下几乎不变,验证了反演方法的时间稳定性。在此基础上,Li等^[63]提出了基于漂流垂直阵的动态反演框架,利用多时间、多空间的环境噪声数据提取时变的虚拟头波互相关响应,从而反演沉积层地声参数。结果表明,水-沉积层界面的头波互相

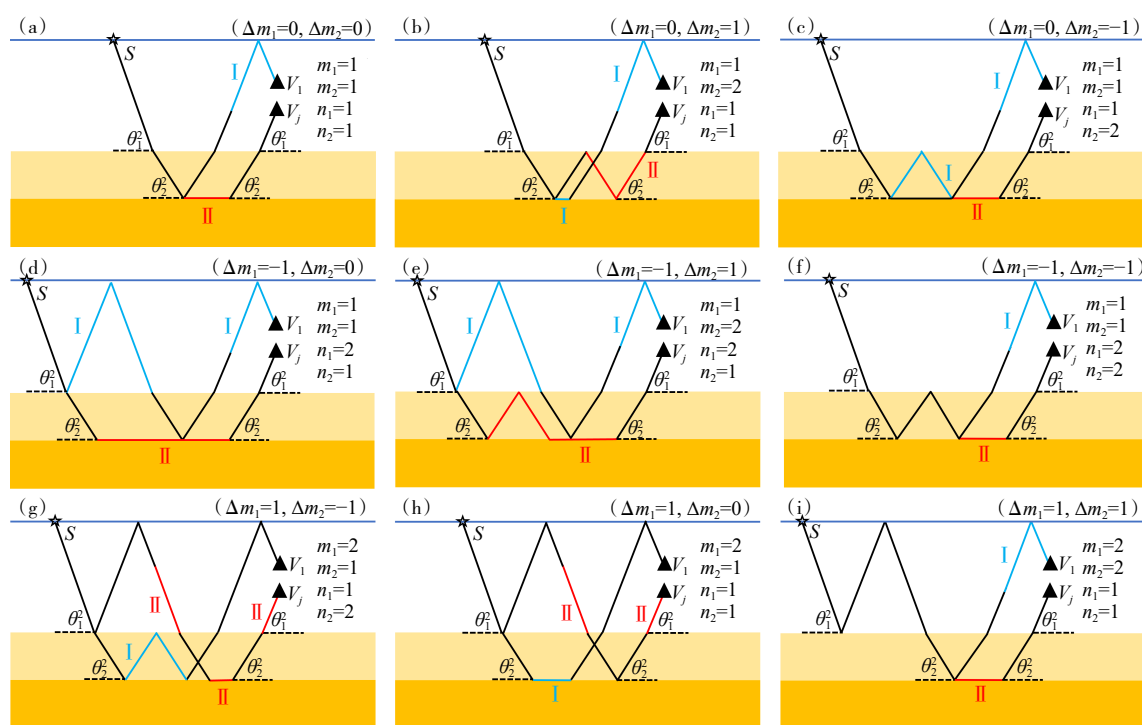
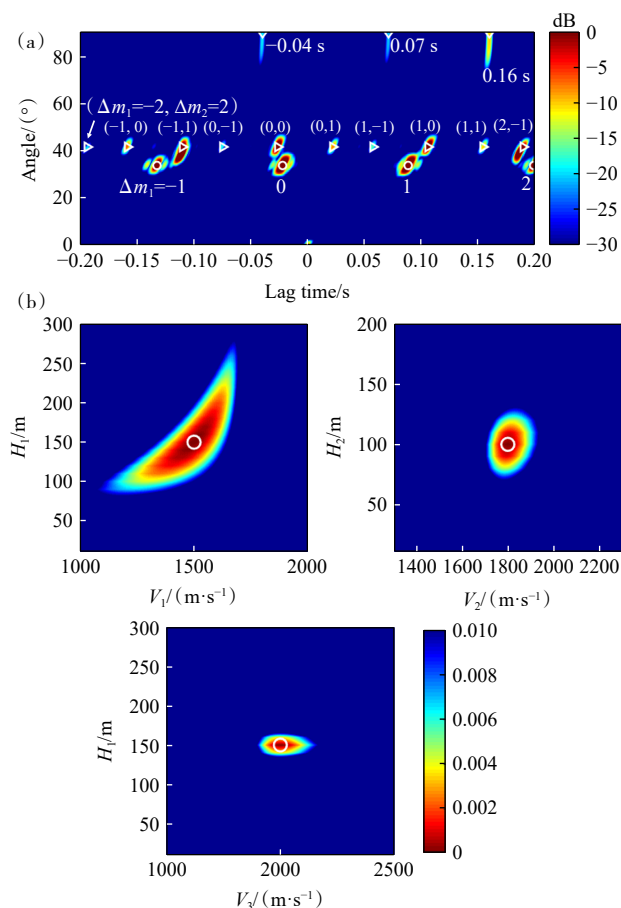


