引文格式:刘经南,赵建虎,江鹏,等.海洋声道研究进展及我国发展的思考[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(10):2033-2047.DOI:10.13203/j.whugis20260375

Citation:LIU Jingnan,ZHAO Jianhu,JIANG Peng,et al.Research Progress of Ocean Channel and Thoughts on China's Development[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(10):2033-2047.DOI:10.13203/j.whugis20260375

海洋声道研究进展及我国发展的思考

刘经南[1,2,3] 赵建虎[3] 江 鹏[1,2,3,4] 高柯夫[1,2,3]

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

2 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

3 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

4 合肥综合性国家科学中心数据空间研究院,安徽 合肥,231299

摘 要:海洋声道在水下声信号远程传输、测距定位、水下目标探测、气候声学测温等领域具有十分重要的作用。首先介绍了海洋声道的概念及其空间分布、时空变化等特点;然后介绍了海洋声道研究的关键技术,以及海洋声道参数观测、声信号远程传输、环境变迁与细结构效应、声学层析与气候监测、北极与全尺度声学观测等领域研究的国内外进展;在此基础上,结合我国的海洋声道研究现状,分析了存在的差距,给出了我国海洋声道研究未来应有的重点发展方向。

关键词:海洋声道;声道观测;远程水声通信;声学测距与导航定位;水下目标探测;声学层析

中图分类号:P229 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-09-28

DOI:10.13203/j.whugis20260375 **文章编号**:1671-8860(2026)10-2033-15

Research Progress of Ocean Channel and Thoughts on China's Development

LIU Jingnan[1,2,3] *ZHAO Jianhu*[3] *JIANG Peng*[1,2,3,4] *GAO Kefu*[1,2,3]

1 GNSS Research Center, Wuhan University Wuhan 430079, China

2 Collaborative Innovation Center for Geospace Information Technology, Wuhan 430079, China

3 School of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

4 Institute of Dataspace, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 231299, China

Abstract: Ocean sound channels play important roles in underwater acoustic signal remote transmission, ranging and positioning, underwater target detection, temperature monitoring, etc. This paper first introduces the concept of ocean sound channel, spatial distributions and characteristics, as well as the key technologies used in ocean sound channel research. Then, the domestic and international progresses in fields such as ocean channel parameter observation, remote acoustic signal transmission, environmental change and fine structure effect, acoustic tomography and climate monitoring, and arctic and full-scale acoustic observation are summarized. Finally, comparing the domestic and international progresses and taking into account domestic demand, the future development directions of China's ocean sound channel research are given.

Key words: ocean sound channel; channel observation; remote underwater acoustic communication; acoustic ranging and navigation positioning; underwater target detection; acoustic tomography

覆盖地球表面约71%的海洋蕴藏着丰富的生物、矿产与空间资源,是全球气候变化、交通运输与国家安全的重要承载体,也是世界各国角逐的焦点之一。随着我国“海洋强国战略”的快速

基金项目:科技部重点研发计划(2024YFB3909704,2024YFB3909703);中国工程科技发展战略湖北研究院武汉分院咨询项目(HB2025B15);中国工程院科技战略咨询项目(2026-110-03);湖北省自然科学基金(2026AFC1156)。

第一作者:刘经南,教授,中国工程院院士,主要研究方向为大地测量理论及应用、大地测量坐标体系理论、导航位置服务和GNSS技术应用。jnliu@whu.edu.cn

通信作者:赵建虎,博士,教授。jhzhao@sgg.whu.edu.cn

高柯夫,博士,副教授。gao@whu.edu.cn

推进以及“十五五规划”纲要的制定,我国未来海洋工作的重点进一步明确,将以“经济发展—生态保护—权益维护”为框架,以深海、大洋和极地探测为新边界,以蓝色经济成为新增长,战略层级发生了新跃迁[1]。与此同时,海洋权益维护、资源勘探开发、深海科学研究与水声工程等对海洋环境认知及应用服务也提出了更高的需求[2]。

声波在海水中具有远距离传播特性,水声技术因此也成为认识海洋、利用海洋和保护海洋的最有效手段[3]。海洋声道的发现是水声学发展史上的一座里程碑。由于海水温度、盐度与压力随水深变化,声速垂直剖面存在一个声速极小值层,即声道轴。声波在声道轴附近因折射效应被约束在有限厚度水层内传播,能量损失低,因此可以实现数千公里甚至更远传输,该水层即为声道[4]。声波在海洋声道中的传播受温度、盐度、压力、海流、内波、中尺度涡等多种因素影响,其物理机制复杂多样[5]。深入理解海洋声道中声传播的规律,不仅是声学基础理论研究的重要内容,也是推动相关应用技术发展的关键前提。对声道的研究深刻改变了人类对海洋声传播的认知,催生了一系列重要应用研究,如探潜、声呐测距定位与导航、水下目标探测、远程水声通信及海水温盐等环境参数监测、声学层析成像、气候声学测温等,也将极大地促进我国海洋科学研究及海洋资源的开发和利用。

基于此,本文首先介绍了海洋声道形成的物理机理及声信号在声道中的传播特点;在此基础上,综合分析了国内外海洋声道研究取得的进展;最后结合我国需求与现状,思考探讨了我国未来海洋声道研究的发展方向。

1 海洋声道及其特点

海水声速主要受温度、盐度和压力影响。声速剖面在水表层和深水层常呈现“U”状变化,当声源位于声道轴附近时,向上偏离的声线进入声速随深度减小的负折射层后向下弯曲,向下偏离的声线进入声速随深度增大的正折射层后向上弯曲,声线因此在声道内围绕声道轴上下往复折返[5]。海洋中存在浅水/表水层声道和深水声道/深海声道(sound fixing and ranging channel,SOFAR)。由于声线束缚在声道内,几何损耗小,因此可实现超远距离传输(图1)。

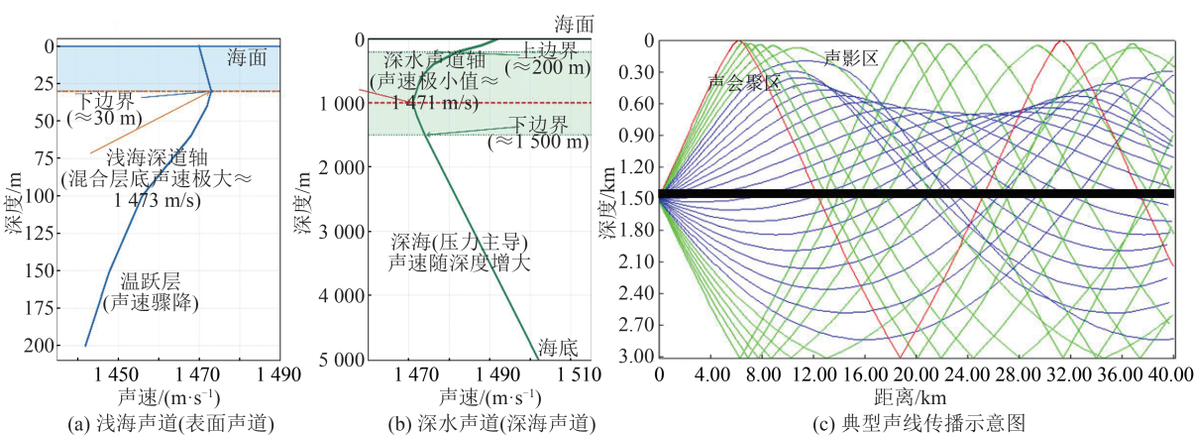


图1 声道及典型声线传播示意图[2]

Fig. 1 Sound Channel and Typical Acoustic Line Propagation Diagram[2]

不同频率和发射角下的多条声线在声道内会往复上下弯曲折射,形成声会聚区和声影区。声影区声强明显小于声会聚区;随着传播距离的增大,声会聚区变宽,声影区变窄。声道轴、会聚区和低耗损等特点非常适合利用声信号进行远程通信、测距、定位等应用[6]。

声道轴深度和轴速随纬度、海盆、洋流、温度等变化,有明显的时空变化特点。表层声道随外界气温和季节变化,深水声道相对稳定。深海声道在低纬海区声道轴深、轴速大,高纬海区则声道轴浅、轴速小。副热带海域声道最深(约1 000~1 200 m),赤道约800~1 000 m,中纬度约500~1 000 m,向极地高纬度方向声道轴逐渐抬升。如北印度洋孟加拉湾的声道深度约为1 100~1 750 m,阿拉伯海约1 450~1 950 m;大西洋声道轴声速从高纬度到低纬度约为1 441~1 503 m/s。中尺度涡旋、环流、内波、潮汐与海洋锋面运动相关,会引起声速场与声道轴位置的变化,因此声道还具有明显的区域差异性特点和环境敏感性特点。由于声道的上述特点,声道研究可以用于声学层析与气候监测等[2]。

