

陈红霞, 林丽娜, 刘娜, 等. 三种声速算法在北冰洋门捷列夫海岭海域的适用性比较——基于中国第九次北极科考原位数据[J]. 海洋学报, 2026, 48(x): 1–12, doi:

CHEN Hongxia, LIN Lina, LIU Na, et al. Applicability Comparison of Three Sound Velocity Algorithms in the Mendeleev Ridge Area of the Arctic Ocean ——Based on In Situ Data from the 9<sup>th</sup> Chinese National Arctic Expedition[J]. Haiyang Xuebao, 2026, 48(x): 1–12, doi:

# 三种声速算法在北冰洋门捷列夫海岭海域的适用性比较——基于中国第九次北极科考原位数据

陈红霞<sup>1,2</sup>, 林丽娜<sup>1,2</sup>, 刘娜<sup>1,2</sup>, 于钧昊<sup>1,2</sup>

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 自然资源部海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 声速是海洋声学探测与应用的核心物理参数, 其精度直接决定水声通信、海底地形测绘及声层析成像等技术的可靠性。目前声速剖面主要通过温盐深 (CTD) 数据借助经验公式间接计算获得, 其中 Chen-Millero (1977)、Del Grosso (1974) 和 Wilson (1960) 公式是全球最常用的三种声速算法。然而, 这些公式多基于中低纬度海洋数据构建, 在具有低温、强层化、淡水输入显著的北极海域的适用性尚未得到充分验证。本研究基于中国第九次北极科学考察 (2018 年) 在门捷列夫海岭以东 172°W 经向断面获取的高精度 CTD 与声速剖面仪 (SVP) 同步观测数据, 系统比较了上述三种算法在北极典型环境下的计算精度。结果表明, 在这一断面上, Del Grosso (1974) 经验公式综合性能最优, 在整个断面和全水深范围内表现出最高的准确性 (平均偏差 0.62 m/s) 与最佳稳定性 (偏差标准差 0.23 m/s), 是区域声速计算的首选算法。Wilson (1960) 公式存在显著深度依赖性系统高估, 500 m 以深平均偏差达 1.17 m/s, 不适用于北极深层计算。Chen and Millero (1977) 公式表现居中, 但对表层极端水文条件敏感, 深层也存在系统性高估。算法误差具有明显的空间与垂向异质性, 与水文环境复杂程度密切相关, 北极特殊的水文过程显著加大了现有经验公式的计算不确定性。

**关键词:** 中国第九次北极科学考察; 北极海域; 门捷列夫海岭; 声速算法; 声速剖面仪; 温盐深仪

中图分类号: 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2026)x-0001-12

## 1 引言

自 2003 年中国第二次北极科学考察<sup>[1]</sup>以来, 我国在门捷列夫海岭以东、楚科奇海台以西、楚科奇海以北的陆架-陆坡-海盆区域内 74.8°N~77.2°N 范围内的 172°W 经向断面 (M 断面) 上持续开展了以物理海洋学为核心的综合观测。断面南端位于楚科奇海陆架北坡处, 水深 300 m 左右, 距离弗兰格尔岛约 400 km; 中段位于陆坡上, 水深急剧增加; 北端位于门捷列夫

海岭东侧的海盆内, 水深大于 2 000 m。至今这一段面已成为我能够在北冰洋太平洋扇区的重点经向观测断面之一。

M 断面所处海域是太平洋水经白令海峡输入北冰洋深海的核心通道, 是理解北冰洋快速变化中物质、能量与生物跨边界运输的绝佳观测窗口, 已经成为研究北极快速变化中水团变性、海冰消融及跨陆架能量与物质运输过程的战略剖面。该区域作为北极“大西洋化”与“太平洋化”气候影响的交汇区, 其水

收稿日期: 2026-03-17; 修订日期: 2026-05-27。

基金项目: 国家重点研发计划“重大自然灾害防控与公共安全”重点专项“海浪—风暴潮数值模式及综合预警报技术”项目“近海多源影像的风-浪-潮智能监测系统”课题 (2023YFC3008204)。

作者简介: 陈红霞 (1975—), 男, 教授级工程师, 博士, 主要从事极地与区域海洋动力学方面研究。E-mail: chenhx@fio.org.cn; 林丽娜 (1987—), 女, 助理工程师, 博士, 主要从事极地与区域海洋动力学方面研究。E-mail: linln@fio.org.cn

文过程直接调控北冰洋层结稳定性、淡水储存及海冰的季节和年际变化<sup>[2-3]</sup>。在气候变暖背景下,这里海冰消退速率居北极前列,开阔水域吸热增强,进一步通过陆架-海盆交换影响北冰洋中央区的海冰质量与海洋热结构<sup>[4]</sup>。随着海冰变薄,该区域也成为未来北极航道(特别是穿极航线)的关键咽喉与油气资源勘探的前沿,其环境变化直接影响航行安全与资源开发可持续性<sup>[5]</sup>。在此背景下,对这一海域海洋环境进行精确、高效的观测与研究变得至关重要。

声学探测是认知与探索北极海洋环境的关键技术手段,其在水下目标探测、海底地形地貌测绘、水声通信以及海洋声层析成像等领域发挥着不可替代的作用。声波在海水中的传播速度(声速)是海洋声学中最核心的物理参数之一,其数值与空间分布(即声速剖面)直接决定了声线的传播轨迹、声场会聚区的位置、乃至声纳系统的探测精度与有效作用距离<sup>[6]</sup>。因此,声速剖面的精确获取是保证一切海洋声学应用有效性的前提。目前,获取全水深声速剖面主要依赖两种技术途径:一是使用声速剖面仪进行直接测量;二是通过温盐深剖面仪采集的温度、盐度和压力数据,借助经验公式间接计算得出。相较于直接测量,基于CTD数据的计算方法因其操作常规化、成本效益高、且能与广泛的历史及同步水文数据集兼容,在海洋调查与工程实践中得以广泛应用<sup>[7-8]</sup>。

国际上普遍采用的声速经验公式,如Chen和Millero<sup>[9]</sup>、Del Grosso<sup>[10]</sup>以及Wilson<sup>[11]</sup>公式,均是建立在对全球大洋、尤其是中低纬度海域大量实测数据的统计回归或理论推导基础之上,并在大部分开阔海域验证了其可靠性。然而,北极海域呈现出与中低纬度截然不同的物理海洋学特征:常年低温、强烈的垂向层化、以及由海冰融化与河流输入导致的显著淡水效应<sup>[12]</sup>。这些独特的环境条件塑造了复杂的声速剖面结构,常表现为弱负梯度或存在多个极值层<sup>[13]</sup>。在接近冰点的低温和极低盐度等极端条件下,基于常规海域数据构建的经典声速公式可能存在精度衰减的风险,其区域适用性亟待利用高精度的原位同步观测数据予以检验<sup>[10, 14]</sup>。

当前,国内针对声速公式适用性的研究多集中于中国近海及西北太平洋海域<sup>[7, 15]</sup>,而对北极海域的关注尚显不足,仅有的研究或局限于特定季节的白令海<sup>[16]</sup>,或基于再分析模型数据进行大范围评估<sup>[17]</sup>,缺乏基于高分辨率、高精度CTD与声速剖面仪同步实测数据的系统性验证与比较分析。国际上已有研究指出,在北极的波弗特海等海域,传统算法如Del Grosso公式

在高压低温环境下可能出现系统性的声速高估现象,而Chen-Millero系列公式则表现出更优的准确性<sup>[18-19]</sup>。这些发现凸显了在北极不同区域、针对不同水文结构开展算法适用性精细化评估的必要性。