图8 分层海底环境中利用噪声互相关提取不同路径的虚拟头波示意



(a)显示了通过上下行波束互相关提取的时间-角度域互相关结果:其中○表示第一层界面(水体-沉积层1)的虚拟头波互相关结构,△表示第二层界面(沉积层1和沉积层2)的虚拟头波互相关结构,◇表示传统被动测深法所提取的垂直方向反射波互相关结果。(b)通过虚拟头波的反演结果与真实参数吻合,验证了分层海底反演方法的有效性与准确性

图9 均匀声速-双层海底环境中基于噪声场的虚拟头波互相关结构及反演结果

关结构在时空变化过程中仍保持稳定。该方法克服了传统短时平均方法的局限,拓宽了虚拟头波法在实际海洋环境动态观测与地声反演中的应用边界。

针对实际海洋环境中强干扰噪声对格林函数重构的干扰, Li 等^[64]将随机矩阵理论引入海洋噪声处理,提出基于奇异值统计推断的噪声提取方法。该方法无需阵列结构,使用单水听器数据即可分离非平稳强干扰,提升互相关函数的信噪比与稳定性,为环境噪声互相关法在复杂场景中的应用提供新途径。

综上,基于时域互相关的被动反演方法包括传统的被动测深技术和新兴的虚拟头波反演技术,两类方法均可在无源条件下利用环境噪声实现地声参数反演,是当前浅海被动声学反演的主要方向。

2.3 基于数据驱动与智能优化算法的反演方法

随着人工智能与统计学习的发展^[65],地声参数反演逐渐突破依赖匹配场与大规模搜索的传统范式,向数据驱动与智能优化方向迅速演进^[1]。在被动反演框架下, Yardim 等^[66]提出基于压缩感知的反演方法,利用浅海波导中声学界面的稀疏特性,将被动测深反演建模为稀疏表示问题,引入 L1 范数约束并结合遗传算法优化反演沉积层的声速、密度和衰减等参数,大幅提高了反演效率。Lau 等^[67]提出基于多通道船舶噪声谱图的深度学习方法,将地声反演转化为海底类型分类问题,通过训练残差卷积神经网络(ResNet-18),识别多通道谱图中的干涉结构,实现对海底类型的快速识别,避免了传统物理建模与多参数搜索的复杂性。

目前,以压缩感知、深度学习等技术为代表的驱动方法,通过构建声场观测量与地声参数之间的非线性映射,以智能优化算法替代传统的大规模搜索与匹配,降低了对物理建模的依赖,也显著提升了反演效率与自适应能力,在复杂海洋环境的反演中展现出良好的适应性与巨大的发展潜力。

3 结论与展望

系统综述了基于海洋环境噪声的地声反演方法,将其归纳为3类:(1)基于噪声场空间结构特征的反演方法,依托垂直指向性和反射损失谱等观测量,构建地声参数与噪声场响应之间的映射关系;(2)基于噪声互相关函数重构信道格林函数的反演方法,通过多途结构提取实现参数估计;(3)基于数据驱动与智能优化算法的反演方法。

上述方法在建模、数值仿真及海试中均取得了显著进展,展现出海洋环境噪声在地声反演中的应用潜力。但受限于环境噪声源的非稳态、波导复杂性多变以及测量系统精度,现有反演方法在稳健性、分辨率与适用性方面仍有不足。此外,不同反演路径间的融合机制、数据驱动与物理模型约束之间的平衡策略也有待探讨。因此,未来研究可在以下方面深入开展:一是提升噪声场建模与特征提取能力,解决非平稳噪声条件下的反演稳定性问题;二是探索融合噪声场空间结构与频率响应特征的综合分析框架,构建多源异构数据的协同反演机制;三是加强智能优化算法与物