2　海洋声道研究关键技术及挑战

2.1　声道参数获取技术

准确描述海洋声道结构及其变化需首先获取长时、高精度、高时空分辨率的声速及声信号参数。参数的获取可以通过实际观测和反演两个途径获取。

声道观测需要解决平台与站点建设、传感器研发等问题。固定站点主要有固定基站、锚系站等,移动系统主要有 Argo 浮标、水下滑翔机、拖曳式声速剖面仪等。利用低频大功率声源发射声信号,高灵敏度、宽频带水听器接收信号,固定站可以实现声速的高时间分辨率观测,移动观测则可以提升获取数据的空间分辨率[7]。针对大面积海域高精度描述声道需求,高密度平台和站点建设、高精度信号采集装备研发等仍面临较大的技术难题。

利用声信号的波形变化特点,采用匹配法、压缩感知法、外延法等可以反推/反演声道内声速的空间分布与环境变化[8]。以匹配法为例,通过将实际接收的声信号与不同环境假设下的理论传播模型计算结果匹配,可以反演得到海洋温/盐结构,无需大量投放传感器即可获取大范围内的声道参数,适合深海远洋观测。反演技术为声道参数的获取提供了一种低成本途径,但由于难以对声道参数的时空变化特点准确描述,反演模型的构建和反演精度的提升等方面研究仍需加强。

2.2　声传播建模技术

海洋声道是一个复杂的非均匀时变体,预测声波在声道中的传播规律需要精准的声场建模技术。抛物方程法、有限差分法、有限元法等利用声道的物理层化结构特点建模[9]。抛物方程法适合大尺度场景建模,三维抛物方程法则适用于复杂地形、中尺度涡影响下建模;有限差分法、有限元法适合小尺度建模。

传统建模方法存在计算复杂度高、实时性差问题。近年来深度学习技术发展迅速,基于深度学习的建模方法利用大量实测样本通过训练实现建模,建模精度远高于传统方法,但也面临样本量少、对计算机性能要求高、训练耗时较长和模型泛化能力需要提升等挑战。

海洋具有时空动态变化特点。从几百米尺度的内波、中尺度涡到几米尺度的温度细结构,都会改变声速剖面结构,进而导致声波在声道传播中产生散射、聚焦和干涉效应,引发声信号的幅度起伏和相位畸变[10]。声道参数观测与建模技术在一定程度上描述了大尺度结构影响,但在时间和空间分辨率方面均无法完全捕捉到中小尺度动力过程对声道的影响,尤其是内波破碎产生的小尺度不均匀性扰动。此外,这些影响的统计特征和对声传播的影响机理目前尚不清晰,因此中小尺度、动态海洋扰动对声传播的影响机理研究尚需深入。

将声学观测数据与海洋环流模式相结合的数据同化技术,是提高声道声场预报与环境认知水平的有效途径。海洋环境数据获取与同化还高度依赖观测资料的质量与覆盖率。尽管卫星遥感和浮标/潜标技术提升了数据量,但顾及多源数据在时空尺度和误差特性上的差异,如何同化和融合这些异构数据并用于建模仍是一个有待深入研究的问题。

2.3　声道信号检测与处理技术

声波在声道中的传播是实现声道观测及应用的基础。声信号传播主要受海洋环境噪声、多途效应、非线性效应等影响,因此削弱这些影响成为准确检测声道信号的核心技术[11]。

海洋声道中存在大量环境噪声,远距离声道探测信号到达接收端时能量微弱,甚至淹没在噪声中。基于相关接收信号处理的弱信号检测技术,利用声道传播的相干特性可以从强噪声中提取出有效信号,但相关技术研究仍需深入。

海洋声道的波导特性也会导致声传播存在严重的多途效应。同一发射信号会沿不同路径到达接收端,不同路径的信号存在时延扩展,尤其对于远距离通信,进而导致通信信号畸变、信号检测中出现多径干扰等问题。多途效应目前主要借助信道均衡、阵列信号处理等技术来削弱,但这些算法的跟踪能力与抗干扰能力仍显不足,尤其在极地冰下环境。

声波在海洋声道中远距离传播时会产生非线性效应,导致波形畸变和能量转换,不仅会改变传播损失,还会产生大量的倍频成分。目前,对于大尺度、长距离传播中的非线性效应机理研究还不充分,理论计算结果和实测数据存在较大偏差。

2.4　长距离声道实验验证技术

海洋声道研究是典型的实验驱动型学科,理论模型和应用均需要实验验证,长距离声学实验技术体系是研究的基础。实验技术体系主要包括大功率低频声源技术、大孔径接收阵列技术、高精度同步技术、声信号检测与处理技术等[12]。由于低频声波传播具有衰减小和距离远等特点,因此需要研发

工作频率为几十赫兹、声源级可达200 dB以上的大功率换能器。为捕捉远距离传播后微弱的声信号,需要研发由数十个水听器组成的阵列,通过波束形成技术提高信号增益,压制环境噪声。长距离传播实验中,对传播时间的测量精度直接影响声速反演结果,时间同步精度需要达到微秒级,因此高精度同步技术也是目前需要解决的难题。

3 国外海洋声道研究进展

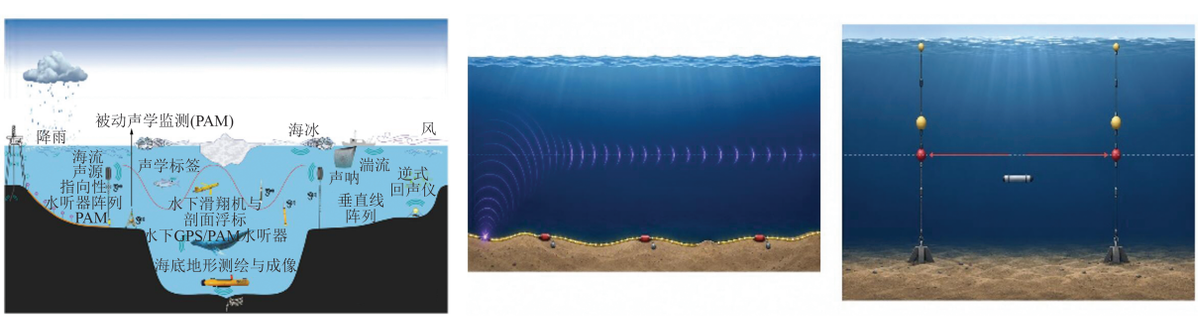
自20世纪40年代美国科学家EWING与苏联科学家BREKHOVSKIKH发现深海声道现象以来[13],以美国、俄罗斯、日本等为代表的海洋强国在海洋声道观测、声道理论、声信号远程传播、环境变异性与细结构效应、海洋声学层析与气候监测、北极与全球尺度声学观测等领域取得长足的发展。

3.1 海洋声道观测技术与装备

早期的声道观测主要通过爆炸声源产生声波、水听器在固定站点上接收声信号来实现。现代声道观测的发展主要体现在观测平台/网络的全球化、声源和接收阵列的进步两个方面。

在观测网络的建设方面,目前已形成了由固定式网络、移动式平台、分布式传感、自主式无人系统四大体系协同运行的格局(图2)。

代表性的固定式网络系统主要有美国的声波监听系统(sound surveillance system,SOSUS)、综合水下监视系统(integrated undersea surveillance system,IUSS)和全面禁止核试验条约组织的国际监测系统(international monitoring system,IMS)。IUSS继承并整合了SOSUS,是目前全球规模最大、技术最成熟的观测/监测系统。IUSS采用固定海底水听器阵列,利用10 Hz~1 kHz低频声波探测数百海里海洋声信息;IMS在全球部署了11个台站,部分水听器布设在SOFAR声道轴深度(600~1 200 m),声信号覆盖太平洋、大西洋和印度洋。分布式声学传感(distributed acoustic sensing,DAS)将全球分布的约150万km的海底通信光缆作为传感器阵列,对声道参数进行观测,是近年来发展最快的声道观测技术之一。



(a) 多用途声学观测系统 (b) DAS (c) 锚系收发器与声学层析

图2 多用途声学观测系统、DAS、锚系收发器与声学层析示意图[14]

Fig. 2 Multifunctional Acoustic Observation System, DAS and Moored Transceivers for Acoustic Tomography[14]