近年来,中国持续开展的北极科学考察为相关研究积累了宝贵的数据基础。中国第九次北极科学考察在包括M断面在内的北冰洋太平洋扇区,首次获取了CTD与声速剖面仪同步观测剖面<sup>[20-21]</sup>。这为在北极典型环境中深入检验和比较主流声速算法的性能提供了难得的机会。

基于此,本研究拟利用中国第九次北极科学考察在M断面获取的Sea-Bird SBE 911 Plus CTD仪与声速剖面仪同步测量数据,系统计算并比较Chen-Millero(UNESCO)、Del Grosso及Wilson三种经典声速算法在北极特殊海洋环境下的输出结果与直接测量值之间的差异。通过对误差的定量统计与空间分布分析,评估各算法在该典型断面的计算精度与稳定性,旨在为我国未来在北极地区的声学调查数据处理、声学模型构建及工程应用中的算法选择提供科学依据,并对深化理解快速变化背景下北极海洋的声学特性有所贡献。

## 2 数据与处理

### 2.1 数据来源

在2018年夏季完成的中国第九次北极科学考察航次中,海洋声速剖面观测首次作为物理海洋学重点作业内容。以“雪龙”号破冰船为考察平台,我国首次采用加拿大AML公司生产的Minos声速剖面仪(Sound Velocity Profiler, SVP),并通过与美国海鸟公司生产的SBE 911plus温-盐-深剖面仪(Conductivity, Temperature, Depth, CTD)同步下放和回收的作业方式,开展了北冰洋海洋声速剖面直接观测。此次观测覆盖了北冰洋的楚科奇海台、加拿大海盆、门捷列夫海岭以及其他高纬度海域,共31个站位,获得了第一手海洋声速实测数据<sup>[22]</sup>。其中有7个站位位于门捷列夫海岭以东、楚科奇海台以西、楚科奇海以北的陆架-陆坡-海盆区域内74.8°N~77.2°N范围内的172°W经向断面(M断面)上,详细站位分布如表1所示。

观测期间(2018年8月初),M断面所在海域处于夏季融冰期,海冰密集度由南向北递增,南侧陆架区(M01-M02站附近)多为开阔水域或低密集度浮冰覆盖,北侧海盆区(M05-M07站)海冰覆盖相对密集<sup>[21]</sup>。这种南北向海冰梯度与该断面水文环境的显著空间异质性相对应,为后续算法误差的空间分布差异提供

表 1 中国第九次北极科学考察 M 断面海洋声速剖面调查站位信息

Table 1 Station Information for sound velocity profile survey at section M during the 9<sup>th</sup> Chinese Arctic Research Expedition

序号	站位	日期	起始作业时间(UTC)	经度(W)	纬度(N)	当地水深/m	测量深度/m
1	M01	2018.8.3	6:53	172°1.411'W	74°48.438'N	316	309
2	M02	2018.8.3	13:10	172°0.127'W	75°9.064'N	414	403
3	M03	2018.8.3	18:11	172°10.435'W	75°32.752'N	1 242	1 222
4	M04	2018.8.4	1:19	172°0.497'W	76°0.620'N	1 977	1 959
5	M05	2018.8.4	6:27	172°2.824'W	76°23.083'N	2 253	2 230
6	M06	2018.8.4	13:26	171°58.620'W	76°47.974'N	1 560	1 539
7	M07	2018.8.4	18:30	171°57.300'W	77°11.724'N	2 247	2 233

了宏观背景。

Minos SVP 选用的是 XCH-SV-STD 这一典型的物理海洋学传感器,该传感器的技术指标如表 2 所示;SBE 911plus CTD 的技术指标如表 3 所示。SVP 和 CTD 在航次出发前进行了鉴定校准,其中压力的检校范围是 6 000 dbar(相当于 6 000 m 水深),压力的误差是  $\pm 0.02\%$  FS(满量程)、均方根误差为 0.058 2 dbar;声速的检校范围是 1 375~1 625 m/s,声速的均方根误差为 0.011 m/s<sup>[20]</sup>。在相应技术指标下,SVP 测得的海水声速和深度测量准确度均达到《海洋调查规范 第 2 部分:海洋水文观测》规定的一级标准<sup>[23]</sup>,CTD 测得的温度、盐度和深度测量准确度均达到《海洋调查规范 第 5 部分:海洋声、光要素观测》规定的一级标准<sup>[24]</sup>。

## 2.2 数据处理与分析方法

SBE 911plus CTD 的数据处理采用仪器厂商提供的 SBE Data Processing 软件及常规流程<sup>[25]</sup>。为便于后续分析与比较,处理时仅针对下放过程中记录的原始数据,按照包括传感器校正、循环编辑在内的通用步骤进行处理<sup>[26]</sup>。选用软件内嵌的三种常用声速算

法<sup>[27]</sup>计算声速剖面,并将所有数据统一规范至 1 米深度间隔一个记录。

三种声速算法的基本形式与核心区别如下。Wilson (1960) 公式采用温度、盐度与压力的显式多项式表达,形式为  $c=c(T, S, P)$ ,其压力项系数在低温高压环境下易产生系统性高估;Del Grosso (1974) 公式同样为显式多项式,但包含丰富的温盐交互项(如  $tS$ 、 $t^2S$  等),在低温低盐条件下各交互项产生部分抵消效应,数学行为相对稳健;Chen and Millero (1977) 公式(UNESCO 推荐)采用  $c=c_0+A(T) \cdot S+B(T) \cdot S^{3/2}+C(T) \cdot S^2$  的紧凑形式,盐度项包含  $S^{3/2}$  非线性分量,在低盐端声速随盐度降低呈非线性加速衰减。三种公式均基于中低纬度海域数据构建,在北极极端温盐压条件下的适用性存在差异,这正是本文评估的核心。

Minos SVP 的数据处理采用仪器厂商提供的 SeaCast 软件。与 CTD 观测数据的选取原则一致,为避免回收时水体扰动对数据的干扰,仅采用下放过程中更为准确的观测记录。为确保数据的准确性与可靠性,对原始观测数据进行了质量检查与控制,具体

表 2 加拿大 AML 公司生产的 Minos SVP 中传感器 XCH-SV-STD 技术指标

Table 2 Technical specifications of the XCH-SV-STD sensor produced by the Canadian company AML for the Minos SVP.

指标类型	适用最大水深	声速范围	声速精确度	声速准确度	声速分辨率	响应时间
指标值	6 000 m	1 375~1 625 m/s	0.006 m/s	0.025 m/s	0.001 m/s	47 us

表 3 美国海鸟公司生产的 SBE 911plus CTD 技术指标

Table 3 Technical Specifications of the Sea-Bird SBE 911 CTD sensor produced by Sea-Bird Scientific, USA

传感器	测量范围	测量准确度	稳定度(每月)	分辨率	响应时间
电导率(S/m)	0~7	0.000 3	0.000 3	0.000 04	65 us
温度(°C)	-5~+35	0.001	0.000 2	0.000 2	65 us
压力(dbar)	10 000	0.015%FS	0.001 5%FS	0.001%FS	15 us

采用标准差法在 SeaCast 软件中剔除异常值: 即计算数据集的均值与标准差, 将超出均值 $\pm 3$ 倍标准差范围的数据点视为异常值予以剔除。由于 Minos SVP 设备稳定性高、采样频率高, 且实际观测中异常值出现频率极低, 因此该设备所获数据质量较为可靠<sup>[22]</sup>。

比较分析时, 以声速剖面仪(SVP)同步获取的实测声速数据作为“真值”评估基准。首先将声速剖面数据规范处理到 1 m 深度间隔 1 个记录, 构建与 CTD 计算声速垂向分辨率一致的验证数据集。随后同步在每个深度点上逐一计算基于 Chen-Millero (1977)、Del Grosso (1974) 和 Wilson (1960) 三种算法的计算声速与实测值的偏差。基于偏差序列, 计算各算法在测量范围内的最大绝对偏差(极端误差)、平均偏差(系统性误差)及偏差标准差(稳定性)等整体统计指标, 进行偏差检验和适应性的多维度研判。

