

南海北部声散射季节变化

高爽¹, 杨光兵^{2,3,4,5*}, 熊学军^{2,3,4,5}

(1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司深水工程建设中心, 广东深圳 518067;

2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061;

3. 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;

4. 山东省海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东青岛 266061;

5. 青岛海洋科学与技术(试点)国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东青岛 266237)

摘要: 声散射是重要的声学现象, 海洋水体产生的高频声散射信号既可用于开展多种目的的声学海洋学研究, 也可能对水下声学设备产生干扰, 而海洋水体背景声散射具有显著的时空变异特征, 因此针对特定海区开展声散射时变观测具有重要意义。本文利用在南海北部布放的锚系系统所搭载的声学多普勒流速剖面仪, 获取了覆盖 4 个季节的累计约 80 d 的声散射数据, 数据包括 75 kHz 和 300 kHz 两个频段, 观测水深几乎覆盖了从海面到约 600 m 水深的整个水体。结果表明, 水体在垂向上分布着上散射层和深散射层 2 个主要散射层。上散射层分布深度在冬夏较浅, 位于约 100 m 以浅, 在春秋较深, 位于约 200 m 以浅; 深散射层分布深度同样为冬季最浅, 位于约 300 m 以深, 但夏季则最深, 位于约 400 m 以深。因此, 两散射层的距离在夏季最远, 在春秋最近。2 个散射层的声散射强度(S_v)同样具有明显的季节变化, 上散射层散射强度夏秋较强而春冬较弱, 深散射层则正好相反。

关键词: 声散射; 南海北部; ADCP; 浮游动物

中图分类号: TB566

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2022)02-0144-09

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20211217001

引用格式: 高爽, 杨光兵, 熊学军. 南海北部声散射季节变化[J]. 海岸工程, 2022, 41(2): 144-152. GAO S, YANG G B, XIONG X J. Seasonal variation of sound scattering in the northern South China Sea[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(2): 144-152.

声散射是指声波在传播过程中遇到障碍物时, 声波偏离原来的传播方向, 向四周扩散开来的现象。在海洋中, 声波在遇到粗糙的海底和海面, 以及水体中的微小颗粒时, 都会发生声散射现象。水体中的声散射现象对开展多个学科的声学海洋学研究具有重要意义^[1-5]。利用水体中微小颗粒“随波逐流”的特性和多普勒原理, 能够通过测量微小散射颗粒的后向散射信号发生的多普勒频移获取水体的三维流速, 基于上述原理开发的声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)是 20 世纪 80 年代以来最重要的海洋观测仪器之一^[6-8]。此外, 海洋层结也能够引起显著的声散射信号, 声散射信号的时间深度分布已经成为刻画高分辨率内波波面的重要手段^[9]。近些年来, 通过刻画声散射信号在不同频段的变化特性, 声散射信号还被用来反演水体中湍流过程^[10-11]。海水中的浮游动物是生物链中的重要一环, 在海洋生态系统中不可或缺。浮游动物同时参与碳、氮等多种生化要素的汇集和释放过程, 因此在生物地球化学过程中扮演重要角色^[4]。大量浮游动物的运动甚至还能对海水的混合产生重要影响^[12]。认识浮游动物的时空分布特征及其海洋环境的关系对于理解和预测浮游动物在不同情景中所能产生的影响至关重要^[13-14]。相对于传统的拖网采样手段, 利用声散射方法观测浮游动物的活动特性和时空变化特征具有快速高效的特点, 已经成为研究浮游动物的重要手段^[15-16]。海水中的悬浮泥沙是另一种重要的散射源, 悬浮泥沙的输运对认识海底沉积动力过程有重要意义, 相较于传统的通过采水、抽滤测量悬浮泥沙的方法, 通过声散射信号反演水体中的悬浮泥沙的粒径、浓度等

收稿日期: 2021-12-17

作者简介: 高爽(1980—), 男, 研究员, 博士, 主要从事海洋油气田开发方面研究. E-mail: shuang_gao@cnooc.com.cn

*通信作者: 杨光兵(1988—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事声学海洋学方面研究. E-mail: ygb@fio.org.cn

(王佳实 编辑)

信息方便高效,已经成为一种可靠和流行的手段^[17-19]。

在海上工程保障中,经常需要利用声散射方法和相关仪器监测内波、强流、泥沙输运、生物活动等^[20-21],水体中复杂多样的散射体使得声散射信号具有复杂的来源,各种海洋仪器设备利用声散射信号开展测量时往往会被不同散射源的散射信号所干扰,排除干扰散射信号是保障海洋仪器设备性能的前提条件^[22-24]。由于在不同海区的物理环境、生态环境显著不同,因此海水中的散射源具有明显差异,造成了不同海区具有明显不同的散射信号特征。南海北部海洋动力过程复杂,生物过程多样,同时南海北部海区是重要的海洋工程开展区域和重要的渔业区域。本研究海区为我国南海海洋石油开发活动的毗邻区,同时也是内波活动的上游区,掌握该海区的声散射特征,将有助于开发新型海洋内波监测设备,帮助理解生物附着等生物活动规律,对海洋工程开发建设也具有积极的意义。

