

黄二辉, 杨燕明, 文洪涛, 等. 北半球夏季中高纬海洋声散射层分布研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(7): 52–64, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.07.005

Huang Erhui, Yang Yanming, Wen Hongtao, et al. Research on the distribution of sound scattering layer in the middle and high latitudes ocean of the Northern Hemisphere in autumn[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(7): 52–64, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.07.005

北半球夏季中高纬海洋声散射层分布研究

黄二辉¹, 杨燕明¹, 文洪涛¹, 周鸿涛¹

(1. 自然资源部第三海洋研究所 海洋声学 & 遥感实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 利用第八次北极调查走航 ADCP 后向散射强度数据, 结合太阳高度、海冰密集度和实测水体环境参数数据, 统计分析了中高纬海洋声散射层的时空变化特征。结果表明, 纬度越高, 声散射层在海表滞留时间越短, 即使在极昼期间及全海冰覆盖海域, 虽然其迁移幅度和后向散射强度减弱, 但仍受太阳高度变化影响, 且二者具有较强的时序相关性; 在北极中央海域, 不仅声散射层迁移活动较弱, 且出现无明显散射层的情况, 可能是因为该海域浮游动物和鱼类聚集度相对较低且迁移活动微弱, 超出了本文所用 ADCP 的探测精度范围; 从鄂霍次克海至白令海西南海域, 往返 ADCP 数据均显示有两个后向散射强度上高下低, 但垂直迁移时间同步的声散射层, 且二者间距随纬度增加而逐渐减小并合为一体, 这可能是由不同生活习性的海洋生物造成的。

关键词: 中高纬; 声散射层; 太阳高度角; 后向散射强度; 垂直迁移

中图分类号: P714

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)07-0052-13

1 引言

在渔业和生态研究方面, 声散射层常用于观测分析浮游动物、鱼类的丰度和垂直分布, 甚至可区分生物个体和类型, 研究和监测海洋环境及浮游动物和鱼类的运动规律^[1-3]; 在水声学研究方面, 它与目标探测及混响背景直接相关^[4-6]; 组成声散射层的浮游动物和鱼类不仅是海洋生物的重要食物来源, 而且其日常垂直迁移对全球海洋碳的循环和流通有重要意义^[1-3, 7-8]。常用于声散射层的探测和测量设备主要有(下放式声学多普勒^[9]/船载声学多普勒^[10]/声相关^[11])流速剖面仪、(单波束/多波束)回声测深仪^[12]和渔探仪^[13]等。

前人的诸多研究表明: 无论淡水河流湖泊, 还是近远海甚至极地海域^[14], 都存在一个或多个由浮游动物和鱼类集结的生物声散射层(简称为“声散射层”)^[1, 3], 对于声散射层中生物体的垂直迁移特性, 其公认的主要诱因是其趋光性^[1, 15-19], 但也会受到其他

水体环境参数^[20-22](如温度、溶解氧、透明度、叶绿素浓度等), 生物体内生物钟以及捕食压力的影响^[18, 22]。其中, Daniele 和 Mislan^[23]利用全球 ADCP 数据集统计分析了声散射层昼夜垂直迁移的全球大尺度模式, 发现声散射层后向散射强度变化与日出和日落几乎同步; Aksnes 等^[19]利用鱼探仪研究了大西洋、印度洋和太平洋的站位数据, 发现深水散射层(Deep Scattering Layer, DSL)的深度分布普遍与海洋光学深度相一致, 且溶解氧和透光层之间的相关性为缺氧水域浅层 DSL 分布提供了一个简单关系; 张超^[12]同时利用 ADCP 和多波束测深仪发现西太平洋北纬海域, 散射层的强度与纬度的高低呈正相关, 并认为其形成原因主要是溶解氧含量随纬度的变化, 与北太平洋中层水存在关系; Berge 等^[24]分析了西太平洋地区 14 个深水区域的声体积散射强度数据, 结果显示, 散射强度水平显示出与纬度的依赖性, 并且与生物的有机生产力存在较强的相关性; 刘洪宁^[9]在第六次北极科学考

收稿日期: 2018-07-26; 修订日期: 2018-10-24。

基金项目: 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费专项资金项目(海三科 2017022); 国家重点研发计划(2018YFC1405900)。

作者简介: 黄二辉(1978—), 男, 河南省周口市人, 副研究员, 主要从事海洋声学 & 遥感方面研究。E-mail: huangerhui@tio.org.cn

察中利用 LADCP 发现无冰海面的海洋深层水的声后向散射强度明显大于海冰密集区。尽管针对海洋声散射层的研究已有半世纪之久,但具有环绕北极、连续经过不同海冰覆盖海域、航程跨越北半球中高纬,且往返路线基本一致特点的调查研究,则未见报道。

本文以我国第八次北极科学调查走航 ADCP 数据为基础,综合利用太阳高度、海冰密集度和实测水体环境参数数据,对不同时间、纬度的声散射层时空分布进行研究,且本文研究结果也可为我国多次开展的、时空分布基本一致的极地科学调查中的声散射数据分析提供技术支撑。

2 数据来源和处理方法

2.1 数据来源

本文所用数据来自我国第八次北极考察航次调查船“雪龙”号的船载 ADCP 走航观测数据和 CTD (Conductivity-Temperature-Depth) 站位实测数据,数据起始时间为 2017 年 7 月 21 日至 10 月 5 日,航线和 CTD 站位见图 1。ADCP 型号为 OS 38K,参数设置为:水体分层 100 层,水层厚度 24 m,数据采样时间间隔为 8 s,第一层到 ADCP 设备的距离为 40 m,设备放置在水下 7.8 m,ADCP 实际观测最浅深度约 50 m,不利于分析海表声散射,因此本文对于表层声散射现象不予统计分析;所用 CTD 型号为 SeaBird SBE911,可测量温度、电导率、压力和声速等参数,数据采样率为 24 Hz。

2.2 数据处理方法

ADCP 原始数据中存储有声体积后向散射信号的强度 EI ,可用 WinADCP 软件导出,然后利用式(1)将其转换为后向散射强度 S_v ^[9-10,12]。

$$S_v = C + 10 \log_{10} [(T_x + 273.16) R_N^2] - 10 \log_{10} L_{DBM} - 10 \log_{10} P_{DBM} + 2\alpha R_N + K_C (EI - E_r), \quad (1)$$

式中, C 是与 ADCP 自身有关的常数 (dB), 由于无法查到与所用 ADCP 匹配的参数值, 本文取 $C = 0$, 因此本文所用 S_v 为相对值; T_x 为换能器测量的水体温度 (°C); L_{DBM} 为声脉冲发射长度 (m); P_{DBM} 为声脉冲发射功率 (W); α 为水体声吸收系数 (dB/m), 该值随航迹和深度而变化, 但由于 CTD 站位分布有限 (图 1), 本文采用如下办法: CTD 站位附近的航迹, 利用最邻近的 CTD 数据计算 α , CTD 站位外则利用世界大洋数据集 WOA (World Ocean Atlas 2013 V2) 气候态月均温盐深数据计算 α ; K_C 为声信号强度转换系数 (dB/count); E_r 为换能器接收声脉冲信号强度本底值 (dB)。 R_N 为沿波束方向从第 N 水层返回至换能器的

声脉冲回波路径长度 (m), 计算公式如下^[9-10,12]:

$$R_N = \frac{B + \frac{L+D}{2} + (N-1) \times D + \frac{D}{4}}{\cos \theta} \times \frac{c'}{c_1}, \quad (2)$$