固定式网络系统满足了声道研究对高时间分辨率数据需要。为获取高空间分辨率数据,产生了以拖曳式阵列声呐系统(surveillance towed array sensor system,SURTASS)为代表的移动式观测系统。SURTASS利用船舶拖曳阵列传感器,通过移动观测不同水域的声道参数;自主式水下无人水听器阵列则锚系在SOFAR声道轴深度,长时间观测声道参数,提高了声道观测机动性,降低了观测成本。此外,Argo系统也被引入观测网络。国际Argo浮标计划已成为全球声速剖面与声道参数气候态计算的主要数据来源,并正向覆盖全水深的OneArgo阵列拓展。

国外声道观测在发展观测装备的同时,已经形成了从局域到全球的观测态势,并构建了固定+机动的观测网络体系,以满足声道研究对高精度、高时空分辨率数据的需求。

3.2 海洋声道基础理论

1)声传播波导理论,主要研究声波在分层海洋波导中的激发、传播与衰减规律,先后发展了射线理论、简正波理论和抛物方程模型,形成了数值求解方法体系[5]。当前,波导理论数值求解正从二维向三维拓展,并向物理-数据融合的智能网络模型演进。

2)会聚区与焦散结构理论,主要揭示声道中声线聚焦形成高强度会聚区的物理机制,描述焦散线附近的声场。形成的指数分层解析模型为会聚区参数的定量预报奠定了基础[15],渐近理论为焦散区均匀化声场计算提供了统一数学框架,

反转点会聚区理论扩展了上述理论的适用性,综合构建了定性解释-定量预报-精确计算-全球适用的完整链路,且正向三维动态预报方向演进。

3)声道波动与声场起伏理论,主要研究内波、潮汐、锋面、中尺度涡旋等动力过程引起的声速场时空变化及其导致的声传播起伏。先后发展了内波谱标准模型(Garrett-Munk谱)[16]和描述声道起伏的随机理论[17]。

4)声速方程与参数反演理论,主要解释声速与温度、盐度、压力的定量关系,以及从传播时间反演环境参数的反问题理论与方法。在声速方程方面,先后发展了Wilson方程、Del Grosso方程、Chen-Millero方程等;在声速参数反演方面,发展了匹配场层析法和声层析成像法[18],实现了从数据到参数的数学映射。

5)远程混响与环境噪声理论,主要研究声道约束下混响强度的远程衰减规律、深海环境噪声的垂向与水平分布特征,以及噪声信道中的信号检测极限。先后形成了近程混响理论、远程混响的简正波理论、浅海远程混响强度理论和远程混响统计理论等。目前,理论体系研究正从被动噪声抑制向主动噪声信息利用方向转变。此外,人工智能(artificial intelligence,AI)技术的引入,使得噪声场从干扰背景变为可解析的环境信息源。

6)动态声道与海洋过程耦合理论,主要揭示中尺度涡旋、锋面等海洋过程对声道结构(轴深度、临界深度、声速梯度)的时空调制机制,研究声道参数随海洋状态变化的预报方法。从早期利用航次温盐深仪(conductivity-temperature-depth,CTD)数据描述声道结构的季节和区域变化方法,目前已发展到物理海洋数值模式(HYCOM、ROMS)与声传播模型的耦合方法,以及不确定性量化方法,实现了声场预报及环境参数不确定性的影响评估。

以上研究表明,国外海洋声道基础理论研究日趋成熟,目前正在朝“数据-物理融合”的联合驱动模型研究及应用方向发展。

3.3　声信号远程传播

自1944年发现声道以来,国外开展了大量声信号远程传播实验及研究,见表1。

表1　国外主要深海远程声传播与声学测温实验

Table 1　Major Deep-Sea Long-Range Acoustic Propagation Experiments Conducted Outside China

实验名称	年份	海区	主要成果
Saluda号爆炸声源[19]	1944	北大西洋	发现了深海声道,提出了SOFAR概念
珀斯至百慕大实验	1960	印度洋、大西洋	传播19 800 km,验证全球声道传播
安提瓜至纽芬兰实验	1970s	北大西洋	低频,上千公里传播损失与多途结构
SLICE89实验	1989	北太平洋	1 000 km传播,揭示内波影响
赫德岛可行性实验[20]	1991	印度洋及全球	57 Hz,全球接收,验证跨大洋声学测温
声学工程测试	1994	北太平洋	传播3 250 km,大孔径垂直阵接收
跨北极传播(trans-arctic propagation,TAP)	1994	北冰洋	跨北极传播,验证极区声学测温
海洋气候声学测温(acoustic thermometry of ocean climate,ATOC)计划[4]	1996—2006	北太平洋	盆地尺度海洋热含量长期观测
北太平洋声学实验室实验	1998—1999	北太平洋	晚期到达相干性、影区到达与模态稳定性
ACOUS实验	1998—1999	北冰洋	长期跨北极传播损失与温度监测
远程海洋声传播实验(long-range ocean acoustic propagation experiment,LOAPEX)[12]	2004	北太平洋	射线、简正波随距离演化的完整观测
菲律宾海实验	2009—2011	菲律宾海	强涡旋深海声道环境的年尺度传播与层析
加拿大海盆声传播实验	2016—2017	加拿大海盆	波弗特声道传播与150 km层析阵观测
协同北极声学测温实验(coordinated arctic acoustic thermometry experiment,CAATEX)[21]	2019—2020	北冰洋	传播2 600 km,跨北极,全年传播时间序列

这些实验多采用宽带信号,通过匹配滤波与多周期相干,累积获得数十分贝的处理增益[22]。利用这些实测数据,美国东北大学、伍兹霍尔海洋研究所等团队系统总结了水声通信信道的传播模型与统计特性,指出声道结构是决定信道多途、衰落与相干性的关键因素[11]。LI等[23]进一步指出,深水远程信道相对稳定的多途结构为相干通信与信道均衡提供了条件。此外,经典理论与观测表明声线周期性聚焦使声场强度沿距离周期性增强,可形成间隔数十公里的会聚区;在声

道轴附近,声波能量较为集中,传播损失相对较低且随距离变化平缓[5];不同频段与不同收发深度的组合会产生差异显著的多途到达结构,低频信号的到达序列通常呈现清晰的群结构,反映了声线按传播路径长度分组的物理规律[3]。

3.4 环境变异性与细结构效应

海洋并非理想分层介质,内波、中尺度涡、海洋锋面与声速细结构对声道传播的影响已成为现代海洋声道研究的一个重要方向。DUDA[24]分析了内波剪切与应变对声道射线路径的扰动,指出内波导致的声场起伏会显著影响远程声信号的到达结构与相干性。UDOVYDCHENKOV等[25]基于LOAPEX实验,采用简正波模态处理,分析了环境变异对远程声传播的影响,揭示了模态耦合与传播起伏之间的定量联系。COLOSI等[16]进一步从统计学角度描述了远程传播信号的起伏规律及对声呐探测、水声通信的影响。近年来,一些学者将高分辨率声速测量资料与数值模拟结合,发现了声道轴附近的内波、细温盐结构与中尺度涡边缘的湍流混合会在传播信号中引入特征性的到达时间起伏与相位抖动,进而影响远程声学测温与声呐相干处理的时间稳定性。为了描述这种扰动,学者们提出了基于统计声学与随机传播理论的建模方法,将声场分解为相干分量和随机分量并分别处理,从而更准确地预报声道内远程信号的统计特性。

3.5 海洋声学层析与气候监测

海洋声学层析由MUNK和WUNSCH于1979年提出[18],其思想是利用布设在海洋中的多组声源与接收器之间声传播时间的扰动,反演海洋内部温度、流速等参数,实现对广阔海域内部结构的观测。HOWE等[14]利用互易传输实现了中尺度流速场的层析反演,JONES等[26]发展了非微扰的层析反演方法,DZIECIUCH[22]系统地总结了层析中到达信号的处理与跟踪技术。

根据声道传播时间对海洋温度的敏感性,声学测温成为监测海洋热含量与气候变化的重要手段。MUNK等[27]于1989年系统地阐述了声学测温思想,指出声传播时间与温度直接相关,1991年实施的赫德岛可行性实验验证了这一结论[20]。ATOC联合体[28]1998年在*Science*上报道了声学层析、卫星高度计与数值模式结果在海洋热含量变化上的一致性,进一步证明了声学测温的可行性。DUSHAW等[4]总结了1996—2006年北太平洋10 a声学测温结果,指出该时段内盆地尺度热含量变化以年际变率为主。SAGEN等[29]将弗拉姆海峡2008—2009年的层析观测与海洋模式结合,获得了海峡温度的时间序列。EVERS[30]利用IMS系统20年观测资料,发现了阵列间传播时间以0.002 s/a减小,对应约900 m深度处海水增暖速度为0.007 ℃/a。