理机制的深度融合,推动反演方法由经验驱动向数据驱动转型^[68],实现反演性能的全面提升。

参考文献 (References)

- [1] Chapman N R, Shang E C. Review of geoacoustic inversion in underwater acoustics[J]. *Journal of Theoretical and Computational Acoustics*, 2021, 29(3): 2130004.
- [2] Hamilton E L. Geoacoustic modeling of the sea floor[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 68(5): 1313–1340.
- [3] 卢博, 李赶先, 黄韶健. 海底沉积物声学的现场测量和取样系统[J]. *海洋技术*, 2000, 19(3): 31–33.
- [4] Rubano L A. Acoustic propagation in shallow water over a low velocity bottom[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1979, 65(Suppl 1): S17–S18.
- [5] 杨坤德, 马远良. 利用海底反射信号进行地声参数反演的方法[J]. *物理学报*, 2009, 58(3): 1798–1805.
- [6] Bonnel J, Pecknold S P, Hines P C, et al. An experimental benchmark for geoacoustic inversion methods[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 46(1): 261–282.
- [7] Knudsen V O, Alford R S, Emling J W. Underwater ambient noise[J]. *Journal of Marine Research*, 1948, 7(3): 410–429.
- [8] Urlick R J. Ambient noise in the sea[M]. Undersea Warfare Technology Office, Naval Sea Systems Command, Department of the Navy, 1984.
- [9] Wenz G M. Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1962, 34(12): 1936–1956.
- [10] 刘晓健, 崔乃刚, 刘雪峰, 等. 基于海洋环境噪声水下探测研究进展[J]. *数字海洋与水下攻防*, 2022, 5(6): 518–523.
- [11] Cron B F, Sherman C H. Spatial-correlation functions for various noise models[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1962, 34(11): 1732–1736.
- [12] Chapman D. Surface-generated noise in shallow water: A model[C]//*Underwater Communication and Position Fixing* 1987. Norwich, UK: Institute of Acoustics, 1987.
- [13] Buckingham M J. A theoretical model of ambient noise in a low-loss, shallow water channel[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 67(4): 1186–1192.
- [14] Plasiat A. Spatial correlation of surface generated noise[M]. London: Proceeding of UDT, 1992.
- [15] Kuperman W A, Ingenito F. Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 67(6): 1988–1996.
- [16] Harrison C H. Formulas for ambient noise level and coherence[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, 99(4): 2055–2066.
- [17] Buckingham M J, Jones S A S. A new shallow-ocean technique for determining the critical angle of the seabed from the vertical directionality of the ambient noise in the water column[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, 81(4): 938–946.
- [18] Yang T C, Yoo K. Modeling the environmental influence on the vertical directionality of ambient noise in shallow water[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1997, 101(5): 2541–2554.
- [19] 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.
- [20] 殷宝友, 马力, 林建恒. 浅海环境噪声垂直指向性探测海底参数[J]. *应用声学*, 2011, 30(1): 31–36.
- [21] 周建波. 海洋环境噪声场垂直方向空间特性建模及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [22] 单元春, 林建恒, 衣雪娟, 等. 远离航道海域低频海洋环境噪声垂直指向性[J]. *声学技术*, 2022, 41(5): 642–647.
- [23] Harrison C H. Noise directionality for surface sources in range-dependent environments[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1997, 102(5): 2655–2662.
- [24] Desharnais F, Thomson D J, Gillard C A. Source depth and array tilt effects on seabed inversion of ambient noise[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, 113(4 Suppl): 2204.
- [25] 范军, 汤渭霖. 浅海大陆架海洋环境噪声指向性计算[C]//船舶水下噪声学术讨论会. 水下噪声学术论文选集 (1985—2005), 2005: 364–369.
- [26] 殷宝友, 马力, 林建恒. 基于简化海底模型的浅海环境噪声垂直指向性及参数反演[J]. *声学学报*, 2012, 37(4): 424–431.
- [27] 江鹏飞, 林建恒, 马力, 等. 一种海洋环境噪声分步反演地声参数方法[J]. *声学学报*, 2016, 41(1): 59–66.
- [28] 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): 178–189.
- [29] Aredov A A, Furduev A V. Angular and frequency dependencies of the bottom reflection coefficient from the anisotropic characteristics of a noise field[J]. *Acoustical Physics*, 1994, 40: 176–180.
- [30] Harrison C H, Simons D G. Geoacoustic inversion of ambient noise: A simple method[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, 112(4): 1377–1389.
- [31] Harrison C H. Sub-bottom profiling using ocean ambient noise[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, 115(4): 1505–1515.
- [32] Harrison C H, Baldacci A. Bottom reflection properties