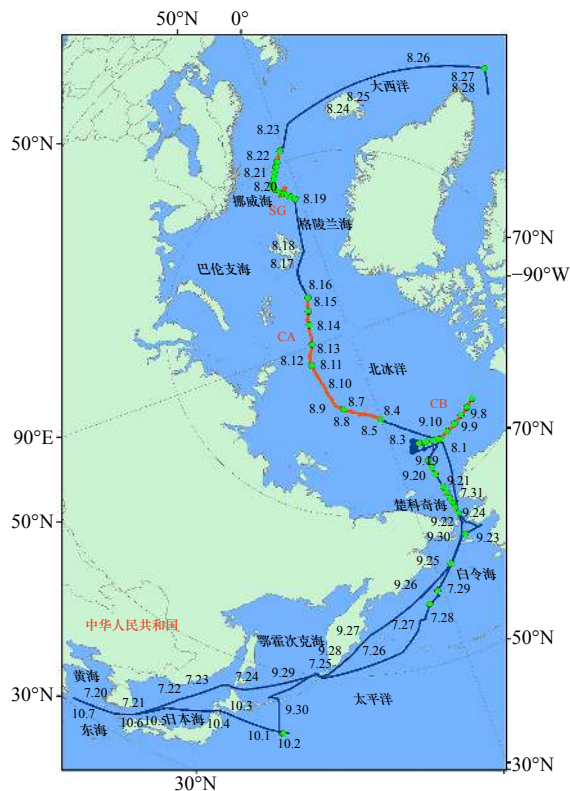


图 1 第八次北极科学考察走航 ADCP 航迹和 CTD 站位分布

Fig. 1 The track of ship-board ADCP and the position of CTD stations in the eighth Arctic science expedition

蓝色线段为 ADCP 走航航迹, 绿色圆点为 CTD 站位点, 红色线段为本文所用 SG、CA、CB CTD 断面
Blue lines for ADCP track, green dots for CTD stations, red lines for SG, CA and CB sections of CTD in this paper

式中, B 为换能器盲区长度 (m); θ 为换能器波束与换能器中心轴线的夹角 (°); c_1 为换能器默认所用水体声速 (1 541 m/s), 换能器设置的水体分层位置 $N=1, 2, 3, \dots, 100$, 第 N 层水体到换能器的默认垂直距离 $D_N=N \times 24$ m; c' 为从换能器至第 N 水层的平均声速, 并利用 $D = D_N \times \frac{c'}{c_1}$ 修正第 N 层水体到换能器的垂直距离。经过上述处理步骤所获得的声体积后向散射强度值存在很多无效值, 通过将 ADCP 4 个波束的声体积后向散射强度进行平均, 然后再按 20 min 时长进行时序平均^[9,12], 就可以获得时序-深度上比较连续的后向散射强度均值。

为分析声散射层昼夜迁移随太阳高度角 (一定程度上表示海面光照强度) 的变化, 本文利用美国 NOAA

地球系统研究实验室(Earth System Research Lab)提供的太阳位置计算器,根据调查船航迹对应的 UTC 时

间和经纬度位置获取当地太阳高度角和昼夜时长(图2)。

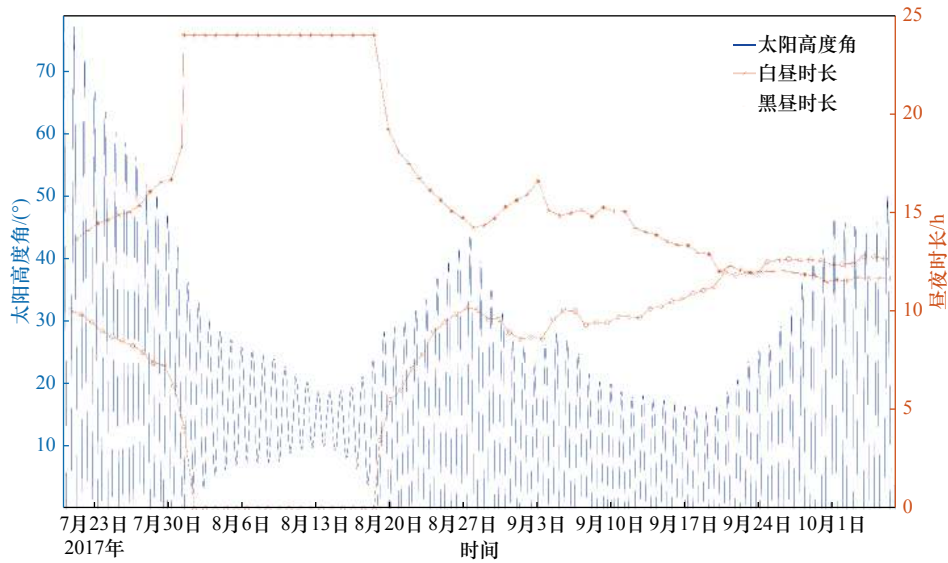


图2 全航程太阳高度角和每天白昼、黑夜时长随时间变化曲线

Fig. 2 The solar altitude angle and daytime and nighttime of day for the entire voyage

根据走航 ADCP 所经海域和后向散射强度分布特征,本文分别从全航程、日本海航段、鄂霍次克海-白令海航段、门捷列夫岭航段、北极中央航段、格陵兰航段、加拿大海盆航段等,分别对声散射层时空分布特征进行分析。

3 结果与分析

3.1 全航程声散射层总体特征

图3显示了走航 ADCP 全航程水体后向散射强

度的时间-深度分布,空白区域表示无有效/测量数据(其中在加拿大专属经济区海域时,ADCP 为长时间关机状态)。由于超过 800 m 深度后,ADCP 获得的有效数据更为稀少,难以有效统计后向散射强度的时序变化特征,故本文仅分析 800 m 深度以浅的数据。后向散射强度达到-30 dB 左右的区域是由海底反射造成,可通过调查船上测深仪获得的海底深度进行佐证。总体来看,200~400 m 的海洋中层深度分布有明显的声散射层,该散射层在调查船去程进入北极圈过

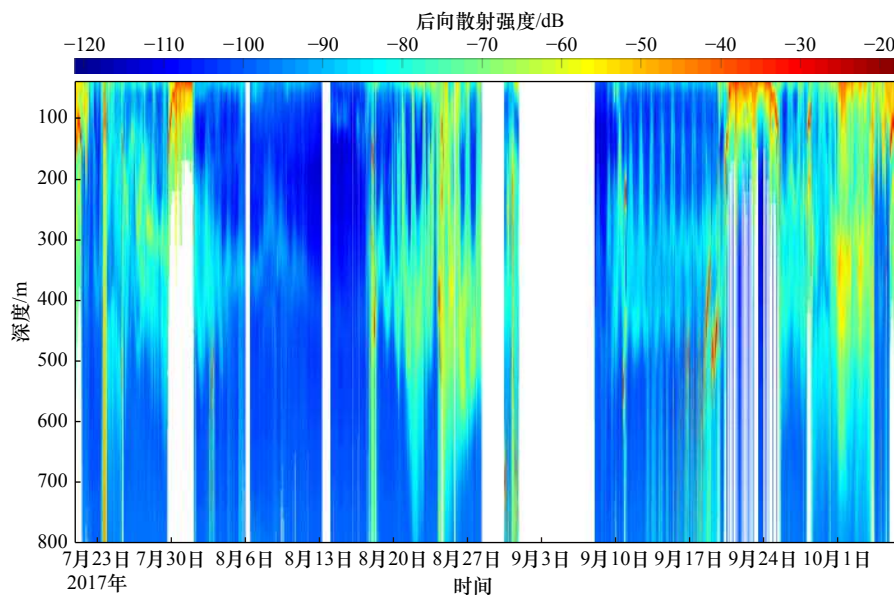


图3 全航程 ADCP 水体后向散射强度的时间-深度分布

Fig. 3 Time vs depth figure of seawater backscatter intensity by ADCP for the entire voyage