3.6 海洋声道定位

海洋声道的波导特性不仅为远程通信和探测提供了物理基础,也被用于水下测距定位。利用声道中声信号传播时间稳定、衰减小特点,可在大洋尺度上实现高精度水下定位与导航,弥补GNSS信号无法穿透海水的不足。

在SOFAR通道发现后不久,美国海军即开发了SOFAR导航系统,并在加州蒙特雷、Point Arena和夏威夷Kaneohe等地建立了早期的SOFAR岸基站,用于营救坠海的飞行员。之后研发了SOFAR浮标,在声道轴深度随洋流漂移,定期发射低频声信号,SOSUS水听器阵列接收信号并计算浮标位置。为了解决SOFAR浮标成本高问题,后续又研发了RAFOS(由SOFAR倒序拼写而来,表示其声信号收发方向与SOFAR浮标相反)浮标,由锚系声源定时发射信号,漂流浮标记录到达时间,回收后反演轨迹。目前,全球海洋已有数千个RAFOS浮标,至今仍是深海环流观测和水下导航定位的主要手段之一。

20世纪60—70年代,定位精度更高的声学定位系统LBL(long baseline)研发成功,在深海油气开发和科学考察中实现了米级定位精度,是当前深海高精度定位的主要手段。针对声学通信、导航定位分开实施的缺陷,21世纪初期,美国伍兹霍尔海洋研究所研发了Micro-Modem系统[31],在硬件架构上实现了通信与导航波形的一体化设计。此后,新加坡国立大学声学研究实验室自2004年开始研发,研制了UNET为代表的水下网络协议栈[32]。

3.7 反潜探测

利用海洋声道反潜探测是海洋声道研究在军事方面较为成熟的应用。不同深度的潜艇辐射的低频噪声可以耦合进入声道进行远距离传输,据此可以实现潜艇探测。

20世纪50年代以来,探潜装备经历了从固定式水听器阵列到智能化分布式感知网络的演进。古巴导弹危机期间的潜艇监测和多次核潜艇定位,是声学远程反潜的代表性应用案例。1990s至2010s,反潜探潜需求收缩,但技术仍保留,IUSS转型为军民两用系统。2020年至今,在AI技术的

驱动下,声学反潜迈入了从模型离线部署到任务中持续学习和模型持续更新的智能化时代。

3.8 北极声学观测

北极是全球气候变化最敏感的区域之一。由于海水低温和海冰覆盖,极区声道轴显著抬升,海冰的散射与吸收对近表层声传播影响显著。MIKHALEVSKY 等[33]1994 年在北极开展了 TAP 实验,利用低频声源在水下声道内跨北极传输信号,开创了北极声学测温的先河,证明了利用声学方法长期监测北冰洋温度变化、海冰厚度和粗糙度的可行性。2015 年,MIKHALEVSKY 等[34]进一步提出了在北冰洋综合观测系统中建设集测温、通信、导航定位、被动监听于一体的多用途声学网络构想。2019—2020 年,挪威南森中心与斯克里普斯海洋研究所联合实施了 CAATEX 实验,实现了最远约 2 600 km 的跨北极声传播,获得了全年传播时间序列,进一步验证了在北极开展连续声学测温的可行性[21]。

4 国内海洋声道研究进展

我国的海洋声道研究起步较晚,主要研究机构有中国科学院声学研究所、哈尔滨工程大学、浙江大学、中国海洋大学、中山大学等科研院所。目前的研究已由浅海传播理论逐步拓展到深海远程实验、区域观测网络、耦合声场预报以及全海深通信定位等方向[35]。

4.1 声道理论

4.1.1 声道基础理论

在浅海声道理论方面,张仁和团队 1975 年以来开展了系统性、奠基性的工作,建立了浅海表水层声道中的简正波声场理论,给出了声道内声场结构与传播损失的解析表达,揭示了声道对声波的波导化约束规律[36];于晓林等[37]2019 年针对负跃层浅海环境,发展了脉冲声传播的简正波模型,描述了跃层界面对脉冲到达结构的调制作用;针对浅海复杂环境中的声传播问题,结合射线法与简正波法,ZHANG 和 LI[38]1999 年提出了波束位移射线简正波理论。2021 年,朴胜春等[6]提出了不完整声道中的下转折点会聚区理论,将研究从“声道轴以上”拓展到大深度声场,深化了会聚区理论。彭朝晖团队 2021 年提出了地球曲率修正方法,解决了上千千米远程声传播计算中不可忽略的球面效应问题,完善了声波远程传播理论[39]。在声速场建模方面,WU 等[40]2026 年利用遥感海表温度数据结合历史声速剖面经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)特征,借助 AI 建立了 SA-MDF-CNN 声速场模型。

4.1.2 复杂地形与不完全声道效应

2016 年,胡治国等[41]针对深海倾斜海底环境下的声传播进行了实验与数值研究,发现倾斜海底对声波的反射阻挡作用会破坏由波导折射决定的会聚区结构,可能导致特定区域出现倒三角声影区,并指出准确的海底地形对深海声传播预报、目标探测等具有重要应用意义。2022 年,李整林等[42]总结了我国在深海复杂海底地形环境下声传播特性研究进展,指出在特定收发位置下海底山、海底斜坡、海沟等地形对深海声传播有显著影响,并在南海中南部深海及北部陆架区开展的二维和三维声传播实验中,观测到了不完全声道环境下海底地形引起的局部声场增强或减弱现象,并对其物理机理进行了理论解释。在理论模型方面,结合南海实测数据,国内团队将简正波、抛物方程等经典方法与实测声速剖面相结合,建立了能够反映不完全声道、复杂地形与季节变化影响的声传播模型[42]。

4.1.3 海洋动力过程对声道的调制机理

海洋动力过程对声道的调制作用直接关系到声道环境的动态预报,是我国近年来最活跃的交叉研究方向。1991 年,ZHOU 等[43]在黄海实验中首次观测到了内孤立子波对声波的共振散射,造成了两条传播路径上大于 20 dB 的声衰减;刘清宇[44]研究表明,中尺度涡可能导致深海表面声道出现或消失;王宁等[45]研究了内波引起的简正波幅度起伏与声强统计特性;李佳讯等[46]开展了海洋中尺度涡建模及其声传播影响研究;XIAO 等[47]的研究指出,暖涡可使会聚区向声源方向偏移;吴双林等[48]利用东印度洋实验数据,揭示了热带偶极子形成的暖水团对会聚区形成及位置的影响。邵星栋等[49]利用坐底式逆式回声仪观测数据,发现了黑潮延伸体可使区域声道轴从 860 m 加深至 1 200 m,导致会聚区位置后移、宽度增大。在海洋锋面研究方面,LIU 等[50]在西北太平洋锋面开展了海洋声学与物理海洋联合实验,发现声源位于锋面中心时声波向冷、热水团两侧的传播存在显著差异。在海面与海况影响研究方面,刘今等[51]发现 2 m 高涌浪可使表面声道中 1 kHz 信号的传播损失在 70 km 处增加 10 dB;姚美娟等[52]提出了同时考虑大风浪情况下起伏海面与风生气泡层的声传播计算方法。这些研究揭示了海洋动力过程对声道参数和声传播的

影响机理。

4.1.4 海洋环境噪声与声场时空特性

中国科学院声学研究所在南海深海利用潜标基阵系统观测和分析了不同季节海况下声道内的环境噪声的特征,研究了海洋环境噪声随频率、深度、海况的变化规律,并将其与声传播特性结合,研究了噪声场与声道结构的相互作用,发现了“噪声源—传播声道结构—接收噪声场”三者之间的耦合机制。张乾初等[53]发现岛礁斜坡可使海面航船噪声进入深海声道,从而改变噪声的垂直分布结构;SHI等[54]利用2016—2018年南海长期观测数据,发现了环境噪声在500～2 000 Hz频段存在显著的季节性变化,1 000 Hz冬季噪声级比夏季高6～10 dB,且这种季节性波动主要由局地风速的季节性变化驱动。在海底边界对环境噪声的调制研究方面,单元春等[55]利用在南海大陆坡和深海站布放的垂直潜标阵列数据,结合三维射线模型,研究了不同水深、地形和底质条件下的噪声级、频谱与垂直指向性;柳云峰等[56]揭示了大陆坡海底地形及沉积层参数对噪声空间结构的影响机制,综合提升了海洋环境噪声对声场时空变化特性影响的认知。