- deduced from ambient noise: Simulation and experiment[C]// Proceedings of Theoretical and Computational Acoustics 2003. World Scientific, 2004: 162–177.
- [33] Simons D G, van Moll C, Harrison C H. Inversion of shallow water ambient noise data by means of differential evolution as a global search method[M]//Acoustic Sensing Techniques for the Shallow Water Environment. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006: 265–279.
- [34] Muzi L, Siderius M, Quijano J E, et al. High-resolution bottom-loss estimation using the ambient-noise vertical coherence function[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 137(1): 481–491.
- [35] 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): 160–171.
- [36] Quijano J, Dosso S, Siderius M. Wind-driven underwater ambient noise for seabed remote sensing: A review of methods and results[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2022, 152(4Suppl): A270.
- [37] 江鹏飞, 林建恒, 孙军平, 等. 利用海洋环境噪声直接提取海底反射系数[J]. 声学学报, 2022, 47(1): 53–60.
- [38] Wang Z, Ma Y X, Kan G M, et al. An inversion method for geoacoustic parameters in shallow water based on bottom reflection signals[J]. Remote Sensing, 2023, 15(13): 3237.
- [39] Rickett J, Claerbout J. Acoustic daylight imaging via spectral factorization: Helioseismology and reservoir monitoring[J]. The Leading Edge, 1999, 18(8): 957–960.
- [40] Wapenaar K, Draganov D, Snieder R, et al. Tutorial on seismic interferometry: Part 1: Basic principles and applications[J]. Geophysics, 2010, 75(5): 75A195–75A209.
- [41] Wapenaar K, Slob E, Snieder R, et al. Tutorial on seismic interferometry: Part 2: Underlying theory and new advances[J]. Geophysics, 2010, 75(5): 75A211–75A227.
- [42] Wapenaar K, Fokkema J, Snieder R. Retrieving the Green's function in an open system by cross correlation: A comparison of approaches (L)[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 118(5): 2783–2786.
- [43] Wapenaar K, Draganov D, Robertsson J O A. Seismic interferometry: History and present status[M]. Society of Exploration Geophysicists, 2008.
- [44] Godin O A. Recovering the acoustic Green's function from ambient noise cross correlation in an inhomogeneous moving medium[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(5): 054301.
- [45] Snieder R. Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2004, 69(4 Pt 2): 046610.
- [46] Wapenaar K. Green's function retrieval by cross-correlation in case of one-sided illumination[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(19): L19304.
- [47] Roux P, Kuperman W A, Group T N. Extracting coherent wave fronts from acoustic ambient noise in the ocean[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 116(4): 1995–2003.
- [48] Sabra K G, Roux P, Kuperman W A. Arrival-time structure of the time-averaged ambient noise cross-correlation function in an oceanic waveguide[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 117(1): 164–174.
- [49] Siderius M, Harrison C H, Porter M B. A passive Fathometer technique for imaging seabed layering using ambient noise[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 120(3): 1315–1323.
- [50] Gerstoft P, Hodgkiss W S, Siderius M, et al. Passive Fathometer processing[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 123(3): 1297–1305.
- [51] Siderius M, Song H, Gerstoft P, et al. Adaptive passive Fathometer processing[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 127(4): 2193–2200.
- [52] 王奉宝. 基于EMD的噪声互相关提取时域格林函数研究[J]. 电子技术与软件工程, 2014(10): 82–84.
- [53] 马超群, 林巨, 张家铭. 利用海洋环境噪声反演海底参数[C]//2018年鲁浙苏黑四省声学技术学术交流会论文集. 青岛: 山东声学学会, 2018: 34–37.
- [54] 周建波, 朴胜春, 刘亚琴, 等. 利用矢量海洋环境噪声提取声场格林函数[J]. 声学学报, 2019, 44(3): 337–344.
- [55] Bevans D A, Buckingham M J. Estimating the sound speed of a shallow-water marine sediment from the head wave excited by a low-flying helicopter[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 142(4): 2273.
- [56] Gebbie J, Siderius M. Head wave correlations in ambient noise[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2016, 140(1): EL62.
- [57] Li J, Gerstoft P, Gao D Z, et al. Localizing scatterers from surf noise cross correlations[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(1): EL64.
- [58] Siderius M, Li J, Gerstoft P. Head waves in ocean acoustic ambient noise: Measurements and modeling[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 143(2): 1182.
- [59] Li J, Gerstoft P, Siderius M, et al. Virtual head waves in ocean ambient noise: Theory and modeling[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2020, 148(6): 3836.
- [60] Li J, Gerstoft P, Siderius M, et al. Inversion of head waves in ocean acoustic ambient noise[J]. The Journal of the Acousti-