程中,其分布深度范围逐渐减小,且强度逐渐减弱至背景强度大小;而在返程时,随着纬度减小,其分布幅度范围逐渐变大,强度逐渐增强,结合图2可以发现,该变化趋势与太阳高度角的变化具有较强的时序同步性,去程始于7月21日,正午太阳高度角随纬度增加而逐渐减小,同时白昼时长也在减少,8月1日进入北极圈后则为极昼,太阳高度角变化越来越小。与返程(9月18日后)相比,同一经纬度的太阳高度角也减少了20°左右。图3中的后向散射强度也表现为时序相一致的特征。因此,本文在下面更详细的航线分析中,结合太阳高度角时序曲线,统计声散射层的时空分布特征。由于调查船行经较浅海域(200 m以

浅)时,例如黄海、东海、白令海与楚科奇海相邻海域等,从水体后向散射强度图中难以分辨生物声散射层的昼夜迁徙行为,本文不予讨论较浅海域的后向散射强度变化。

为方便量化对比,本文依据后向散射强度时序-深度分布,人工提取了各散射层参数(表1),符号“—”表示无法识别和提取该参数值,其中日出、日落判断是以太阳高度角0°为依据,向下、向上迁移起始时间是以水深40 m处较大后向散射强度值对应时刻为准,平均深度、平均厚度和平均强度是在后向散射强度的等值线图 and 梯度图上,人工提取散射层边界然后计算平均获得的。

表 1 全航程声散射层参数统计

Tab. 1 Statistics of the parameters of sound scattering layer for the entire voyage

日期	向下迁移早于日出时差/min	向上迁移晚于日落时差/min	平均深度/m	平均厚度/m	平均强度/dB	备注
7月22日	60	65	380	100	-92	
7月23日	80	70	385	100	-90	
7月24日	—	—	215	110	-81	第一散射层
	—	—	495	170	-83	第二散射层
7月25日	—	—	220	120	-80	第一散射层
	—	—	480	130	-82	第二散射层
7月26日	50	60	250	120	-72	第一散射层
	—	—	—	—	—	第二散射层
7月27日	81	73	220	100	-68	第一散射层
	—	—	480	80	-88	第二散射层
7月28日	85	102	285	130	-68	第一散射层
	—	—	390	120	-80	第二散射层
7月29日	102	116	305	90	-75	第一散射层
	—	—	—	—	—	第二散射层
8月2日	极昼,海冰覆盖,散射层迁移未明显到达表层		425	200	-81	
8月3日			380	150	-87	
8月4日			360	150	-87	
8月5日			350	110	-93	
8月6日			350	100	-94	
8月7日			330	110	-94	
8月8日			265	210	-94	
8月9日			325	130	-93	
8月10日			380	120	-95	
8月11日			360	100	-97	
8月12日			370	90	-101	
8月13日			405	90	-101	

续表 1

日期	向下迁移早于日出时差/min	向上迁移晚于日落时差/min	平均深度/m	平均厚度/m	平均强度/dB	备注
8月14日			450	90	-102	
8月15日			450	90	-102	
8月16日			450	90	-102	
8月17日			450	90	-102	
8月18日			360	150	-78	
8月19日	出现黑夜, 覆盖海冰, 但散射层迁移未明显到达表层		410	160	-79	
8月20日			440	170	-75	
8月21日	160	90	450	250	-69	
8月22日	200	120	430	220	-68	
8月23日	190	110	355	250	-70	
8月25日	100	75	370	120	-59	
8月26日	95	90	470	200	-65	
8月27日	95	70	445	220	-65	
9月8日	出现黑夜, 无明显海冰, 但散射层迁移未明显到达表层		500	200	-98	
9月9日			480	180	-96	
9月10日			465	150	-75	
9月11日	出现黑夜, 无海冰, 散射层明显迁移到表层, 但无法提取		370	200	-83	
9月12日			370	200	-83	
9月13日			370	200	-83	
9月14日			380	200	-83	
9月15日			380	200	-83	
9月16日			370	190	-82	
9月17日			370	190	-82	
9月18日			360	180	-80	
9月19日			360	180	-80	
9月26日	77	67	255	70	-76	第一散射层
	—	—	400	120	-80	第二散射层
9月27日	55	50	235	100	-76	第一散射层
	—	—	390	100	-81	第二散射层
9月28日			290	200	-76	第一散射层
	—	—	510	180	-81	第二散射层
9月29日			260	190	-82	第一散射层
	—	—	500	160	-82	第二散射层
9月30日	55	45	340	250	-73	
10月1日	55	50	380	180	-50	
10月2日	50	40	350	100	-54	
10月3日	60	45	360	110	-55	
10月5日	—	—	410	93	-80	

从表 1 可以看出, 散射层向下迁移起始时间早于日出, 向上迁移起始时间晚于日落, 其时差通常都大于 1 h, 前者之间时差一般大于后者之间的时差, 且纬度越高, 时差越大, 在北欧附近海域, 时差甚至超过 3 h, 而时差越大, 说明散射层在表层滞留时间越短。

3.2 日本海航段

图 4a 显示调查船行经日本海时获得的后向散射

强度, 此时正午太阳高度角最高 70°左右, 深水散射层深度范围 300~400 m。向下迁徙停止于日升高度角 30°左右, 而又在日落高度角 30°时开始向上迁移, 日落之后到达表层 100 m 以浅。图 4a 中左侧 200 m 以浅的浅水层与右侧相比, 在白天也有较强的散射强度, 后续散射强度通常代表水体中有更密集的散射体, 此时调查船行经海域地处大和海盆, 水深较浅, 对