4.1.5 海-底-声学耦合模式

YANG等[57]针对传统海洋模式缺乏海洋声场预报所需的海底沉积物参数模拟能力问题,率先在国际上构建并发布了海-底-声学耦合模式。通过耦合海底沉积物温度场,在典型条件下将声场预报误差降低了10 dB,标志着我国海洋声场预报进入了多圈层耦合新阶段。

4.2 声道观测与长程声信号传播

深海潜标、海底基阵与水听器阵列等观测装备的自主研发与布放,使我国具备了在深远海长期连续观测声道的能力。吴立新团队2020年以自主研发的深海潜标为基础,突破锚系水动力优化、高可靠缆系、防腐防污和实时通信等关键技术瓶颈,在我国南海布设了潜标网络,实现了覆盖南海深海盆的长期连续观测[58]。自然资源部南海调查中心研究团队2026年将感应耦合传输、天通卫星链路和25个传感器集成到潜标系统,在南海1 247 m水深连续运行1 a以上,数据远程接收的成功率超过了90%,推动了区域观测由离线向长期、实时、多参数协同演进[59]。

在长程声信号传播方面,我国在南海、西太平洋组织实施了系列深海声道声传播实验,收集了大量实测数据。2014年,中国科学院声学研究所在南海布放了由27个自容式水听器组成的垂直阵,开展了100～1 900 m声传播实验,揭示了海底山对声传播的反射与阴影效应[60];2014年夏季,哈尔滨工程大学等单位在南海450 km内观测到了8个下反转点会聚区,远距离处仍保持较高的会聚增益[61]。吴丽丽、彭朝晖等2016年利用2013年西太平洋远程脉冲声传播实验数据,分析了深海远程脉冲声传播特性,研究获得了深海远程会聚区传播损失曲线及深海声道传播损失随接收深度的变化曲线。吴双林等2023年利用2016年南海、2021年东印度洋的实验数据,对数百至上千千米的声脉冲结构开展了对比研究,揭示了声速剖面对会聚区位置、到达结构以及海面反射声束与折射声束相对贡献的控制作用[62]。这些实验填补了我国在深远海声道远程传播方面的空白,提升了对深海声道的认识。

4.3 声呐装备研发与应用

4.3.1 声道通信与声学定位

商志刚等[63]总结指出,在南海不完全声道环境中,学者们对高频水声通信信道的特性进行了分析建模,研究了声道缺失、海底反射等复杂条件下信道的时延扩展与多径结构,为深海水声通信系统研发提供了支撑。吴双林等[35]指出,面向深远海资源开发与海洋安全,深海水声通信、导航定位与探测识别已成为重要研究方向。为提升声通信能力和定位精度,学者们开展了声速获取与反演技术研究。屈科等[64]提出了基于水动力模态基函数的浅海声速剖面构建方法,降低了声速剖面重构对现场实时观测样本的依赖;针对南海动力活动复杂、声速剖面样本稀疏导致传统估计方法难以有效应用的问题,欧圳翼、屈科[65]提出了一种基于K-means聚类与单经验正交函数回归的南海声速剖面估计方法,提高了声速估计精度。在装备研发方面,乔钢团队围绕全双工水声通信开展了系统与自干扰抑制研究,发展了空间波束形成与自适应数字抵消联合方法[66]。

在水声通信、定位一体化研究方面,杨坤德等[60]系统总结了单水听器、垂直阵、水平阵等多种接收配置下的被动定位方法;近年又发展了利用宽带声场频率—掠射角干涉结构的目标深度估计、深海声影区定位新方法,并利用深度学习提升了定位的精度与鲁棒性[67]。吴双林团队2023年发展了深海定位方法,将传播现象、阵列处理与定位算法纳入同一问题链条,为复杂海域从机理认识走向参数化建模和装备设计提供了依据[35];商志刚等[63]系统回顾并梳理了水声通信、定位一体化方向的研究进展,

面向便携式部署、水下传感器网络和水下航行器集群等高度适配资源受限的水声应用场景,梳理了应用技术路线。在主动水声定位方面,孙大军团队历经20余年攻关,成功研发了LBL深海高精度水声定位系统,并装配于“蛟龙”号、“深海勇士”号等多艘科考船和深潜器,定位精度达到亚米级[68]。

4.3.2　水下探测与固定式监测

我国的声道传播研究成果已逐步转化为水下探测装备。对深海声道声传播损失、会聚区分布、混响等特性的认识,提升了我国深海声呐在水下目标探测识别方面的性能;声速剖面与声道参数获取研究,为声呐系统的工作深度选择、作用距离预报与信号处理提供了支撑。宋宪仓等[69]在海洋科学装备研究进展中指出,我国正积极布局深海水下自主探测识别、声学传感器与换能器等技术,致力于突破深远海环境下的声学观测与探测装备瓶颈。

在固定式监测方面,尚尔昌[70]1997年系统介绍了海洋声学测温与声层析方法;2010年我国自主研制了海洋声学层析监测系统,通过声场干涉结构与起伏特征反演海水声速扰动、温度变化及内波周期,实现了大范围海洋内部环境监测。林建民团队2024年联合国内相关团队,利用海底光缆构建了8655通道的分布式声学传感阵列,并在台风“梅花”过境期间连续反演海流速度和方向[71],为密集采样和连续运行的海底固定感知提供了新途径。

5　我国的差距及发展方向

5.1　差距

1)理论方法与观测

在理论与方法层面,国外在深海声道领域已建立起了较为完整的理论体系与数值模拟框架[3],并在海洋声学层析、气候声学测温、环境变异性影响等方面形成了系统性研究成果。我国虽在浅海声道理论方面具有特色优势,但在深海声道复杂环境下的精细化建模、多物理场耦合分析以及声速细结构对传播影响的定量描述等方面仍存在差距。在观测层面,国外依托ATOC、北太平洋声学实验室在北太平洋开展了长期声学观测,并通过TAP实验研究了极地声学测温的可行性[4];我国的深海声道观测主要集中在南海和西太平洋,空间覆盖与时序长度均相对有限,数据积累的不足制约了对海洋声道传播规律与环境变异性认识的深入。

2)观测装备与工程应用

我国深海声学装备研发虽取得了显著进步,但核心部件自主化、远洋布放回收、长期稳定运行与规模化部署能力仍需提升[69]。在应用层面,国外已开展了北太平洋声学气候测温长期观测,并通过TAP实验探索了跨北极声学测温[4],而我国基于声道的气候观测、远程水声通信与深海探测装备的工程化应用仍处于起步或示范应用阶段。

我国的海洋声道研究正处于从追赶向自主创新转型的关键时期。表2从多个维度对比了国内外海洋声道研究的现状。

表2　国内外海洋声道研究对比

Table 2　Comparison of Domestic and Foreign Research on Ocean Channels

对比维度	国外现状	我国现状
理论体系	体系成熟,涵盖层析与水温反演	浅海见长,深海还在完善
远程实验	多海区、跨年代系统开展	南海、西太平洋
观测网络	全球声学观测体系	以南海为中心初步布局
气候观测应用	ATOC、北极监测成熟	尚在探索示范
装备自主化	系列化、业务化运行	部分核心装备依赖进口
AI应用	深度融入信道与反演	快速跟进还需迭代

5.2　发展方向

5.2.1　深海声道机理研究与精细化建模

完善浅海声道理论,深化深海声道在复杂海洋环境下的传播机理研究,提升我国深海声学观测及声道应用能力。重点开展不完全声道、复杂海底地形、内波与涡旋等条件下的声传播特性研究,建立考虑环境变异性的精细化声道传播模型。依托我国在南海、西太平洋已建立的网络,开展多频段、多尺度的远程声传播实验,获取高质量的声道声场数据,研究声道内声场的时空变化特性、多途到达结构与传播起伏规律,为声呐性能提升与声学反演提供数据支撑。同时,加强海洋环境参数(声速、温度、盐度、海底底质等)获取与声道参数的全球建模研究,发展基于数据同化的声道声场业务化预报技术。

优先突破声道参数高精度反演、海洋声速场快速重构等技术瓶颈,发展面向声呐与通信系统的一体化声学环境保障技术。针对深海声道内多途效应强、环境时变性大的特点,加强自适应信号处理、信道估计与稳健波束形成等关键技术攻关,提高水声装备在复杂声道环境下的适用