### 3 偏差统计分析

本部分将量化计算声速与实测声速之间的差异, 并深入探究这些差异的垂向分布特征。为了细致检验不同环境条件下的三种经验公式的性能, 首先对声速剖面的整体情况进行初步分析。图 1 中分别以 M02、M07 站点为代表给出陆架陆坡区、深水海盆区内的实测声速剖面(以下简称为“MSVP”)与计算声速

剖面(以下简称为“CSVP”)分布最为典型的 2 个样例。为简便计, 将 Chen and Millero (1977)、Del Grosso (1974) 和 Wilson (1960) 三种计算声速剖面分别简称为“CSVP-C”、“CSVP-D”和“CSVP-W”。

由图 1 可见, 2 个站点处的共性特征是包括 MSVP 和 3 条 CSVP 在内的所有声速剖面从海表到海底整体上具有较好的趋势一致性, 无论在垂向变化较为平滑的 M07 站处 500 m 以深海域, 还是出现声速频繁左右抖动的 M02 站处 150–200 m 之间均为如此, 且在表现出的声道数量、声道轴深度、声道厚度和声道强度上也是近乎一致的, 反映了北极海域特有的声道分布特征<sup>[28]</sup>。这表明原始观测数据是可信的、没有出现系统性的测量错误或严重的噪声干扰, 同时也表明这 3 种算法能够准确地捕捉并反映当前断面海水声速随温度、盐度、压力(深度)变化的核心物理机制。

同时, MSVP 和 CSVP 之间的数值并不吻合, 之间存在着系统性的偏差: 从上向下, MSVP 居于最左侧, 3 条 CSVP 居于右侧; 这表明 3 种算法存在一定的系统性偏差。以 CSVP-W 最为显著, 系统性偏差随深度呈现为逐渐增大的趋势, 这表明这一算法中与压力相关的项是主要误差源, 与在波弗特海发现的计算声速在高压下被系统性高估的结论<sup>[18]</sup>是一致的。3 种算法之间也存在着一定差异: 在 300 m 以浅 3 条 CSVP

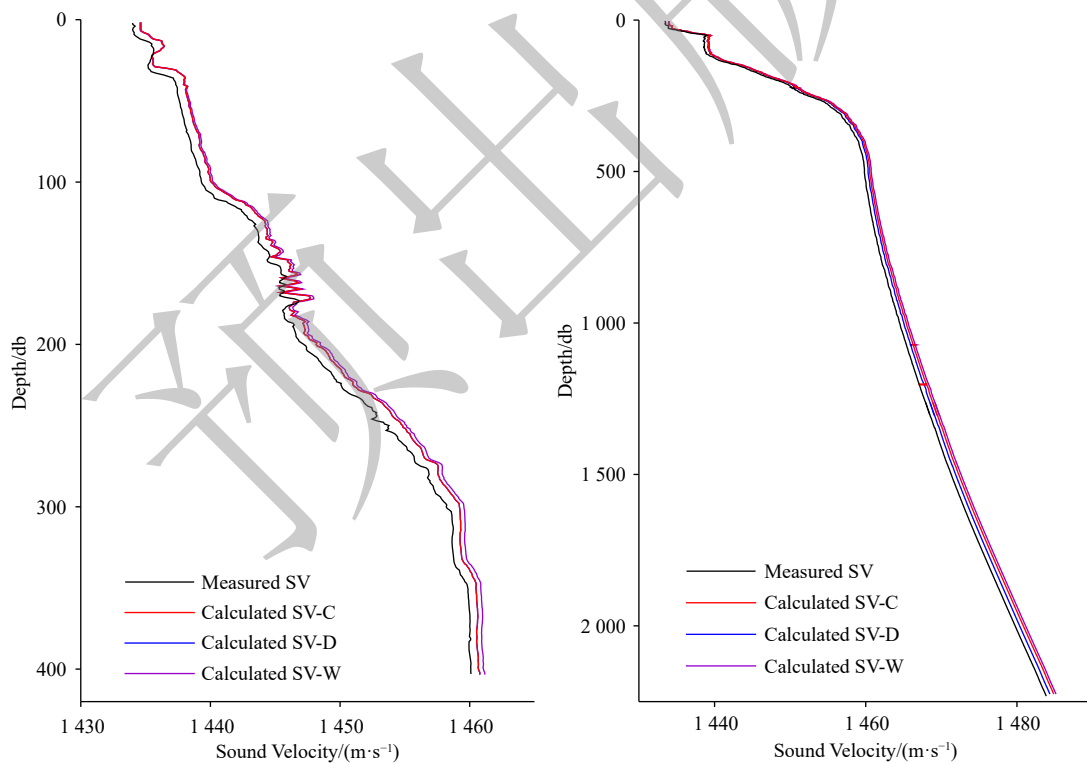


图 1 M02(左)、M07(右)站位声速剖面分布

Fig. 1 Distribution of sound velocity profiles at stations M02(left), M07(right)

基本上是重合的,随着深度的增加 3 条 CSVP 逐渐分离、CSVP-C 居于最右侧、CSVP-D 距离 MSVP 最近。

无论是依据哪一条声速剖面,在南北长约 266.69 km 的 M 断面上,300 m 以浅尤其在 250 m 以浅声速剖面结构呈现出显著的站间差异,反映出这一断面上声速分布的空间差异。在 M07 站处双声通道结构特征显著,分别是位于 25 m 以上的表面声道<sup>[29]</sup>和 60–122 m 之间的北冰洋季节性浅海声道(即波弗特声道)<sup>[30]</sup>。而在南侧的 M02 站处虽然存在表面声道,但从上向下声速剖面一致存在较为显著的左右波动,在 29 m 以浅的表面声道内出现了一个厚度约为 9 m 声速极大值区,在 155–177 m 之间出现了 4 次幅度为 1.88 m/s 的急剧波动现象,波动至 339 m 深处仍清晰可见。

注意到 M07 站处声速剖面图的横坐标轴范围是 700 m/s 的前提下,MSVP 和 3 条 CSVP 之间也存在一定的差异性,尤其是在 500 m 以深更为明显;如果局部放大,即便是在 500 m 以浅 MSVP 和 CSVP 之间也存在一定的差异。根据 MSVP 垂向整体变化情况以及 MSVP 和 3 个 CSVP 之间差异的垂向分布特征,本文在统计全深度范围内统计 3 个 CSVP 和 MSVP 之间的最大绝对偏差(Maximum Absolute Difference, MAD)、平均偏差(Mean Difference, MD)和平均偏差的标准差(Standard Deviation of Mean Deviation, SDMD)的基础上,根据 MD 随深度的分布特征在 0–200 m、200–500 m、500 m 以深 3 个范围内对这一特征值的进一步详细

分析。

### 3.1 最大绝对偏差 (Maximum Absolute Deviation, MAD)

最大绝对偏差反映算法在最不利情况下可能产生的极端误差,用于评估算法的最差精度表现。这里首先计算 3 种算法计算声速在 M 断面 7 个站点处各层面上相对于实测声速的绝对偏差,然后再统计各个站点的最大绝对偏差,在此基础上再统计出各算法在整个断面上的最大绝对偏差。