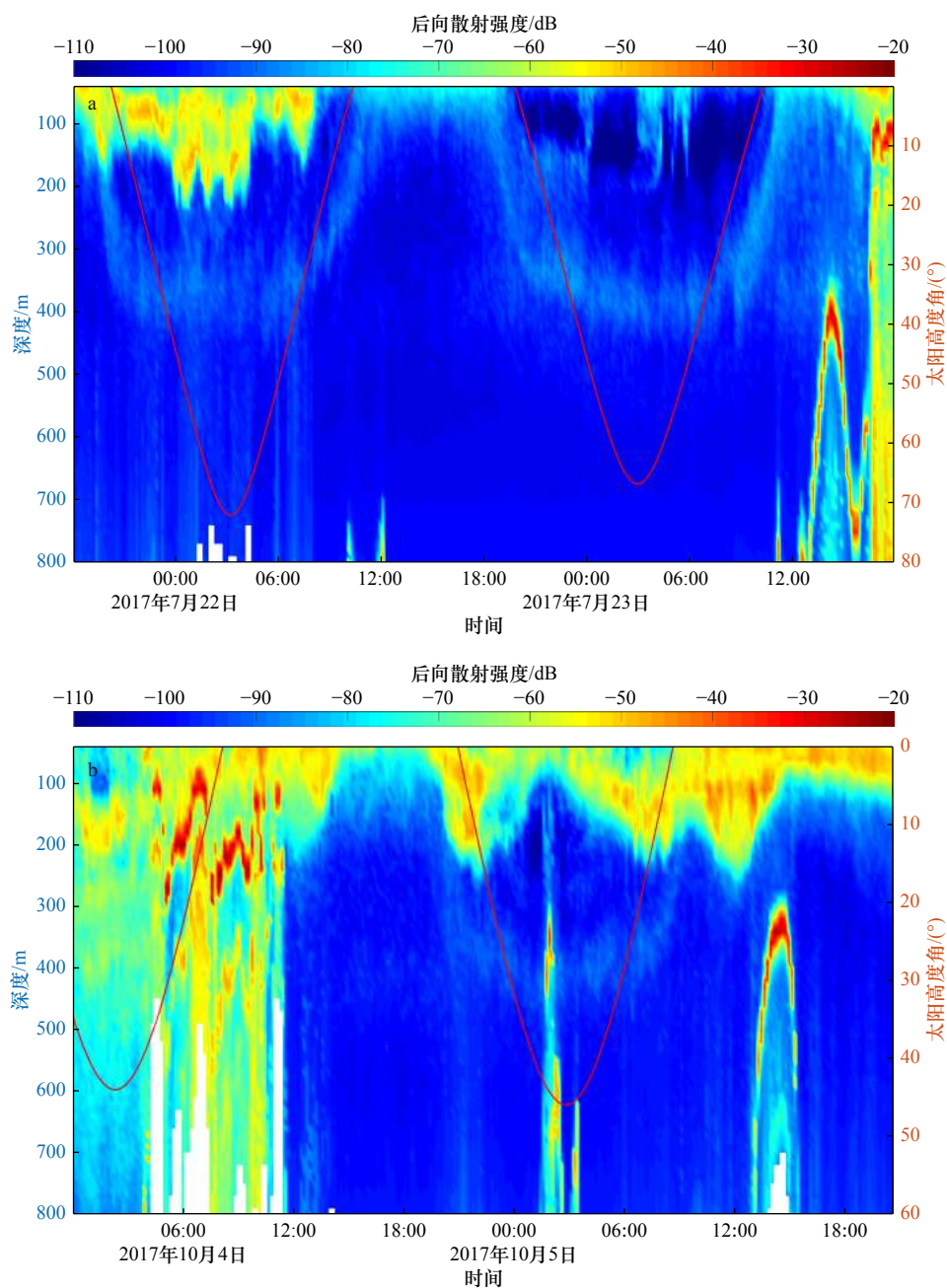


图4 调查船去程(a)和返程(b)经过日本海时 ADCP 后向散射强度的时间-深度分布

Fig. 4 Time vs depth figure of seawater backscattering intensity by ADCP during the forth (a) and back (b) through the Japan Sea

马暖流行经此处,世界有名的渔场分布于此处^[1],可能是白昼期间该海域上层也存在较密集浮游生物和鱼类资源的原因。调查船返程经过日本海时的后向散射强度(图4b)也能看到同样现象(日本海南侧相比东北侧,表层生物量比较大)。虽然此时正午太阳高度角最高仅 45° 左右(比去程时低了 15° 左右),散射层的分布深度相比去程多30 m左右,且后向散射强度均值相差10~12 dB(表1),说明返程时的水下生物丰度更密集。

3.3 鄂霍次克海-白令海航段

进入鄂霍次克海域后(图5),在中层水域开始出

现两个散射层,第一散射层位于200~300 m,第二散射层位于400~600 m,且第二散射层亦同样具有同步的昼夜迁移特征,但散射强度小于第一散射层,迁移幅度仅约100 m,从深度分布和形态细节方面来看,可排除第二散射层是由第一散射层的后向散射被船底反射后,水体的二次散射形成,而可能是由不同生物类型或不同生活习性的海洋生物造成的。调查船7月25日12时进入西太平洋,第一散射层的散射强度增强,同时第二散射层散射强度变弱,且深度变浅、厚度变薄,至7月27日0时进入白令海后,两个散射层之间边界越来越近,而7月29日到达白令海

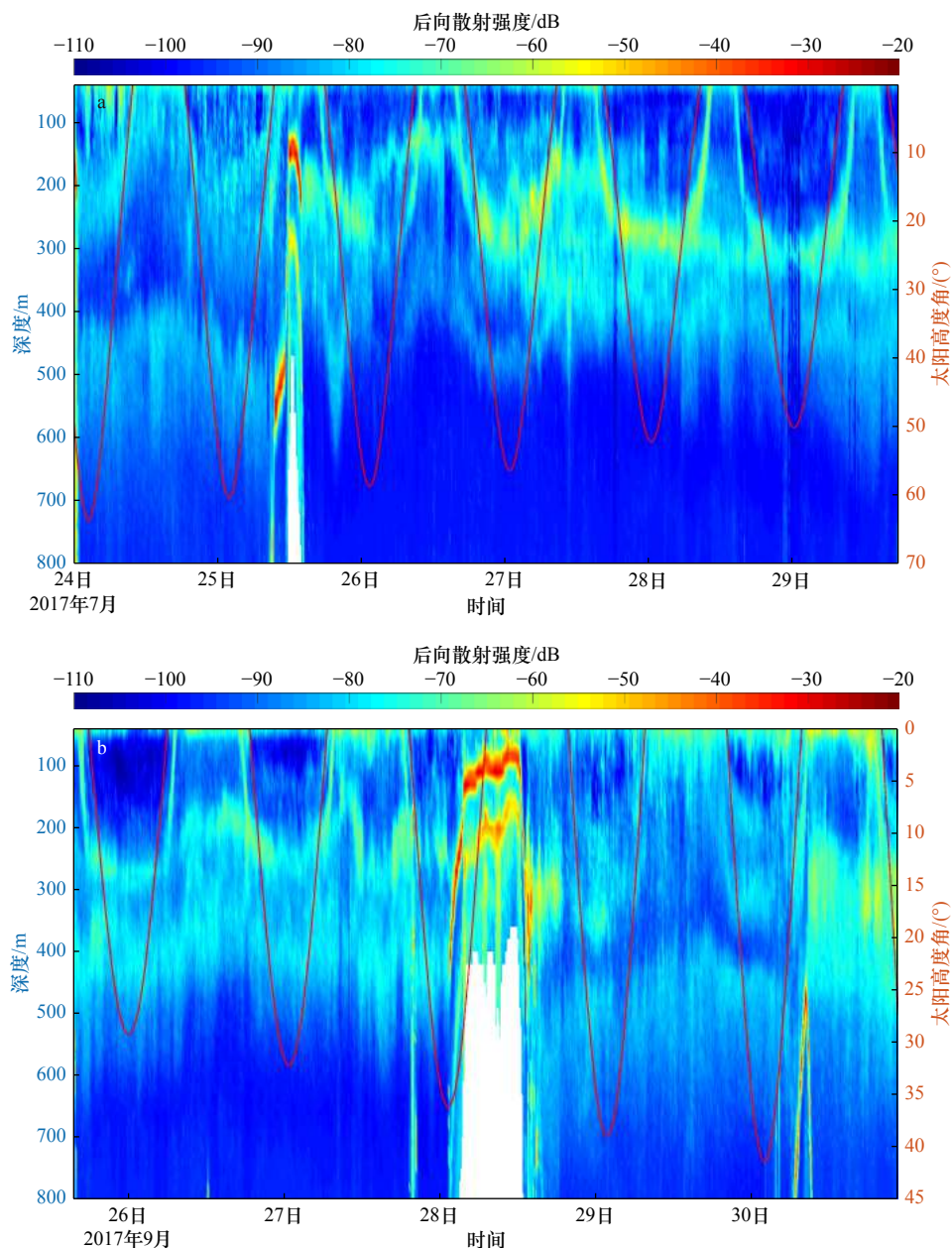


图 5 鄂霍次克海-白令海航段往程(a)和返程(b)ADCP 后向散射强度的时间-深度分布

Fig. 5 Time vs depth figure of seawater backscattering intensity by ADCP during the forth (a) and back (b) through the Okhotsk Sea and Bering Sea segment