性。同时,加强声学、海洋动力与大数据技术的交叉融合,构建海洋声学环境数字孪生平台,为深海声道研究的业务化应用提供支撑[50]。

5.2.2 AI与声道研究

深度学习网络,如深度卷积神经网络(deep convolutional neural networks,DCNN),能够学习声道实测数据中隐含的复杂映射关系,从而在传统数值方法计算代价高昂场景下实现声场与环境参数的快速、准确估计。物理信息神经网络(physics-informed neural networks,PINN)等深度学习方法将物理方程嵌入神经网络[72],利用声道观测数据,通过训练生成网络模型,兼顾了问题求解的精度和解释性,为求解声道声场问题提供了新范式。利用AI技术,在高时空分辨率声道观测数据的驱动下,融入物理原理和过程约束,可以高精度地解决声传播等偏微分方程支配的物理问题。

在水声通信信道建模方面,利用深度学习,借助DCNN,通过学习实测信道数据中的多径与衰减规律,可以提高信道模型的逼真度与预测能力。进一步,PINN通过将声传播控制方程嵌入损失函数,可在数据稀疏条件下保持解的物理一致性,为深海声道声场的智能求解提供新途径。除信道建模外,AI在声速剖面反演、声场快速预报与环境噪声识别等领域也展现出广阔的应用前景。将深度学习方法应用于声速剖面反演,可以突破传统反演方法对初值与等效简化的依赖;将声速聚类与DCNN结合用于海洋锋面模型重建,可以提升对声道参数的空间分析能力;将深度聚类、迁移学习等技术用于海洋环境声学数据分类与特征提取,会显著提升深海声学观测数据处理的效率与智能化水平。

5.2.3 设备研发与自主声学观测网络建设及应用

构建覆盖深远海的自主声学观测网络,是我国海洋声学研究未来的重点工作。大力研发深海潜标、自主水听器阵列、海底观测站与水下无人平台等装备,突破低频大功率声源、高灵敏度水听器与换能器、水下实时通信、高精度导航定位与接驳回收等关键技术,构建声道观测、应用的装备与技术体系[69]。以南海深海观测为核心,逐步向全球海域拓伸,建立长期运行的、由深远海潜标阵、海底观测节点、机动调查等组成的自主、立体的声学观测网[58]。借鉴ATOC与北极声学测温等国际经验,逐步建设我国的海洋声学气候监测网络。

在已有的固定平台或网络上研发机动观测系统,如潜标系统、水下无人平台观测系统等,实现与固定网络的智能化组网。以自主水下航行器、水下滑翔机等为代表的水下无人平台正在重塑海洋观测与探测的技术体系。未来应发展平台声学载荷集成,在小型无人平台上集成高灵敏度声学传感器,实现小尺寸、低功耗下的高增益探测;发展多节点协同探测,基于分布式声学传感网络,通过多节点数据融合实现对大面积海域的持续监视。

声道观测网络的研究成果向水声工程应用转化是服务国家需求的关键。加强深海远程水声通信、水下目标探测与识别、水声导航定位等应用技术及装备研发,利用深海声道特性,提升我国远距离探测、通信与导航定位综合能力[63]。

我国还应加强国际合作,积极参与全球海洋声道观测与设备研发,采用多国、多机构协同机制,依托统一数据标准与共享机制,建设我国的设备体系与观测网络。

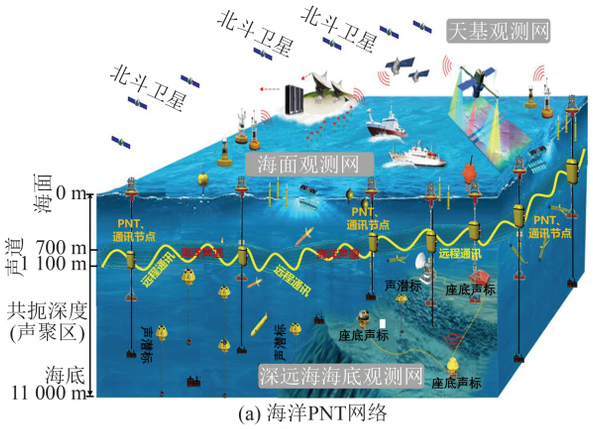
5.2.4 海洋通-导-遥PNT网络与海洋声学观测网络融合

推进海洋强国战略,从浅海走向深海,海洋导航、定位、授时(positioning,navigation,timing,PNT)是其重要支撑[2]。我国目前已在南海开展了实验性PNT网络建设,攻克了复杂海洋环境下局部水下高精度导航定位难题,为海洋科学研究和海洋工程应用提供了支撑,但也面临如下问题:①环境要素及其变化规律不明晰导致远距离定位精度低;②PNT节点(浮标、潜标、座底舱)间无法实现稳定通信,数据无法实现互联互通,难以保障网络的稳定性和导航定位精度;③遥测感知仅能实现环境参数原位感知和有限距离目标探测,大范围遥测感知瓶颈难题亟需攻克。

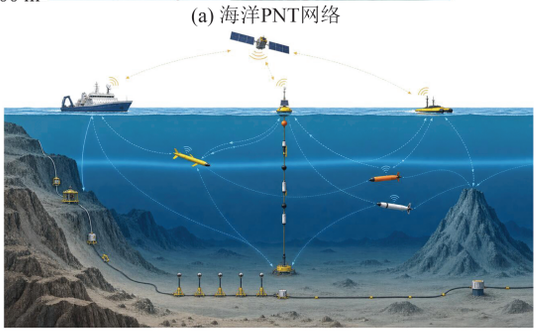
海洋声道观测网络为通-导-遥PNT网络上述问题的解决提供了理想解决方案。借助声道观测网获得的海洋声场环境参数,可以为PNT网提供基础的声速场信息、声道远程通信信息、声道内远程高精度定位支撑。此外,声道观测网点与通-导-遥PNT网点可以共享,既可以增加各自网络的观测站点数量,提升数据分辨率,又可以实现两网数据的共享,支撑PNT高精度导航定位和环境感知的同时,也为声信道精细建模提供局域高精度高分辨率时空位置、温盐、声速剖面等观测信息,因此两网融合将成为未来发展的一个重要方向(图3)。

5.2.5 极地研究拓展

深海、大洋和极地是我国海洋科学研究发展的3个重点方向。北极海冰的加速消融使北极航道的战略价值日益凸显。极区海洋环境与中低



(a) 海洋PNT网络



(b) 海洋声学观测网络

图 3　海洋 PNT 网络[2]与海洋声学观测网络[14]

Fig. 3　Marine PNT Network[2] and Marine Acoustic Observation Network[14]

纬度海域存在本质差异,冰盖、冰脊、冰裂隙等冰声学环境对声传播的影响机制目前尚不完全清晰。未来应重点研究冰下声道的形成机制与时空演化规律、跨冰层介质声传播特性(冰-水-气耦合声场)、水声通信与定位技术的环境适配性、北极声学长期观测网络构建等,提升我国极地科学研究的水平和服务能力。

6　结　语

海洋声道在声传播建模、典型声道特性、动态海洋过程影响、声学探测、测距与定位、声学测温等领域已形成较为完备的理论体系,声道的基础理论研究基本成熟;声道的特性研究不断深入,已从浅海声道研究发展到深海声道、表面声道、次表层声道,从完整声道到不完整声道以及极地声道;在动态海洋过程影响机制研究方面,逐步揭示和明晰了中尺度涡、锋面、内波等动态过程对声道特征的调制机理;在观测技术与装备方面,研发了较为完备的阵列观测装备、固定网络与移动网络相结合的组网方式,提升了声道观测数据的时空分辨率;在技术应用层面,开展了远程通信、深海定位、反潜探测、气候监测等应用,拓展了声道研究的应用领域。

我国的声道研究虽然已取得了长足的发展,但在理论方法、观测装备、观测数据处理与建模、声道应用等方面尚存在一定的差距。结合国家战略需求,未来应向深海声道机理研究与精细化建模、传感器设备及海洋能发电设备、深海装备研发与自主声学观测网建设,海洋通-导-遥 PNT 网络与海洋声学观测网络融合、AI 与声道研究、极地声道研究等领域总体规划布局,依需求缓急逐一拓展。

参　考　文　献

[1] 李志军. 提高经略海洋能力的多维思考[J]. 人民论坛·学术前沿, 2026(8): 72-80.
LI Zhijun. Multi-dimensional Reflections on Enhancing Maritime Strategic Governance Capacity [J]. *Frontiers*, 2026(8): 72-80.

[2] 刘经南, 赵建虎, 马金叶. 通导遥一体化深远海 PNT 基准及服务网络构想[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1523-1534.
LIU Jingnan, ZHAO Jianhu, MA Jinye. Concept of Constructing the Underwater PNT Network with the Abilities of Communication, Navigation and Remote Sensing in the Deep Sea[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1523-1534.

[3] MUNK W, WORCESTER P, WUNSCH C. Ocean Acoustic Tomography [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

[4] DUSHAW B D, WORCESTER P F, MUNK W H, et al. A Decade of Acoustic Thermometry in the North Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C7): 2008JC005124.