由表 4 可见,所有算法的 MAD 存在显著的空间差异。在断面南侧站点 M01、M02 处 3 个算法的 MAD 远大于其他站点,所有算法的 MAD 均不低于 2.32;其中 M01 处的 3 种算法 MAD 在所有站点中是最大的,且数值均不低于 3.56。从 M05 向北至 M07 之间,3 个算法的 MAD 数值较小,也相对比较稳定。居于其中的 M03、M04 这两个站位上, MAD 处于从大到小过渡范围。这说明任意一种算法在断面上的表现都呈现出较大的波动性,且这种波动具有非常显著的南北差异,即在北侧偏好,南侧较差。

进一步,各个站点处 MAD 最大值出现的深度上 3 种算法之间不但不尽相同,另一方面站间差异也非常大。其中 M01 站点出现在 23 m 处, M02–M04 出现在 110–170 m 之间,其余 3 个站点上均出现在 500 m 以深,在 M07 处出现在 2 209 m 处;整体上有从南向北加深的趋势。

从断面统计上看,3 种算法中 CSV-C 的 MAD 的

表 4 M 断面上计算声速的最大绝对偏差、平均偏差、偏差标准差统计 (单位: m/s)  
Table 4 Statistics of Maximum Absolute Deviation, Mean Deviation, and Standard Deviation of Deviation for CSV on Section M (in unit m/s)

序号	站点	MAD			MD			SDD		
		CSV-C	CSV-D	CSV-W	CSV-C	CSV-D	CSV-W	CSV-C	CSV-D	CSV-W
1	M01	<b>3.66</b>	<b>3.61</b>	<b>3.56</b>	0.60	0.54	0.69	<b>0.57</b>	<b>0.58</b>	<b>0.52</b>
2	M02	2.31	2.22	2.49	<b>0.95</b>	<b>0.84</b>	1.09	0.33	0.32	0.36
3	M03	1.48	1.39	1.65	0.86	0.72	1.03	0.12	0.14	0.15
4	M04	1.29	1.24	1.41	0.86	0.57	1.11	0.11	0.07	0.17
5	M05	1.13	0.90	1.43	0.88	0.55	1.12	0.17	0.06	0.24
6	M06	1.21	0.93	1.45	0.80	0.54	1.02	0.15	0.07	0.21
7	M07	1.12	0.75	1.42	0.88	0.56	<b>1.13</b>	0.18	0.05	0.24
8	最大	3.66	3.61	3.56	0.95	0.84	1.13	0.57	0.58	0.52
9	最小	1.12	0.75	1.41	0.60	0.54	0.69	0.11	0.05	0.15
10	平均	1.74	1.58	1.92	0.83	0.62	1.03	0.28	0.23	0.30

最大值最大,为 3.66 m/s。CSV-W 的 MAD 的平均值最大,为 1.92 m/s。而 CSV-D 的 MAD 平均值和最小值都是最小的,分别是 1.58 m/s 和 0.75 m/s。这表明采用 3 种算法在这一段面上进行声速计算时,CSV-D 算法的整体表现最好;而 CSV-C 算法出现了最严重的局部误差;CSV-W 算法的整体平均误差最大。

从同步性上看,CSV-C 虽然在部分站点的 MAD 较小,但在特定站点出现极端高误差,其性能随站点变化剧烈,整体可靠性差。CSV-W 在所有站点的误差都处于中等偏高水平,既没有极端高值,也从未达到过最优精度。而 CSV-D 在绝大多数站点(7 个中的 6 个)都取得了最低误差,仅在最具挑战的 M01 站处与其他算法表现接近。它不仅整体平均表现相对是最好的,还能达到全局最高单点精度,优势具有普遍性。

整体上,表 4 既体现了 3 种算法在 M 断面上的适用性差异,其中的最小值已达 0.75 m/s,这一数值远大于测量声速准确度(0.025 m/s),这体现了 3 种算法普遍存在着较大的偏差。这一偏差一方面和算法自身有关,另一方面和当地的环境紧密相关。以 M01 站处为代表,该站位独特的垂向温盐结构,特别是表层低盐水帽的盐度水平及其跃层梯度<sup>[31]</sup>与声速大小存在明确的定量响应关系。盐度每偏离深层高盐水基准(约 34.6 PSU)1 PSU,平均声速偏差约增加 0.24 m/s;当盐度低于 30 PSU 时,偏差呈非线性急剧放大。事实上,断面南端同时受到太平洋入流水、波弗特环流和跨极地漂流的影响,且底部地形诱导和聚集作用可能会产生上升流或混合过程,而开展观测时处于夏季太阳辐射增强时期,冰融水会形成厚度从几米到二三十米不等的浅层淡水帽,当地复杂的水团结构和异常的水体斑块都会导致 CTD 和 SVP 剖面数据在垂直与水平方向上出现剧烈的阶梯状结构或异常值,破坏温盐曲线的连续性和均质性,引入的测量不确定性进而会使得极端误差放大。

与已有中低纬度海域的研究相比,本文揭示的误差量级显著偏大。吴碧等(2014)在南海海域基于 CTD 与 SVP 同步观测对比 9 种声速算法发现, Wilson、Del Grosso 与 Chen-Millero 算法的计算差异值范围分别为  $-0.16\sim-0.425$  m/s、 $-0.616\sim-0.114$  m/s 和  $-0.561\sim-0.32$  m/s,在浅海(<100 m)部分算法精度可达计算误差量级(约 0.06 m/s)。黄辰虎等<sup>[17]</sup>在全球海域精度分析中也指出, Del Grosso 与 Chen-Millero 公式在常规海域适用性较强,误差普遍可控。然而,本文在门捷列夫海岭海域获得的断面平均 MAD 达 0.75~1.92 m/s,最

大达 3.66 m/s,远高于中低纬度海域的误差水平。这表明北极极端低温、低盐及强层化环境显著放大了经验公式的计算不确定性,现有基于中低纬度数据构建的声速算法在北极海域的实用性受到明显限制。

### 3.2 平均偏差 ( Mean Deviation, MD )

平均偏差表示所有测试样本上误差的算术平均值,反映了算法在整体或普遍情况下的精度水平,用于评估算法的平均性能或系统性偏差,是衡量算法整体准确度和系统性误差方向的核心指标。这里除了类似于最大绝对偏差那样开展平均偏差统计外,同时还在垂向上分层开展平均偏差统计。

由表 4 可见,3 种算法 MD 也同样存在着较为显著的空间差异。在断面最南端的 M01 站点处 3 个算法的 MD 都是最小的,且都比断面上的 MD 最大值低 50% 以上;而 CSV-C 和 CSV-D 的 MD 最大值出现在断面南侧的 M02 站点处,CSV-W 的 MD 最大值出现在断面最北端的 M07 站点处。在 M03-M07 之间,CSV-C 的 MD 无明显的随站位变化,基本在 0.80-0.88 m/s 之间小幅波动。CSV-D 的 MD 仅在 M02、M03 站处偏差相对较高,在其他站点则显著降低且站间差异较小,控制在 0.54-0.57 m/s 之间。CSV-W 的 MD 从南向北整体呈上升趋势(从 0.69 增至 1.13),且在大部分站点产生了较为严重的高估( $\geq 1.0$  m/s)。这表明在 M 断面上,3 种算法无论在空间范围上还是准确度上都表现出显著的差异。

在 0-200 m、200-500 m 及 500 m 以深 3 个深度范围内,3 种算法 MD 的分段统计结果如表 5 所示。由表可见 CSV-C 和 CSV-W 这 2 种算法的 MD 有着显著的随深度变化的特点。在 0-200 m 范围内,3 种算法的平均 MD 相对最小(0.63-0.77 m/s),说明在海洋上层各算法的系统性偏差相对较低。在 200-500 m 内 CSV-C 和 CSV-W 的平均 MD 普遍增大,尤其是 CSV-W 达到 0.92 m/s,说明此时算法表现开始分化,CSV-W 的高估加剧。在 500 m 以深 CSV-C 和 CSV-W 的 MD 进一步显著增大,分别高达 0.91 m/s 和 1.17 m/s,表明在深层海洋中这 2 种算法存在严重的系统性高估,且 CSV-W 的问题最为突出。