中部陆坡时两个散射层已分不清边界,且第一散射层深度明显比前几天的更深,但强度较弱。结合表 1,返程时的散射层分布趋势大致与去程相同,但正午太阳高度角比去程时低了将近 20° ,返程时的第一散射层的平均深度更深(多 40 m 左右)一些,后向散射强度相差不多。结合 3.1 节返程时散射层也有变深情况,推测正午太阳高度角与散射层分布深度可能有相关性。

3.4 门捷列夫岭航段

利用美国国家冰雪资料中心(National Snow & Ice Data Center)的海冰密集度数据绘制图 6 所示时序曲

线,作为辅助数据以了解北冰洋航线的海冰覆盖情况。调查船 8 月 1 日在加拿大海盆边缘开始进入零星浮冰区,此时已为极昼(正午太阳高度角最低为 2.5° ,最高为 33°),图 7 显示声散射层的强度和迁移幅度也在逐渐减弱,并且不再迁移至海表(最浅滞留深度约 150 m),且滞留时间亦很短(约 2 h),8 月 2-3 日,调查船从海冰密集度 0% 逐渐进入 95% 海域,此时仍然可以观测到散射层与太阳高度角变化相一致的迁移过程,即太阳升起时散射层向下迁移,反之则向上迁移,且散射层上下迁移的幅度越来越小。总体来看,整个迁移过程与太阳高度角随时间变化趋势相

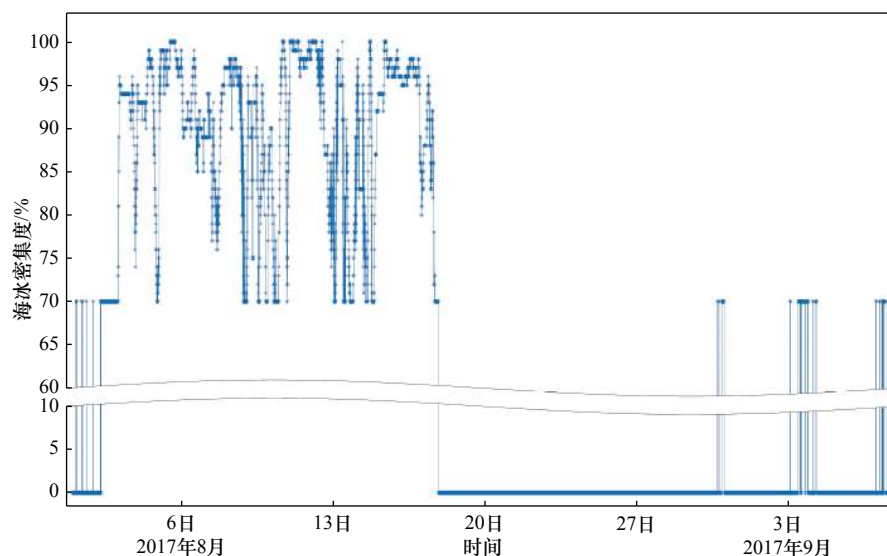


图6 北冰洋航段海冰密度时序曲线

Fig. 6 Time vs sea ice concentrate at the position of the ship in the Arctic Ocean segment

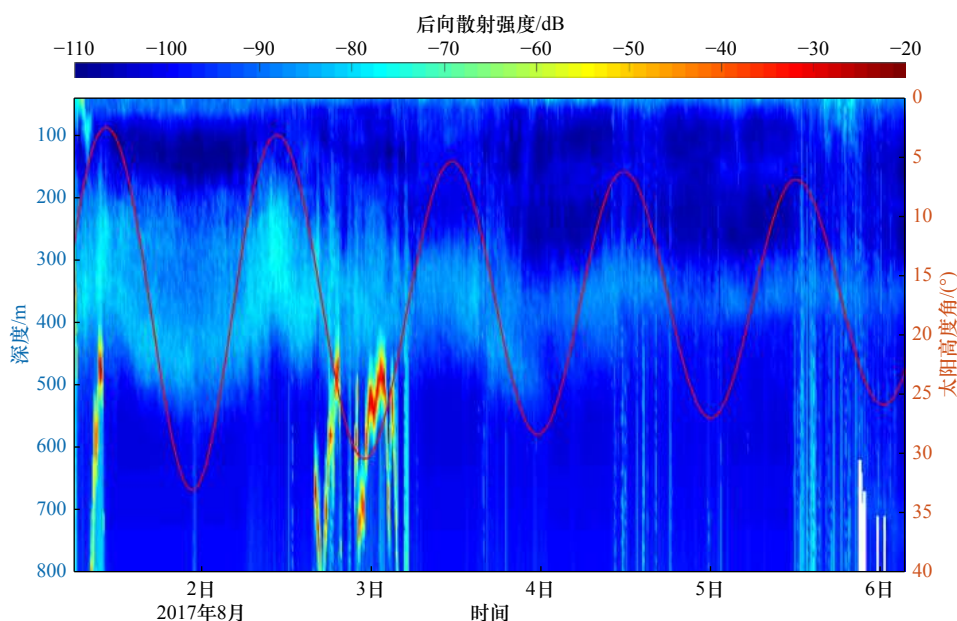


图7 调查船沿着加拿大海盆边缘进入门捷列夫海岭时 ADCP 后向散射强度的时间-深度分布

Fig. 7 Time vs depth figure of seawater backscattering intensity by ADCP through the Mendeleev Ridge along the Canadian Basin edge

一致,再次说明,即使被海冰覆盖,太阳高度角的变化(即光照强度)仍然对散射层的垂直迁移过程影响较大。

日本海航段、鄂霍次克海-白令海航段、门捷列夫岭航段途径海域的声散射层随时间变化各有特点,散射层的垂直迁移过程与太阳高度角的变化息息相关,但由于没有实测水体环境参数剖面数据,无法深入分析其中的相关关系和影响机制。

3.5 北极中央航段

从8月4日之后,散射层迁移(分布范围在300~400 m之间)随太阳高度角变化已不明显,散射层强度逐渐减弱,但仍可以观察到平均散射强度随太阳升

起、降落(图8),呈现相应同步的微小减弱、增强变化特征。但在8月12-17日期间,散射层强度与背景强度区分已不明显,且150~400 m深度之间几乎观测不到水体的后向散射,说明该区域水体非常纯净。散射层平均深度先从8月6日的350 m左右逐渐变化到8月9日250 m左右,而后又逐渐变深至450 m左右,这应该与水体环境的变化有关。从图9所示同步实测的CTD、氧饱和度和氮饱和度数据进行分析,8月5-16日,散射层深度范围内水体温度、盐度均逐渐增加(水温从0.5℃变化到1.5℃,盐度从31.5变化到35),但氧饱和度、氮饱和度却是逐渐降低(氧饱和