[5] JENSEN F B, KUPERMAN W A, PORTER M B, et al. Computational Ocean Acoustics[M]. New York: Springer, 2011.

[6] 朴胜春, 栗子洋, 王笑寒, 等. 深海不完整声道下反转点会聚区研究[J]. 物理学报, 2021, 70(2): 343-352.
PIAO Shengchun, LI Ziyang, WANG Xiaohan, et al. Lower Turning Point Convegence Zone in Deep Water with an Incomplete Channel[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(2): 343-352.

[7] ROEMMICH D, ALFORD M H, CLAUSTRE H, et al. On the Future of Argo: A Global, Full-Depth, Multi-Disciplinary Array [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 439.

[8] BAGGEROER A B, KUPERMAN W A, MIKHALEVSKY P N. An Overview of Matched Field Methods in Ocean Acoustics[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1993, 18(4): 401-424.

[9] LIN Y T, COLLIS J M, DUDA T F. A Three-Dimensional Parabolic Equation Model of Sound Propagation Using Higher-Order Operator Splitting and Padé Approximants[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 132(5): EL364-EL370.

[10] COLOSI J A, SCHEER E K, FLATTÉ S M, et al. Comparisons of Measured and Predicted Acoustic Fluctuations for a 3 250-km Propagation Experiment in the Eastern North Pacific Ocean[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1999, 105(6): 3202-3218.

[11] STOJANOVIC M, PREISIG J. Underwater Acoustic Communication Channels: Propagation Models and Statistical Characterization[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(1): 84-89.

[12] MERCER J A, COLOSI J A, HOWE B M, et al. LOAPEX: The Long-Range Ocean Acoustic Propagation EXperiment[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2009, 34(1): 1-11.

[13] BREKHOVSKIKH L M, LYSANOV Y P. Fundamentals of Ocean Acoustics[M]. 3rd ed. New York: Springer, 2003.

[14] HOWE B M, MIKSIS-OLDS J, REHM E, et al. Observing the Oceans Acoustically[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019. doi: 10.3389/fmars.2019.00426.

[15] MUNK W H. Sound Channel in an Exponentially Stratified Ocean, with Application to SOFAR[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1974, 55(2): 220-226.

[16] GARRETT C, MUNK W. Space-Time Scales of Internal Waves[J]. *Geophysical Fluid Dynamics*, 1972, 3(3): 225-264.

[17] COLOSI J A. Sound Propagation Through the Stochastic Ocean[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2016.

[18] MUNK W, WUNSCH C. Ocean Acoustic Tomography: A Scheme for Large Scale Monitoring[J]. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers*, 1979, 26(2): 123-161.

[19] EWING M, WORZEL J L. Long-Range Sound Transmission[M]//Propagation of Sound in the Ocean. Boulder: Geological Society of America, 1948: 1-32.

[20] MUNK W H, SPINDEL R C, BAGGEROER A, et al. The Heard Island Feasibility Test[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1994, 96(4): 2330-2342.

[21] DZIECIUCH M A, SAGEN H, WORCESTER P F, et al. Transarctic Acoustic Transmissions During the Coordinated Arctic Acoustic Thermometry Experiment in 2019—2020[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2025, 158(4_Supplement): A163.

[22] DZIECIUCH M A. Signal Processing and Tracking of Arrivals in Ocean Acoustic Tomography[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 136(5): 2512-2522.

[23] LI Z N, CHITRE M, STOJANOVIC M. Underwater Acoustic Communications[J]. *Nature Reviews Electrical Engineering*, 2025, 2(2): 83-95.

[24] DUDA T F. Ocean Sound Channel Ray Path Perturbations from Internal-Wave Shear and Strain[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 118(5): 2899-2903.

[25] UDOVYDCHENKOV I A, BROWN M G, DUDA T F, et al. Modal Analysis of the Range Evolution of Broadband Wavefields in the North Pacific Ocean: Low Mode Numbers[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131(6): 4409-4427.

[26] JONES R M, GEORGES T M. Nonperturbative Ocean Acoustic Tomography Inversion[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1994, 96(1): 439-451.

[27] MUNK W H, FORBES A M G. Global Ocean Warming: An Acoustic Measure?[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1989, 19(11): 1765-1778.

[28] ATOC Consortium. Ocean Climate Change: Comparison of Acoustic Tomography, Satellite Altimetry, and Modeling[J]. *Science*, 1998, 281(5381): 1327-1332.

[29] SAGEN H, DUSHAW B D, SKARSOULIS E K, et al. Time Series of Temperature in Fram Strait Determined from the 2008 - 2009 DAMOCLES Acoustic Tomography Measurements and an Ocean Model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(7): 4601-4617.

[30] EVERS L G. Decadal Observations of Deep Ocean Temperature Change Passively Probed with Acoustic Waves[J]. *JASA Express Letters*, 2025, 5(7): 076001.

[31] FREITAG L, GRUND M, SINGH S, et al. The WHOI Micro-Modem: An Acoustic Communications and Navigation System for Multiple Platforms[C]// OCEANS 2005 MTS/IEEE, Washington D C, USA, 2005.

[32] CHITRE M, BHATNAGAR R, SOH W S. UnetStack: An Agent-Based Software Stack and Simulator for Underwater Networks[C]// 2014 Oceans,

St. John's, NL, Canada, 2014.

[33] MIKHALEVSKY P N, GAVRILOV A N, BAGGEROER A B. The Transarctic Acoustic Propagation Experiment and Climate Monitoring in the Arctic [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1999, 24(2): 183-201.

[34] MIKHALEVSKY P N, SAGEN H, WORCESTER P F, et al. Multipurpose Acoustic Networks in the Integrated Arctic Ocean Observing System [J]. *Arctic*, 2015, 68(5): 11.

[35] 吴双林, 秦继兴, 戚聿波, 等. 深海声学及水下声源定位研究进展[J]. 声学学报, 2025, 50(3): 551-570.
WU Shuanglin, QIN Jixing, QI Yubo, et al. Deep Water Acoustics and Underwater Sound Source Localization: A Review of Recent Developments [J]. *Acta Acustica*, 2025, 50(3): 551-570.

[36] 张仁和. 浅海表面声道中的简正波声场[J]. 物理学报, 1975, 24(3): 200-209.
ZHANG Renhe. Normal Sound Field in Shallow Water Surface Channel [J]. *Acta Physica Sinica*, 1975, 24(3): 200-209.

[37] 于晓林, 骆文于, 杨雪峰, 等. 负跃层浅海声传播问题的解析解及其在水下脉冲声传播研究中的应用[J]. 声学学报, 2019, 44(5): 913-924.
YU Xiaolin, LUO Wenyu, YANG Xuefeng, et al. Exact Solution Based on Wave-Number-Integration Theory for Acoustic Propagation in a Shallow-Water Environment with a Thermocline and Its Application to Underwater Pulse Propagation [J]. *Acta Acustica*, 2019, 44(5): 913-924.

[38] ZHANG R H, LI F H. Beam-Displacement Ray-Mode Theory of Sound Propagation in Shallow Water [J]. *Science in China Series A*, 1999, 42(7): 739-749.

[39] 毕思昭, 彭朝晖. 地球曲率对远距离声传播的影响[J]. 物理学报, 2021, 70(11): 192-202.
BI Sizhao, PENG Zhaohui. Effect of Earth Curvature on Long Range Sound Propagation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(11): 192-202.

[40] WU P F, HUANG W, SHI Y J, et al. An Attention-Assisted AI Model for Real-Time Underwater Sound Speed Estimation Leveraging Remote Sensing Sea Surface Temperature Data[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2026, 37(8): 3669-3683.

[41] 胡治国, 李整林, 张仁和, 等. 深海海底斜坡环境下的声传播[J]. 物理学报, 2016, 65(1): 229-237.
HU Zhiguo, LI Zhenglin, ZHANG Renhe, et al. Sound Propagation in Deep Water with a Sloping Bottom [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(1): 229-237.

[42] 李整林, 余炎欣. 深海声学研究进展[J]. 科学通报, 2022, 67(2): 125-134.
LI Zhenglin, YU Yanxin. Overview of Deep Water Acoustics [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(2): 125-134.

[43] ZHOU J X, ZHANG X Z, ROGERS P H. Resonant Interaction of Sound Wave with Internal Solitons in the Coastal Zone[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, 90(4): 2042-2054.

[44] 刘清宇. 海洋中尺度现象下的声传播研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
LIU Qingyu. Study on Sound Propagation Under Ocean Mesoscale Phenomena [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.