此外,3 种算法的准确度差异非常显著。在所有深度和绝大多数站位上,CSV-D 其 MD 均为最低,表现出最强好的稳定性与准确性。尤其在 500 m 以深其平均 MD 仅有 0.58 m/s,显著低于 CSV-C(0.91 m/s)和 CSV-W(1.17 m/s),说明其受深度影响最小,系统性偏差控制最佳。CSV-C 虽然在浅层和中层表现与 CSV-D 差距不大,但在深层 MD 明显上升(0.91 m/s),

表 5 M 断面上不同深度范围内三种 CSVP 和 MSVP 之间 MD 差异 (单位: m/s)

Table 5 MD differences among 3 kinds of CSVP and MSVP in different layers on M section (in unit m/s)

序号	站位	0–200 m			200–500 m			500 m 以深		
		CSVP-C	CSVP-D	CSVP-W	CSVP-C	CSVP-D	CSVP-W	CSVP-C	CSVP-D	CSVP-W
1	M01	0.71	0.69	0.75	0.39	0.26	0.58	—	—	—
2	M02	0.86	0.82	0.96	1.03	0.87	1.21	—	—	—
3	M03	0.88	0.82	0.98	0.86	0.69	1.05	0.86	0.64	1.07
4	M04	0.67	0.62	0.78	0.77	0.60	0.96	0.91	0.55	1.18
5	M05	0.56	0.47	0.65	0.69	0.51	0.88	0.95	0.57	1.22
6	M06	0.57	0.51	0.65	0.69	0.52	0.88	0.87	0.55	1.13
7	M07	0.56	0.51	0.64	0.68	0.51	0.87	0.95	0.57	1.23
8	平均	0.69	0.63	0.77	0.73	0.57	0.92	0.91	0.58	1.17

表明其对深层海洋条件的适应性较弱。而 CSV-W 在所有深度范围内均表现最差,且 MD 随深度急剧增大(从 0.77 m/s 增至 1.17 m/s);尤其在 500 m 以深其 MD 在所有站位均超过 1.0 m/s,尤其在 M05、M07 站达到 1.22–1.23 m/s,说明存在严重的、普遍的系统性高估。

由于 0–200 m 深度范围内水文特征变化最为剧烈和复杂,在表 6 中进一步将 0–200 m 分为 3 段,并分别给出 0–25 m、25–70 m、75–200 m 范围内 3 种算法 MD 的分段统计结果;在图 2 中分别给出这一深度范围内 0–25 m 范围内 MD 最大的 M01 站和 75–200 m 范围内 MD 最大的 M03 站的声速剖面图。

表 6 M 断面上 0–200 m 范围内不同层内三种 CSVP 和 MSVP 之间 MD 差异 (单位: m/s)

Table 6 MD differences among 3 kinds of CSVP and MSVP in different layers within the 0–200 m range on M section (in unit m/s)

序号	站位	0–25 m			25–75 m			75–200 m		
		CSVP-C	CSVP-D	CSVP-W	CSVP-C	CSVP-D	CSVP-W	CSVP-C	CSVP-D	CSVP-W
1	M01	1.73	1.68	1.58	1.08	1.05	1.15	0.40	0.38	0.46
2	M02	0.67	0.64	0.59	0.81	0.79	0.87	0.92	0.86	1.06
3	M03	0.67	0.64	0.60	0.80	0.77	0.85	0.94	0.87	1.08
4	M04	0.60	0.57	0.51	0.65	0.62	0.69	0.69	0.63	0.85
5	M05	0.53	0.44	0.42	0.51	0.44	0.55	0.59	0.49	0.73
6	M06	0.53	0.50	0.43	0.51	0.47	0.52	0.59	0.53	0.74
7	M07	0.50	0.48	0.41	0.50	0.47	0.51	0.58	0.52	0.72
8	平均	0.75	0.71	0.65	0.69	0.66	0.73	0.67	0.61	0.81
9	M02-M07 平均	0.58	0.55	0.49	0.63	0.59	0.67	0.72	0.65	0.86

单独从图 2 上可见,在这一范围内 CSVP 簇非常集中,甚至在某些深度上发生重合;在 M03 站位上 CSVP 簇和 MSVP 是完全分离的,而在 M01 站位上 CSVP 簇和 MSVP 发生了多次交叉。结合表 6 和图 2 可见, M01 站属于断面上的异常点。此处 0–25 m 范围内 CSVP 和的 MD 异常高,3 种算法的 MD 均不低于 1.58 m/s,且远高于其他站点。大致在 50 m 层处 MD 和其他站位相当,向下至 75–200 m 层 MD 急剧下

降,下降幅度均超过 1.10 m/s。在 M03 站位处,3 种算法的 CSVP 和 MSVP 是基本平行,它们之间是基本重合的,均可步调一致、幅度相当反映出声速随深度变化的频繁波动现象。不等同于重合或者平行之处在于,随着深度的增加 CSVP 和 MSVP 之间的间距有逐渐增大的趋势,CSVP 簇开始分散。

虽然表 6 中断面 3 种算法的平均 MD 随深度增加出现 3 种截然不同的变化趋势,但在去除异常站

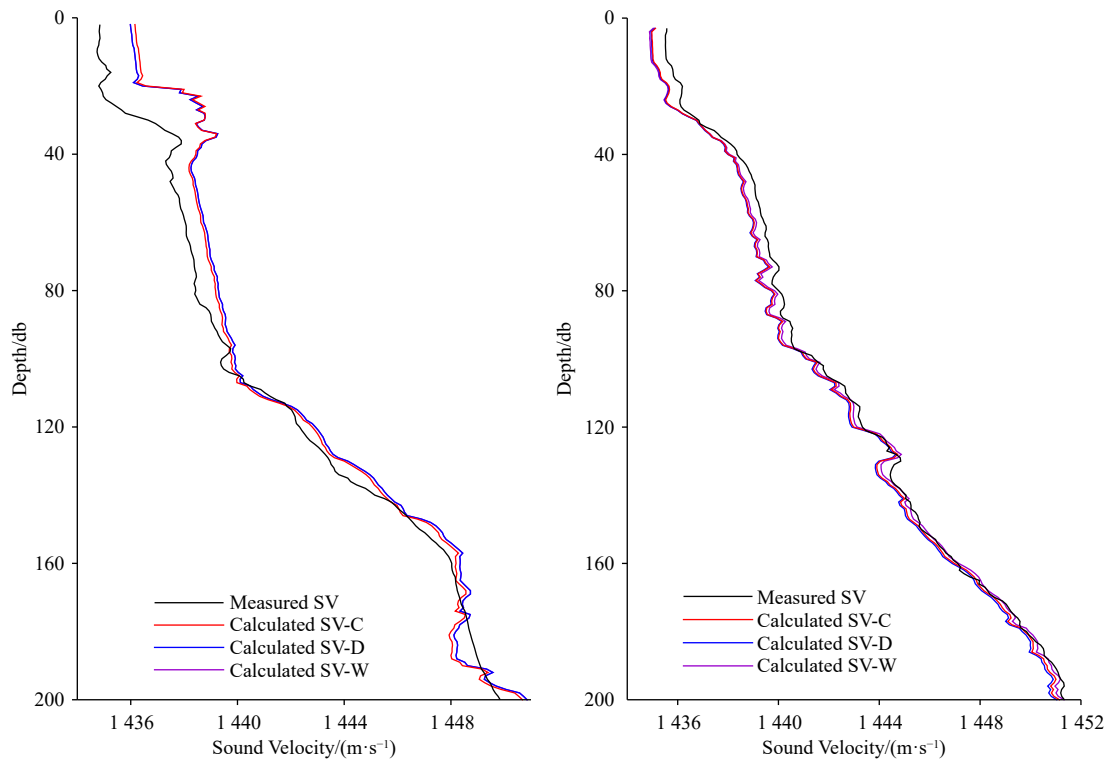


图2 M01(左)、M03(右)站位0–200 m声速剖面分布

Fig. 2 Distribution of sound velocity profiles within 0–200 m at stations M01 (left), M03 (right)