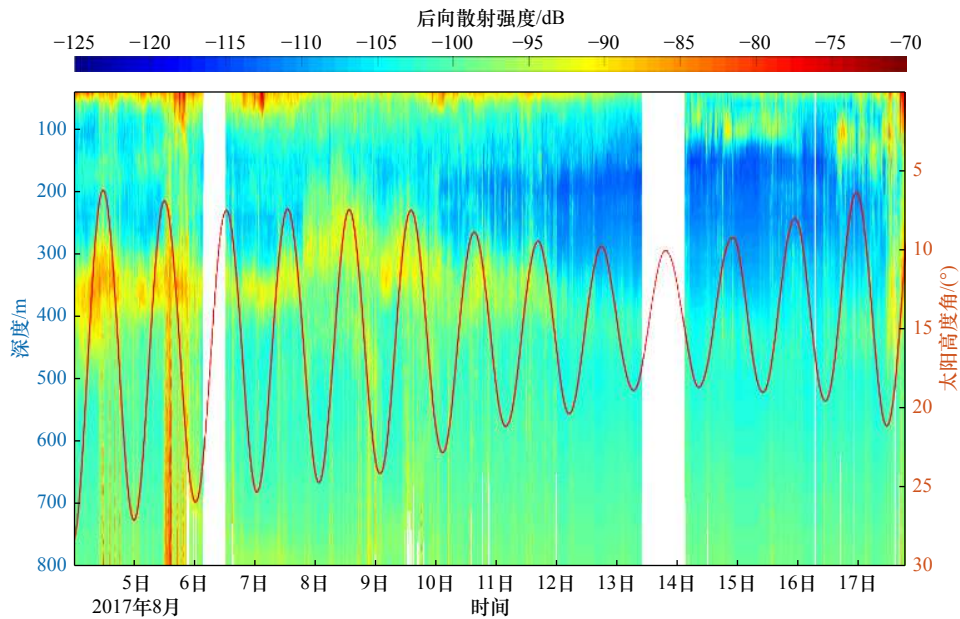


图 8 北极中央航段 ADCP 后向散射强度的时间-深度分布

Fig. 8 Time vs depth figure of seawater backscattering intensity by ADCP during the central Arctic Ocean segment

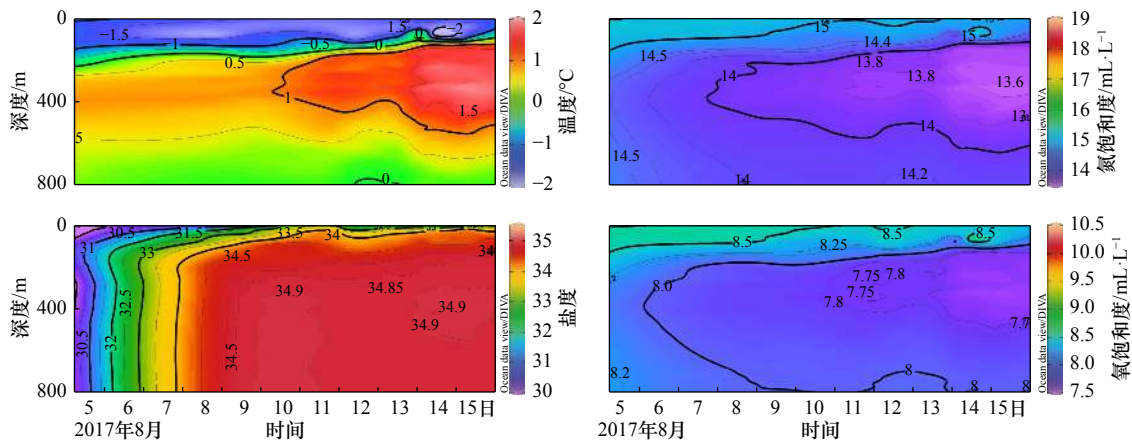


图 9 断面 CA 处温度、盐度、氮饱和度、氧饱和度随时间变化

Fig. 9 The distribution of temperature, salinity, nitrogen saturation and oxygen saturation with time at the Section CA

度从 8.2 mL/L 变化到 7.7 mL/L, 氮饱和度从 14.5 mL/L 变化到 13.6 mL/L), 可能正是这些水体环境参数的变化限制了水体浮游生物/鱼类的深度和密集度分布。

3.6 格陵兰航段

由图 6 和图 10 可以看出, 8 月 17 日 12 时开始, 船只从海冰密集度 70% 区域逐渐进入无冰区, 且开始出现夜晚, 散射层的迁移幅度和厚度变大, 黑夜时长较长时, 散射层才逐渐到达海表层, 且在表层滞留时间随着黑夜时长增加而增加, 后向散射强度也在逐渐增强, 但 8 月 23 日的散射层深度却变浅。从同步测量的水体环境参数来看, 从 8 月 19 日至 22 日, 温、盐、氧氮饱和度等值线逐渐变深, 但 8 月 23 日开始, 等值线深度逐渐变浅, 与散射层变化趋势相一致。与

中央航段相比, 本航段的水体后向散射强度变化与水体环境参数之间的关系却相反(图 11): 随温盐的升高、氧氮饱和度的降低, 中央中央航段的后向散射强度逐渐减小, 甚至出现无后向散射区, 但在格陵兰岛周边海域的后向散射强度却呈现相反的变化趋势, 虽然可以用水体中不同生活习性的生物来解释, 但对两个海域来说, 其与太阳高度角的变化似乎更具有一致性, 即太阳高度角变化范围大时, 散射层深度变化范围和后向散射强度也较大。

3.7 加拿大海盆航段

图 6 显示 9 月 8 日航行至加拿大海盆, 海面无明显海冰, 图 12 显示此时散射层后向散射强度较弱, 迁移最浅深度约 260 m, 最深约 500 m, 9 月 9 日接近海

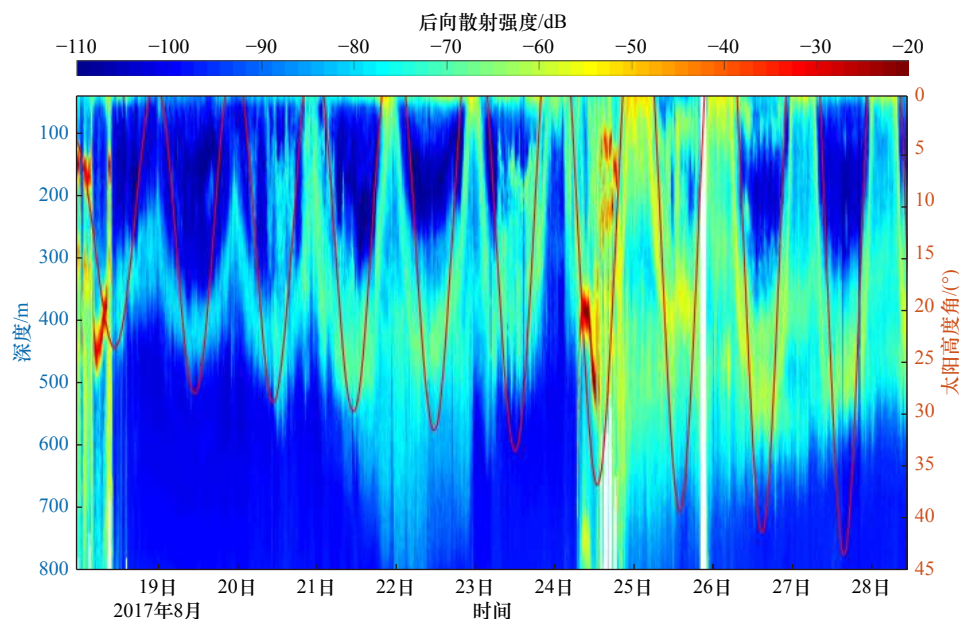


图 10 格陵兰岛周边海域 ADCP 后向散射强度的时间-深度分布

Fig. 10 Time vs depth figure of seawater backscattering intensity by ADCP through the surrounding of the Greenland