- cal Society of America, 2020, 147(3): 1752.
- [61] Li J, Siderius M, Gerstoft P, et al. Head-wave correlations in layered seabed: Theory and modeling[J]. JASA Express Letters, 2021, 1(9): 096001.
- [62] Yang X S, Li F H, Zhang B, et al. Seasonally-invariant head wave speed extracted from ocean noise cross-correlation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2020, 147(3): EL241.
- [63] Li J, Gerstoft P, Siderius M. Synthetic head-wave correlations from ocean ambient noise on a drifting vertical line array[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2025, 157(5): 3220–3231.
- [64] Li G F, Liu J, Zhang S. Enhancing cross correlations of ocean ambient noise in the time domain based on random matrix theory[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2022, 152(5): 2849.
- [65] 蔡自兴, 蔡昱峰. 人工智能学科体系的构建与探讨[J]. 科技导报, 2025, 43(8): 15–26.
- [66] Yardim C, Gerstoft P, Hodgkiss W S, et al. Compressive geoacoustic inversion using ambient noise[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 135(3): 1245–1255.
- [67] Lau G E, Mortenson M C, Neilsen T B, et al. Ensemble approach to deep learning seabed classification using multi-channel ship noise[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2025, 157(3): 2127–2149.
- [68] 朱鹏飞, 姚鑫杰, 姜国崧, 等. 科学研究智能化转型: 基于AI的新范式及其深远影响[J]. 科技导报, 2025, 43(18): 16–22.

Review of geoacoustic inversion methods based on ocean ambient noise

FU Jiabaoyi^{1,2}, LI Jie^{1,2*}, FAN Jun^{1,2}, WANG Bin^{1,2}

1. Key Laboratory of Marine Intelligent Equipment and System, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
2. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract Ocean ambient noise refers to the sum of sounds produced by natural phenomena and human activities in the ocean. With the advancement of passive acoustic technologies and signal processing methods, this noise has shifted from a traditional source of interference to an important means of acquiring seabed information and can be used to invert key geoacoustic parameters such as seabed sound speed and attenuation. This paper systematically reviews the main methods for seabed geoacoustic inversion based on ocean ambient noise and categorizes them into three types according to the principles: (1) inversion methods based on the spatial characteristics of the noise field. (2) inversion methods based on reconstructing the Green's function via noise cross-correlation. (3) inversion methods driven by data and intelligent optimization algorithms. It analyzes key challenges faced by current methods in practical applications, including robustness, resolution, and applicability, and discusses future development directions. This study is of significant value for promoting the practical application of seabed parameter inversion methods and enhancing ocean environmental monitoring capabilities.

Keywords ocean ambient noise; geoacoustic inversion; vertical directivity; noise cross-correlation; Green's function; machine learning ●



(责任编辑 赵庆圆)