M01后,平均MD随深度增加的变化趋势是一致的,可以更清晰地展示了算法之间的区别。其中CSV-D与CSV-C的MD随深度平缓增加,尤其是CSV-D的MD值自上而下从0.55 m/s小幅平缓增加至0.65 m/s,展现了最佳的深度适应性和稳健性,保持着较低且稳定的误差,表明它们能较好地适应水文结构的垂直变化。

从空间分布上看,一方面CSV-W尽管在0–25 m的MD最小,但却自上而下显著增大,75–200 m平均MD跃升至0.81 m/s,成为3个算法中最高的,表现出严重的深度依赖性;另一方面CSV-W在M03–M07之间的深层MD普遍极高(1.07–1.23 m/s),且呈现从M03到M07略微上升的趋势,表明其高估问题在空间上具有普遍性和一定的北向增强趋势。CSV-D一方面在0–200 m之间的3个子层及绝大多数站位上,其MD均为最低或与最低值相当,尤其在75–200 m其平均MD(0.61 m/s)显著低于CSV-W(0.81 m/s),展现了其准确度优势;另一方面在深层的MD在各站间保持稳定(0.55–0.64 m/s),无明显空间趋势,再次展现其优势。而CSV-C在0–25 m的MD较低(平均0.58 m/s),但在随着深度的增加与CSV-D的差距逐渐加大。

综上所述,3种算法的性能与深度适应性差异显著。其中CSV-D算法表现最优且稳健;它在全深度范围(从表层到深层)均能保持最小或领先的系统性

偏差(0.57–0.63 m/s),是唯一适用于全深度分析的可靠算法。CSV-W算法存在严重的深度依赖性缺陷;它虽能在0–25 m准确度较高,但其MD随深度急剧恶化,尤其在500 m出现系统性高估,不适用于深层声速计算。CSV-C算法表现居中但稳健性不足;其MD介于CSV-D和CSV-W二者之间,但对表层极端水文条件(如M01站)最为敏感,且在深层的精度显著劣于CSV-D。

### 3.3 偏差标准差 (Standard Deviation of Deviation, SDD)

偏差标准差反映算法在各站点不同深度上误差的离散程度,用于评估算法在该站点整体表现的稳定性或一致性。SDD值越小,表明算法在该站点的计算结果在不同深度上的误差波动越小,即结果越稳定可靠。

由表4可见,所有算法的SDD存在显著的空间差异。在断面南侧站点M01、M02处,3种算法的SDD远大于其他站点,所有算法的SDD均不低于0.32 m/s;其中M01处的SDD在所有站点中是最大的,且三种算法的数值均不低于0.52 m/s。从M05向北至M07之间,三种算法的SDD数值较小,也相对比较稳定。对于CSV-C和CSV-W的SDD,居于其中的M03、M04这两个站位居于整个断面上的低值区,而对于CSV-W的SDD,这两个站位处于从大到小过渡

范围。这说明任意一种算法在断面上的误差稳定性都呈现出较大的波动性,且这种波动具有非常显著的南北差异,即在南侧站点稳定性较差,北侧站点稳定性较好。

进一步观察,各站点上 SDD 最大值对应的算法并不相同,体现出不同算法在不同环境下的稳定性表现各异。从断面整体统计上看,3种算法中 CSV-D 和 CSV-C 的 SDD 最大值较大,均不低于 0.57 m/s。CSV-W 的 SDD 平均值最大,为 0.30 m/s。而 CSV-D 的 SDD 平均值和最小值都是最小的,分别是 0.23 m/s 和 0.05 m/s。这表明采用 3 种算法在这一断面进行声速计算时,尤其是忽略 M01 这一异常站点时,CSV-D 算法误差的波动性整体最小,表现最稳定;CSV-W 算法的误差波动性平均最大;而 CSV-C 算法误差波动性居中。

从空间一致性上看,CSV-C 虽然在 M03、M04 等部分站点的 SDD 较小(0.11–0.12 m/s),但在 M01 站出现极端高值(0.57 m/s),其稳定性随站点变化剧烈。CSV-W 在所有站点的 SDD 都处于中等偏高水平( $\geq 0.15$  m/s),既未表现出最优的稳定性,也未出现最差的极端情况,但其平均值最高,说明其误差普遍较为离散。而 CSV-D 在绝大多数站点(7 个中的 5 个,即 M04–M07)都取得了最低的 SDD,仅在 M01 和 M03 站略高于或等于其他算法。它不仅整体波动性最小,还在多个站点(如 M07, SDD=0.05 m/s)达到了极高的稳定性水平。

整体上,表 4 既体现了 3 种算法在 M 断面上稳定性的适用性差异,在不同深度上普遍存在着误差波动。在 3 种算法中,M04–M07 之间 CSV-P-D 的偏差标准差最小,分别是 CSV-P-C 和 CSV-W 的 43% 和 30%,表现出显著的相对优势。在 M02 和 M03 这两个站点处,CSV-P-D 的偏差标准差与 CSV-P-C 相当,略优于 CSV-P-W。尽管在异常站点 M01 处 CSV-P-D 的偏差标准差最高,在整个断面上看,3 种算法中 CSV-P-D 是适用性最强的算法。

## 4 结论

本研究通过对比实测声速剖面与基于 3 种声速算法的计算声速剖面,在跨越陆架至深水海盆的北极 M 断面,系统评估了不同算法的精度、稳定性及其环境适应性。分析揭示了算法性能的显著差异及其与海洋水文结构和空间异质性的紧密联系。

### 4.1 算法性能的整体评估与差异来源

尽管三种 CSV-P 与 MSVP 在整体垂向趋势、声道特征(如声道数量、声道轴深度、强度)上表现出良好

的一致性,验证了观测数据的可靠性及算法对声速核心物理机制(温度、盐度、压力)的捕捉能力,但系统性的计算偏差普遍存在。分析表明,所有算法的偏差量级(如 MAD 最小值 0.75 m/s)远高于仪器测量准确度( $\sim 0.025$  m/s),这主要归因于算法模型本身的局限性以及北极特殊且复杂的环境影响。

三种算法的性能排序明确:CSV-P-D 综合表现最优,其次为 CSV-P-C,而 CSV-P-W 表现最差。这一排序在最大绝对偏差、平均偏差和偏差标准差三项指标上均得到一致印证。CSV-P-D 不仅在大多数站点和深度层保持最低的平均偏差(断面平均 MD 0.62 m/s)和最小的误差离散度(断面平均 SDD 0.23 m/s),其 MAD 的平均值和最小值也最低,展现了相对较好的准确性、稳定性和鲁棒性。

CSV-P-W 算法表现出显著的深度依赖性系统高估。其 MD 从 0–200 m 层的 0.77 m/s 急剧增至 500 m 以深的 1.17 m/s,尤其在深层普遍超过 1.0 m/s。这与 Vazquez 等<sup>[18]</sup>在波弗特海指出的该算法在高压下系统性高估的结论相符,表明其压力相关项是主要误差源,限制了其在深层海域的应用。