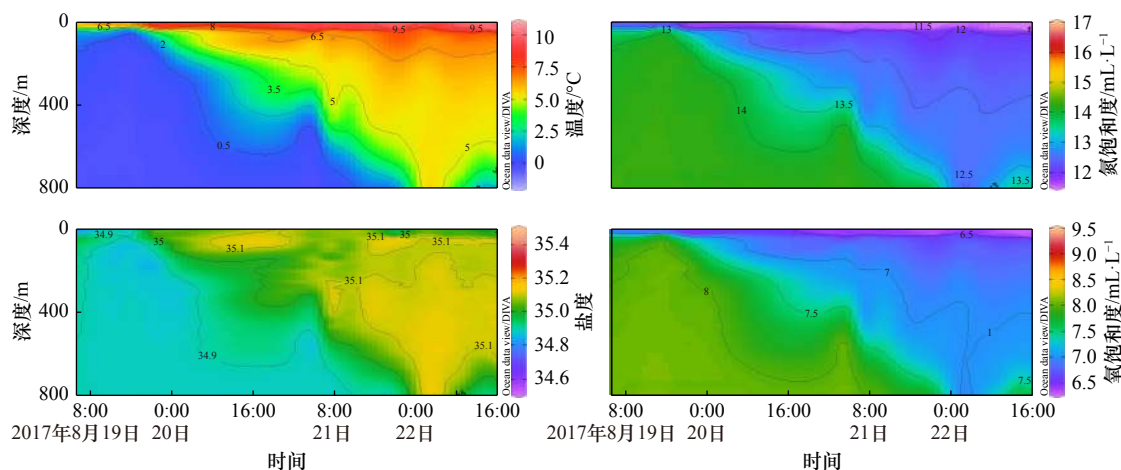


图 11 断面 SG 处温度、盐度、氮饱和度、氧饱和度随时间变化

Fig. 11 The distribution of temperature, salinity, nitrogen saturation and oxygen saturation with time at the Section SG

盆边缘,后向散射强度变大,100 m 以浅深度也开始出现较强散射,散射层迁移最深深度变浅(约 450 m),9 月 10 日声散射层强度相对更大,且迁移深度已至 100 m 以浅,该变化或许可以用该时段水体环境参数(图 13)等值线稍有上移来解释。9 月 12–19 日,由于基本在同一位置,散射层迁移的变化不明显,但相对前两日,散射层已明显迁移至海表层。

4 结论

本文利用第八次北极调查走航观测的 ADCP 单位体积声后向散射强度数据,统计分析了声散射层各参数(迁移时间、深度、厚度和后向散射强度)在北半球夏季中高纬的时空分布特征,获得如下结论:

(1) 200~400 m 深度的海洋中层分布有明显的声散射层,其垂直迁移幅度和后向散射强度通常随纬度增加而减小,且与太阳高度角变化具有较强的时序相关性,即太阳高度角变化范围大时,散射层迁移幅度和后向散射强度也较大。

(2) 散射层向下迁移起始时间早于日出,向上迁移起始时间晚于日落,其时差通常都大于 1 h,前者时差一般大于后者时差,且纬度越高,时差越大,在北欧附近海域,时差甚至超过 3 h。

(3) 随着黑夜时长的减小,散射层在海表滞留时间变短,在极昼、海冰覆盖期间,散射层不再迁移至海表层。

(4) 在北极中央航段海域,散射层的垂直迁移幅

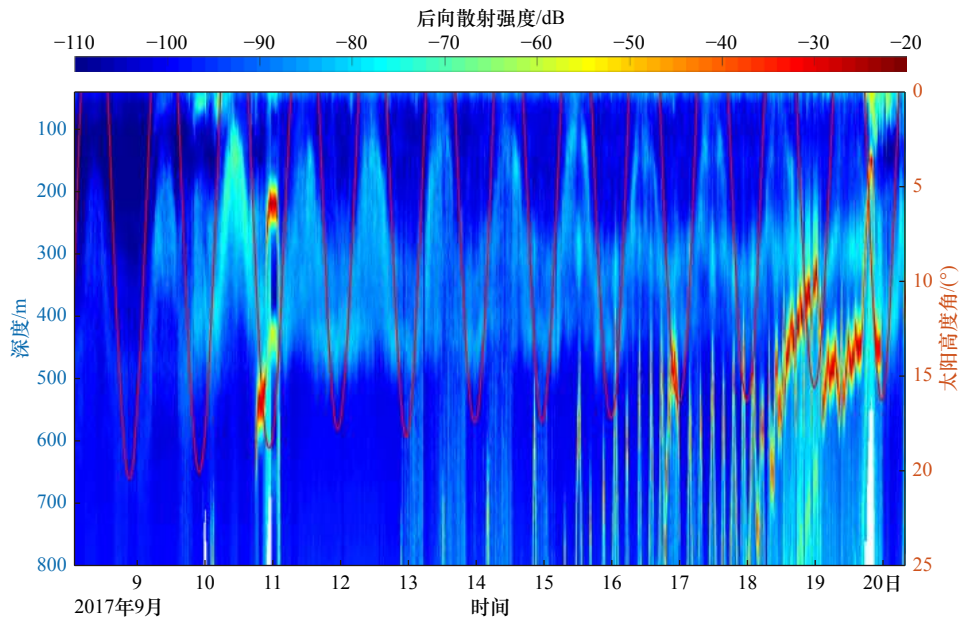


图 12 加拿大海盆区 ADCP 后向散射强度的时间-深度分布

Fig. 12 Time vs depth figure of seawater backscattering intensity by ADCP in the Canadian Basin

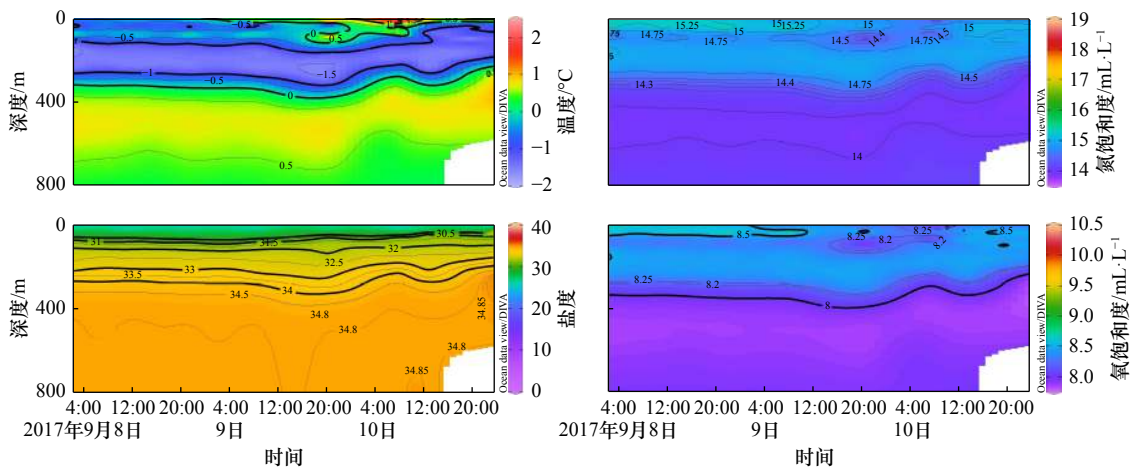


图 13 断面 CB 处温度、盐度、氮饱和度、氧饱和度随时间分布

Fig. 13 Distribution of temperature, salinity, nitrogen saturation and oxygen saturation with time at the Section CB

度不明显, 且存在无明显散射层的现象, 可能是该海域浮游动物和鱼类聚集度小且其迁徙活动微弱, 超出了本文所用 ADCP 的探测精度范围所致。

(5) 从鄂霍次克海至白令海西南海域, 往返 ADCP 数据均显示海洋中层有两个声散射层, 具有同步的垂直迁移特征, 第一声散射层后向散射强度高于第

二声散射层, 且二者之间的间距随纬度增加而减小, 并逐渐合二为一, 可能是由不同生物类型或不同生活习性的海洋生物造成的。

致谢: 感谢中国第八次北极科学考察队的大力支持和帮助!