[45] 王宁, 张海青, 王好忠, 等. 内波、潮导致的声简正波幅度起伏及其深度分布[J]. 声学学报, 2010, 35(1): 38-44.
WANG Ning, ZHANG Haiqing, WANG Haozhong, et al. Fluctuation of Acoustic Modal Amplitude and Depth Dependence Due to Internal Waves and Tide[J]. *Acta Acustica*, 2010, 35(1): 38-44.

[46] 李佳讯, 张韧, 陈奕德, 等. 海洋中尺度涡建模及其在水声传播影响研究中的应用[J]. 海洋通报, 2011, 30(1): 37-46.
LI Jiaxun, ZHANG Ren, CHEN Yide, et al. Ocean Mesoscale Eddy Modeling and Its Application in Studying the Effect on Underwater Acoustic Propagation [J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(1): 37-46.

[47] XIAO Y, LI Z L, LI J, et al. Influence of Warm Eddies on Sound Propagation in the Gulf of Mexico [J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(5): 054301.

[48] 吴双林, 李整林, 秦继兴, 等. 东印度洋热带偶极子对声会聚区影响分析[J]. 物理学报, 2022, 71(13): 221-232.
WU Shuanglin, LI Zhenglin, QIN Jixing, et al. Influence of Tropical Dipole in the East Indian Ocean on Acoustic Convergence Region [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(13): 221-232.

[49] 邵星栋, 徐永生, 王黎明, 等. 基于PIES观测的黑潮延伸体区域声场特性研究[J]. 海洋测绘, 2025, 45(3): 46-50.
SHAO Xingdong, XU Yongsheng, WANG Liming, et al. Study on the Regional Acoustic Field Characteristics of the Kuroshio Extension Based on PIES Observations [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2025, 45(3): 46-50.

[50] LIU J Q, PIAO S C, ZHANG M H, et al. Charac-

teristics of Three-Dimensional Sound Propagation in Western North Pacific Fronts[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(9): 1035.

[51] 刘今, 彭朝晖, 胡承昊, 等. 涌浪条件下的浅海表面声道脉冲声传播[J]. 应用声学, 2021, 40(6): 801-809.
LIU Jin, PENG Zhaohui, HU Chenghao, et al. Swells Induced Pulse Propagation in a Surface Duct in Shallow Water[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2021, 40(6): 801-809.

[52] 姚美娟, 鹿力成, 孙炳文, 等. 浅海起伏海面下气泡层对声传播的影响[J]. 物理学报, 2020, 69(2): 130-139.
YAO Meijuan, LU Licheng, SUN Bingwen, et al. Effects of Wind-Generated Bubbles Layer on Sound Propagation Underneath Rough Sea Surface in Shallow Water[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(2): 130-139.

[53] 张乾初, 郭新毅, 马力. 岛礁区域斜坡地形对深海环境噪声级深度分布的影响[J]. 声学学报, 2019, 44(3): 329-336.
ZHANG Qianchu, GUO Xinyi, MA Li. The Effect of Slope of Island Reef on the Deep Sea Ambient Noise[J]. *Acta Acustica*, 2019, 44(3): 329-336.

[54] SHI Y, YANG Y X, TIAN J W, et al. Long-Term Ambient Noise Statistics in the Northeast South China Sea[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 145(6): EL501-EL507.

[55] 单元春, 林建恒, 衣雪娟, 等. 岛礁海域海洋环境噪声垂直分布和垂直指向性[J]. 声学学报, 2021, 46(6): 1114-1123.
SHAN Yuanchun, LIN Jianheng, YI Xuejuan, et al. Vertical Distribution and Vertical Directionality of Ocean Ambient Noise in Waters with Islands and Reefs[J]. *Acta Acustica*, 2021, 46(6): 1114-1123.

[56] 柳云峰, 秦继兴, 李整林, 等. 南海大陆坡海底对海洋环境噪声的影响[J]. 声学学报, 2024, 49(4): 803-813.
LIU Yunfeng, QIN Jixing, LI Zhenglin, et al. Impact of Continental-Slope Bottom on Ambient Noise in the South China Sea[J]. *Acta Acustica*, 2024, 49(4): 803-813.

[57] YANG G B, HUANG P R, ZHANG X C, et al. Enhancing Marine Acoustic Field Prediction in Shallow Seas Using an Ocean-Sediment Coupled Model[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2025, 157(2): 1027-1044.

[58] 吴立新, 陈朝晖, 林霄沛, 等. "透明海洋"立体观测网构建[J]. 科学通报, 2020, 65(25): 2654-2661.
WU Lixin, CHEN Zhaohui, LIN Xiaopei, et al. Building the Integrated Observational Network of "Transparent Ocean"[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(25): 2654-2661.

[59] LIU T M, ZHOU B C, ZHANG X W, et al. Real-Time Deep-Sea Mooring System with Inductive Telemetry and Multi-sensor Integration: Deployment and Performance in the South China Sea[J]. *Sensors*, 2026, 26(3): 937.

[60] 李文, 李整林. 深海海底山对声波的反射和阻挡效应[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(9): 16-23.
LI Wen, LI Zhenglin. The Reflection and Shadow Effects of Seamounts on Sound Propagation in Deep Water[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2016, 46(9): 16-23.

[61] 徐传秀, 朴胜春, 张海刚, 等. 大深度矢量水听器用于深海声传播测量的实验研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(9): 37-43.
XU Chuanxiu, PIAO Shengchun, ZHANG Haigang, et al. Experimental Study of Sound Propagation Using a Deep-Water Vector Hydrophone[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2016, 46(9): 37-43.

[62] 吴双林, 秦继兴, 李整林, 等. 声速剖面对深海远程声脉冲结构的影响[J]. 声学学报, 2023, 48(4): 774-784.
WU Shuanglin, QIN Jixing, LI Zhenglin, et al. Effect of Sound Speed Profile on the Structure of Long-Range Acoustic Pulse[J]. *Acta Acustica*, 2023, 48(4): 774-784.

[63] 商志刚, 曲星昊, 马璐, 等. 水声通信定位一体化研究综述[J]. 声学学报, 2026, 51(2): 465-477.
SHANG Zhigang, QU Xinghao, MA Lu, et al. A Review of Research on Underwater Acoustic Integrated Communication and Localization[J]. *Acta Acustica*, 2026, 51(2): 465-477.

[64] 屈科, 朴胜春, 朱凤芹. 一种基于内潮动力特征的浅海声速剖面构建新方法[J]. 物理学报, 2019, 68(12): 136-146.
QU Ke, PIAO Shengchun, ZHU Fengqin. A Noval Method of Constructing Shallow Water Sound Speed Profile Based on Dynamic Characteristic of Internal Tides[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(12): 136-146.

[65] 欧圳翼, 屈科. 基于K-means聚类分析与单经验正交函数回归法的南海声速剖面估计方法研究[J]. 声学技术, 2022, 41(6): 821-826.
OU Zhenyi, QU Ke. Sound Speed Profile Inversion

in the South China Sea Based on *K*-means Cluster Analysis and Single Empirical Orthogonal Function Regression[J]. *Technical Acoustics*, 2022, 41(6): 821-826.

[66] LU Y H, QING X, YANG C L, et al. Spatial-Digital Joint Self-Interference Cancellation Method for In-Band Full-Duplex Underwater Acoustic Communication [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 1015836.

[67] 杨坤德, 段睿, 李辉, 等. 水下声源定位理论与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
YANG Kunde, DUAN Rui, LI Hui, et al. Theory and Technology of Underwater Sound Source Localization [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.

[68] LIU Y Y, XUE J F, YANG B, et al. The Acoustic System of the Fendouzhe HOV [J]. *Sensors*, 2021, 21(22): 7478.

[69] 宋宪仓, 杜君峰, 王树青, 等. 海洋科学装备研究进展与发展建议[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 76-83.
SONG Xiancang, DU Junfeng, WANG Shuqing, et al. Research Progress of Marine Scientific Equipment and Development Recommendations in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(6): 76-83.

[70] 尚尔昌. 海洋声学测温及声层析法[J]. 青岛海洋大学学报, 1997,27(1):1-14.
SHANG Erchang. Ocean Acoustic Tomography [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1997,27(1):1-14.

[71] LIN J M, FANG S K, HE R J, et al. Monitoring Ocean Currents During the Passage of Typhoon Muifa Using Optical-Fiber Distributed Acoustic Sensing [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 1111.

[72] RAISSI M, PERDIKARIS P, KARNIADAKIS G E. Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations[J]. *Journal of Computational Physics*, 2019, 378: 686-707.