CSV-P-C 算法表现居中,但其稳定性存在明显短板。在断面最南端的 M01 站,其 MAD(3.66 m/s)和 SDD(0.57 m/s)均出现极端高值外,在 500m 以深,其 MD(0.91 m/s)也显著高于 CSV-P-D,表明其对深层环境的适应性弱于 CSV-P-D。

### 4.2 误差的空间分布特征及其环境关联

误差分析揭示了强烈的空间异质性。所有算法的最大偏差和最大误差离散度均集中在断面南侧的 M01 和 M02 站,而北侧的 M05–M07 站误差较小且稳定。这种南北差异与断面的水文地理特征紧密相关。南侧陆架区同时受太平洋入流水、波弗特环流、跨极地漂流及夏季冰融淡水输入等多重动力和热力过程影响,易形成复杂的层化结构、水团斑块和强烈的垂向混合。M01 站 0–25 m 层异常高的 MD(均  $\geq 1.58$  m/s)及 M02 站 150–200 m 层声速剖面的高频波动,正是这种复杂性的直接体现,给声速经验公式带来了巨大挑战。相比之下,北侧深水海盆区(如 M07 站)水文结构相对均一稳定,算法表现因而更优。

垂向分布上,误差特征与海洋分层结构密切相关。0–200 m 范围内受太阳辐射、融冰、湍流混合影响最大,水文变化最剧烈。三种算法在此层的平均 MD 相对最低(0.63–0.77 m/s),但 CSV-P-C 和 CSV-P-W 在特定站点(如 M01)表层出现误差峰值,表明它们对淡水帽等极端表层条件的适应性较差,这是因为

采用了含有非线性盐度项,在低盐端声速随盐度降低呈非线性加速衰减。CSVP-D在此层保持了最低且最稳定的MD。

在200–500 m的范围内,CSVP-W的MD开始显著增大(平均0.92 m/s),算法性能分化加剧。在500 m以深CSVP-C和CSVP-W的系统性高估问题凸显,MD分别达0.91 m/s和1.17 m/s,而CSVP-D的MD仍能稳定在较低水平(0.58 m/s),显示出其在高压环境下独特的精度优势。

### 4.3 对北极声学调查与应用的启示

本研究结果对北极声学观测、水下通信、定位及声学层析等应用具有直接参考价值。

在北极海域,尤其在进行全水深或深层声速计算时,应优先采用Del Grosso(1974)公式,以获取更高的准确度和稳定性。在分层算法推荐方面,上层(0~200 m)以Del Grosso(1974)为首选、Chen-Millero需谨慎使用、Wilson不宜首选;深层(>500 m)则仅推荐Del Grosso(1974)。Wilson(1960)公式因严重的深度依赖性高估,不推荐用于深层分析。Chen and Millero(1977)公式可用于浅中层,但需警惕其在复杂表层条件下的不稳定性。

所有经验公式在环境复杂的南侧陆架区表现显著下降,表明现有通用模型可能未能完全捕捉北极近岸/陆架区特有的水文关系。未来有必要针对北极特定水团(如太平洋入流水、冰融水影响下的表层水)开展算法参数的区域性优化或建立本地化的声速模型。即使在表现最佳的CSVP-D算法下,计算声速仍

存在平均约0.6 m/s的系统性偏差,也有必要进行区域性修正。而其在复杂海域局部可能超过3.6 m/s,这在进行高精度声学反演或长距离传播计算时是不可忽略的误差源,需在不确定性分析中予以充分考虑。

本研究的误差结果对北极工程声学应用具有直接的定量参考意义。声速不确定性是水声测距与声纳定位的主要误差源,其影响随传播距离线性放大。以门捷列夫海岭海域典型海盆水深(约2 000 m)估算,采用Del Grosso公式时,0.62 m/s的平均偏差将引入约0.9 m的测距误差;若误用Wilson公式(深层偏差1.17 m/s),测距误差将增至约1.6 m。对于合成孔径声纳(SAS)成像,声速测量误差导致的方位分辨率损失随探测距离线性增加<sup>[32]</sup>,本文M01站出现的3.66 m/s极端偏差与显著的垂向声速梯度叠加,将对百米级探测距离的成像聚焦构成不可忽视的影响。因此,在北极复杂水文环境下进行高精度声纳探测或水下定位时,算法选择引入的声速误差应在系统不确定性评估中予以充分考虑。

未来调查研究工作可加强对以M断面为代表的陆架陆坡区域的CTD与SVP强化观测,尤其是对M01-M03之间乃至M01向南延伸空间加密观测。在调查时间上可进一步拓展至更多季节和年份,以评估算法在不同冰情和水文阶段的性能;同时,可结合更多同步的水文、化学观测数据,深入剖析导致算法偏差的具体水团属性或物理过程,为发展适用于北极复杂环境的区域性高精度声速模型或算法修正方案奠定基础。

### 参考文献:

- [1] 张占海. 中国第二次北极科学考察报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2004.  
Zhang Zhanhai. The Report of 2003 Chinese Arctic Research Expedition[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004.
- [2] Shimada K, Kamoshida T, Itoh M, et al. Pacific Ocean inflow: influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(8): L08605.
- [3] Woodgate R A. Increases in the Pacific inflow to the Arctic from 1990 to 2015, and insights into seasonal trends and driving mechanisms from year-round Bering Strait mooring data[J]. *Progress in Oceanography*, 2018, 160: 124–154.
- [4] Serreze M C, Barry R G. Processes and impacts of arctic amplification: a research synthesis[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 77(1/2): 85–96.
- [5] Smith L C, Stephenson S R. New trans-arctic shipping routes navigable by midcentury[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(13): E1191–E1195.
- [6] Nazarenko Y V, Sidorov D D, Petnikov V G, et al. On the accuracy of distance estimates based on sound signal propagation time on the Arctic shelf[J]. *Acoustical Physics*, 2024, 70(3): 521–526.
- [7] 吴碧, 陈长安, 林龙. 声速经验公式的适用范围分析[J]. *声学技术*, 2014, 33(6): 504–507.  
Wu Bi, Chen Chang'an, Lin Long. Analysis of applicable scope of empirical equation for sound velocity[J]. *Technical Acoustics*, 2014, 33(6): 504–507.
- [8] 彭莉虹, 张宝金, 顾元, 等. 海水声速模型研究进展及南海声速模型展望[J]. *中国海洋平台*, 2023, 38(5): 20–26,87.  
Peng Lihong, Zhang Baojin, Gu Yuan, et al. Research progress of seawater sound velocity models and prospects of sound velocity models in the South China Sea[J]. *China Offshore Platform*, 2023, 38(5): 20–26,87.
- [9] Chen C T A, Millero F J. Speed of sound in seawater at high pressures[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1977, 62(5):