参考文献:

- [1] 孙松. 中国区域海洋学: 生物海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
Sun Song. Regional Oceanography of China Seas: Biological Oceanography[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.
- [2] 孙栋, 王春生. 深远海浮游动物生态学研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3219–3231.
Sun Dong, Wang Chunsheng. A review of open ocean zooplankton ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10): 3219–3231.
- [3] 李少菁, 许振祖, 黄加祺, 等. 海洋浮游动物学研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2001, 40(2): 574–585.
Li Shaojing, Xu Zhengzu, Huang Jiaqi, et al. Studies on biology of marine zooplankton in China[J]. Journal of Xiamen University: Natur-

- al Science, 2001, 40(2): 574–585.
- [4] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2013.
Wang Dezhaoh, Shang Erchang. Underwater Acoustics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2013.
- [5] 李玉昕, 杨颐华, 李志宽, 等. 南海深水散射层的实验研究[J]. 海洋学报, 1986, 8(1): 107–110.
Li Yuxin, Yang Yihua, Li Zhikuan, et al. Experimental study of deep scattering layer in South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 1986, 8(1): 107–110.
- [6] 温明明, 牟泽霖, 万芃, 等. 南海深海体积混响及散射特性试验研究[J]. 声学技术, 2016, 35(6): 512–517.
Wen Mingming, Mou Zelin, Wan Peng, et al. Experimental study of deep-sea volume reverberation and scattering characteristics in the South China Sea[J]. Technical Acoustics, 2016, 35(6): 512–517.
- [7] Walther G R, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change[J]. *Nature*, 2002, 416(6879): 389–395.
- [8] Costello M J, Breyer S. Ocean depths: the mesopelagic and implications for global warming[J]. *Current Biology*, 2017, 27(1): R36–R38.
- [9] 刘洪宁. 北冰洋太平洋扇区声学体积后向散射强度和海洋环境噪声研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2015.
Liu Hongning. Study of acoustic volume backscattering strength and marine environment noise in Pacific sector of the Arctic Ocean[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2015.
- [10] Deines K L. Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers[C]//Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurement. San Diego, CA, USA: IEEE, 1999: 249–253.
- [11] 龚丽辉, 冯雷, 王长红, 等. 利用声相关流速剖面仪观测深水散射层[J]. 声学技术, 2008, 27(6): 807–811.
Gong Lihui, Feng Lei, Wang Changhong, et al. Deep scattering layer observation using acoustic correlation current profiler[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(6): 807–811.
- [12] 张超. 基于多波束测深仪和走航式ADCP的西太平洋声学散射层研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2017.
Zhang Chao. Research on sound scattering layer in the western Pacific observed with Multibeam sounding system and ship-board ADCP[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2017.
- [13] 陈次颖, 章淑珍. 应用水声方法考察底栖鱼类和DSL(深海散射层)的垂直移动[J]. 海洋科学, 1994, 18(3): 53–56.
Chen Ciyang, Zhang Shuzhen. A practical investigation on Demersal fish and DSL rhythmic vertical migration by acoustic method[J]. Marine Sciences, 1994, 18(3): 53–56.
- [14] Gjøsæter H, Wiebe P H, Knutsen T, et al. Evidence of diel vertical migration of mesopelagic sound-scattering organisms in the Arctic[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2017, 4: 332.
- [15] 刘顺会, 孙松, 韩博平. 浮游动物昼夜垂直迁移机理的主要假说及其研究进展[J]. 生态科学, 2008, 27(6): 515–521.
Liu Shunhui, Sun Song, Han Boping. Hypotheses and theories of mechanisms underlying the diel vertical migration of zooplankton: a review[J]. *Ecological Science*, 2008, 27(6): 515–521.
- [16] Kaartvedt S, Røstad A, Aksnes D L. Changing weather causes behavioral responses in the lower mesopelagic[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2017, 574: 259–263.
- [17] Klevjer T A, Irigoien X, Røstad A, et al. Large scale patterns in vertical distribution and behaviour of mesopelagic scattering layers[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19873.
- [18] Cohen J H, Berge J, Moline M A, et al. Is ambient light during the high arctic polar night sufficient to act as a visual cue for zooplankton[J]. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0126247.
- [19] Aksnes D L, Røstad A, Kaartvedt S, et al. Light penetration structures the deep acoustic scattering layers in the global ocean[J]. *Science Advances*, 2017, 3(5): e1602468.
- [20] 吕连港, 乔方利, 葛人峰, 等. 后向散射强度与温跃层关系研究[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(4): 465–470.
Lü Liangang, Qiao Fangli, Ge Renfeng, et al. Study on the relationship between backscatter strength and thermocline[J]. *Advances in Marine Science*, 2003, 21(4): 465–470.
- [21] Teo S L H, Kudela R M, Rais A, et al. Estimating chlorophyll profiles from electronic tags deployed on pelagic animals[J]. *Aquatic Biology*, 2009, 5(2): 195–207.
- [22] Proud R, Cox M J, Brierley A S. Biogeography of the global ocean's mesopelagic zone[J]. *Current Biology*, 2017, 27(1): 113–119.
- [23] Bianchi D, Mislan K A S. Global patterns of diel vertical migration times and velocities from acoustic data[J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, 61(1): 353–364.
- [24] Berge J, Cottier F, Last K S, et al. Diel vertical migration of Arctic zooplankton during the polar night[J]. *Biology Letters*, 2009, 5(1): 69–72.

Research on the distribution of sound scattering layer in the middle and high latitudes ocean of the Northern Hemisphere in autumn

Huang Erhui¹, Yang Yanming¹, Wen Hongtao¹, Zhou Hongtao¹

(1. *Ocean Acoustic and Remote Sensing Laboratory, Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China*)

Abstract: The shipboard ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers) backscatter intensity data in the Eighth Arctic Science Expedition are analyzed for the temporal and spatial characteristics of the sound scattering layer (SSL), by combining the solar altitude, the sea ice concentration and the in-situ data of the water environment parameters. The results show that the higher the latitude is, the shorter the time of the SSL is on the sea surface. Even during the period of polar day and all covered by sea ice, the migration amplitude and backscattering intensity of the SSL are weakened, but they are still affected by the change of the solar elevation, and there is a strong temporal correlation between them and solar altitude angle. In the middle section of the Arctic, the migration of the SSL is weak, and there is no obvious SSL observed, the reason may be that the concentration of zooplanktons and fishes are relatively lower and the migration is weak, which is beyond the accuracy range of ADCP used in this paper. ADCP data in the back and forth from the Okhotsk Sea to the southwest of the Bering Sea, show that there are two SSLs, the shallower depth and the greater backscatter intensity, but their vertical migration time is synchronized, and the spacing between them is gradually reduced and combined as the latitude increases, it may be caused by marine organisms with different life habit.

Key words: middle and high latitudes; sound scattering layer; solar altitude angle; backscatter intensity; vertical migration