- 1129–1135.
- [10] Del Grosso V A. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations)[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1974, 56(4): 1084–1091.
- [11] Wilson W D. Speed of sound in sea water as a function of temperature, pressure, and salinity[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1960, 32(6): 641–644.
- [12] 李欣, 张月, 董琪. 北极海域水文特征变化研究进展[J]. *气象水文海洋仪器*, 2022, 39(2): 39–44.  
Li Xin, Zhang Yue, Dong Qi. Research progress on the changes of hydrological characteristics in the Arctic waters[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instrument*, 2022, 39(2): 39–44.
- [13] 陈红霞, 刘健康, 林丽娜, 等. 基于实测声速数据的北极声速剖面研究及其成因分析[J/OL]. *海洋科学进展*, 2026: 1–14.  
<https://link.cnki.net/urlid/37.1387.P.20251210.1550.002>.
- [14] Leroy C C. Development of simple equations for accurate and more realistic calculation of the speed of sound in seawater[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1969, 46(1B): 216–226.
- [15] 陈红霞, 吕连港, 华锋, 等. 三种常用声速算法的比较[J]. *海洋科学进展*, 2005, 23(3): 359–364.  
Chen Hongxia, Lü Liangang, Hua Feng, et al. Comparison between three commonly used algorithms of sound speed[J]. *Advances in Marine Science*, 2005, 23(3): 359–364.
- [16] 高飞, 潘长明, 冯盼盼, 等. 夏季白令海声速剖面分布特征[J]. *海洋通报*, 2014, 33(2): 180–187.  
Gao Fei, Pan Changming, Feng Panpan, et al. Characteristics of sound speed profile in Bering sea in summer[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(2): 180–187.
- [17] 黄辰虎, 周丰年, 申家双, 等. 全球海域最优声速计算模型的综合选定 (二): 精度分析及实际应用[J]. *海洋测绘*, 2016, 36(4): 16–20,30.  
Huang Chenhu, Zhou Fengnian, Shen Jiashuang, et al. Selection of optimal sound velocity model in the global ocean, Part II: precision analysis and its application[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2016, 36(4): 16–20,30.
- [18] Vazquez H J, Cornuelle B D, Worcester P F, et al. Using long-range transmissions in the Beaufort Gyre to test the sound-speed equation at high pressure and low temperature[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2023, 154(4): 2676–2688.
- [19] Dushaw, B. D. , & Sagen, H. . A Comparative Study of Moored/Point and Acoustic Tomography/Integral Observations of Sound Speed in Fram Strait Using Objective Mapping Techniques. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, 33(10): 2079–2093.  
<https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0251.1>
- [20] 魏泽勋, 陈红霞, 雷瑞波. 中国第九次北极科学考察报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2019.  
Wei Zexun, Chen Hongxia, Lei Ruibo. Report on the Ninth Chinese Arctic Scientific Expedition[M]. Beijing: Ocean Press, 2019.
- [21] Wei Zexun, Chen Hongxia, Lei Ruibo, et al. Overview of the 9th Chinese national arctic research expedition[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2020, 13(1): 1–7.
- [22] 陈红霞, 林丽娜, 刘娜, 等. 中国第九次北极考察声速剖面数据集 (2018 年)[J]. *中国科学数据*, 2025, 10(04): 1–11.  
Chen H X, Lin L N, Liu N, et al. A dataset of acoustic profiles from the 9th Chinese Arctic Expedition (2018)[J]. *China Scientific Data*, 2025, 10(04): 1–11.
- [23] GB/T 12763.2-2007, 海洋调查规范 第 2 部分: 海洋水文观测[S]. 北京: 中国标准出版社.  
GB/T 12763.2-2007, Specifications for oceanographic survey—Part 2: marine hydrographic observation[S]. Beijing: Standards Press of China.
- [24] GB/T 12763.5-2007, 海洋调查规范 第 5 部分: 海洋声、光要素调查[S]. 北京: 中国标准出版社.  
GB/T 12763.5-2007, Specifications for oceanographic survey—Part 5: survey of acoustical and optical parameters in the sea[S]. Beijing: Standards Press of China.
- [25] Van Haren H. Ship motion effects in CTD-data from weakly stratified waters of the Puerto Rico trench[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, 105: 19–25.
- [26] 杨少磊, 谢玲玲, 杨庆轩. SBE911plus CTD 剖面仪的现场校正与数据处理[J]. *海洋技术*, 2008, 27(3): 23–26,30.  
Yang Shaolei, Xie Lingling, Yang Qingxuan. Field calibration and data-processing of SBE911plus CTD profiler[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2008, 27(3): 23–26,30.
- [27] Siccha M, Hanfland C. Physical oceanography during RV POLARSTERN cruise PS130/2 (Version 1.0) [Data set]. PANGAEA, 2023. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.962304>[reference:1].
- [28] 黄海宁, 刘崇磊, 李启虎, 等. 典型北极冰下声道多途结构分析及实验研究[J]. *声学学报*, 2018, 43(3): 273–282.  
Huang Haining, Liu Chonglei, Li Qihu, et al. Multipath structure of the typical under-ice sound channel in Arctic: theory and experiment[J]. *Acta Acustica*, 2018, 43(3): 273–282.
- [29] 吴绍维, 孙鑫, 柯磊, 等. 距离相关的北极浅海冰边缘区声传播研究[J]. *噪声与振动控制*, 2025, 45(1): 14–20,52.  
Wu Shaowei, Sun Xin, Ke Lei, et al. Range-dependent study of acoustic propagation in the marginal ice zone in the shallow arctic ocean[J]. *Noise and Vibration Control*, 2025, 45(1): 14–20,52.
- [30] Duda T F, Zhang W G, Lin Y T. Effects of Pacific Summer Water layer variations and ice cover on Beaufort Sea underwater sound ducting[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2021, 149(4): 2117–2136.

- [31] Tarasenko A, Supply A, Kusse-Tiuz N, et al. Properties of surface water masses in the Laptev and the East Siberian seas in summer 2018 from in situ and satellite data[J]. *Ocean Science*, 2021, 17(1): 221–247.
- [32] Ji Xia, Zhou Lisheng, Cong Weihua. Effect of incorrect sound velocity on synthetic aperture sonar resolution[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2019, 283: 04013.

## Applicability Comparison of Three Sound Velocity Algorithms in the Mendeleev Ridge Area of the Arctic Ocean ——Based on In Situ Data from the 9<sup>th</sup> Chinese National Arctic Expedition

CHEN Hongxia<sup>1,2</sup>, LIN Lina<sup>1,2</sup>, LIU Na<sup>1,2</sup>, YU Junhao<sup>1,2</sup>

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China*; 2. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, MNR, Qingdao 266061, China*)

**Abstract:** Sound velocity is a core physical parameter in marine acoustic detection and applications, and its accuracy directly determines the reliability of technologies such as underwater acoustic communication, seabed topographic mapping, and acoustic tomography. Currently, sound velocity profiles are primarily obtained indirectly through empirical formulas using Conductivity-Temperature-Depth (CTD) data, among which the Chen-Millero (1977), Del Grosso (1974), and Wilson (1960) formulas are the three most commonly used algorithms globally. However, these formulas were largely developed based on ocean data from mid and low latitudes, and their applicability in the Arctic Ocean—characterized by low temperatures, strong stratification, and significant freshwater input—has not been fully validated. This study utilizes synchronized high-precision CTD and Sound Velocity Profiler (SVP) data collected along the 172°W meridional section east of the Mendeleev Ridge during the 9th Chinese National Arctic Expedition (2018) to systematically compare the computational accuracy of these three algorithms under typical Arctic environmental conditions. The results indicate that along this section, the Del Grosso (1974) empirical formula exhibits the best overall performance, demonstrating the highest accuracy (mean bias of 0.62 m/s) and optimal stability (standard deviation of bias of 0.23 m/s) across the entire section and full depth range, making it the preferred algorithm for regional sound velocity calculation. The Wilson (1960) formula shows a significant depth-dependent systematic overestimation, with a mean bias of 1.17 m/s below 500 m depth, which renders it unsuitable for deep-layer calculations in the Arctic. The Chen and Millero (1977) formula exhibits intermediate overall performance but is sensitive to extreme surface hydrological conditions, with systematic overestimation also occurring in deep layers. The algorithm errors display distinct spatial and vertical heterogeneity that is closely related to the complexity of the hydrological environment, and the unique hydrological processes of the Arctic Ocean significantly amplify the computational uncertainties of existing empirical formulas.

**Key words:** The 9<sup>th</sup> Chinese Arctic Scientific Expedition; Arctic Ocean; Mendeleev Ridge; sound velocity algorithm; Sound velocity profiler; Conductivity-Temperature-Depth profiler (CTD)