此前,在南海北部开展的声散射研究通常观测时间较短,并且往往采用船载移动观测平台,造成观测结果较少且相对不够稳定^[25-28]。本研究利用在南海北部布放的锚系系统,基于覆盖4个季节的长期观测数据给出了更可靠的声散射强度的季节变化特征。

1 方法和数据

本研究的观测站位位于南海北部陆坡处(图1),站位经纬度为(116°00'E, 20°24'N),水深约650 m,观测方式为锚系定点连续观测。锚系系统包括2套美国TRDI公司生产的WHLR型ADCP,背靠背安装在同一位置处,其中向上测量的75 kHz ADCP,向下测量的为300 kHz ADCP。

从2018年10月至2020年1月,分别在1月、4月、7月和10月四个月份开展了代表4个季节的锚系定点连续观测(表1)。如表1所示,在4次观测中锚系系统的配置基本类似,主要区别为在1月、4月和7月的3次观测中,将2套ADCP安装在约450 m深度处;而在10月的观测中,将2套ADCP安装在约580 m深度处。在全部4个月份的观测中,2套ADCP的层厚均设置为8 m一层,采样间隔均设置为3 min。75 kHz ADCP测量层数为60层,能够覆盖从观测点至海面的全部水层;300 kHz ADCP的层数为15层,覆盖水层厚度约120 m。

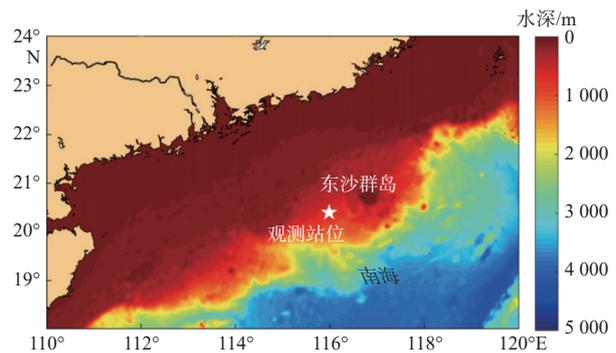


图1 观测站位和海区地形

Fig. 1 Location of the observation stations and seafloor topography in the study area

表1 各季节锚系系统观测参数

Table 1 The observation parameters of mooring system in each season

季节	观测时间	ADCP 安装位置水深/m	ADCP 采样间隔/min	ADCP 观测层厚/m	75 kHz ADCP 观测层数/层	300 kHz ADCP 观测层数/层
春季	2019-04-18—30	450	3	8	60	15
夏季	2019-07-01—30	450	3	8	60	15
秋季	2018-10-01—30	580	3	8	60	15
冬季	2020-01-01—08	450	3	8	60	15

ADCP 观测所直接导出的数据为回声强度数据,需要通过转化以获取声散射强度(S_v)。具体转化关系式为^[29]:

$$S_v = C + 10 \lg(T_x + 273.16) + 2 - \lg(\varphi R) - L_{DBM} - P_{DBW} + 2\alpha R + K_c(E - E_r), \quad (1)$$

式中: C 为 ADCP 性能相关常数, 300 kHz ADCP 为 -148.2 dB, 75 kHz ADCP 为 -163.3 dB; T_x 是 ADCP 所在位

置的海水温度($^{\circ}\text{C}$); ϕ 为近场校正函数, 即当观测层距离换能器较近时, 需要考虑换能器的非球面扩展, 由于本文采用的 ADCP 第一层离换能器的距离已经超过了临界距离, 所以无需进行近场校正; R 为换能器沿着声波波束方向与散射体之间的距离(m), 需要考虑 ADCP 换能器与垂直法向的倾斜角将 ADCP 测层与换能器的距离转换为 ADCP 沿声波束传播至散射体的距离, 本研究所采用的 ADCP 换能器倾斜角均为 20° ; L_{DBM} 与声波脉冲长度 L (m)有关, $L_{\text{DBM}} = 10\lg L$, DBM 表示分贝米, 即长度取对数, 75 kHz ADCP 的 L 为 10 m, 300 kHz ADCP 的 L 为 5 m; P_{DBW} 与声波的发射功率有关, $P_{\text{DBW}} = 10\lg P$, DBW 表示分贝瓦, 即功率取对数, 75 kHz ADCP 的 P_{DBW} 为 24, 300 kHz ADCP 的 P_{DBW} 为 14; α 为吸收衰减系数(dB/m), 为频率、温度等的函数; K_c 为比例因子(dB/count), 其典型值为 0.45 dB/count; E 为回声强度(count), 即 ADCP 直接输出的数据; E_n 为噪声本底值(count), ADCP 设置成功后在空气中正常工作所采集到的回声强度可以认为是 E_n 。

不同的入射声频率具有不同的散射颗粒粒径敏感范围^[30], 一般认为 300 kHz ADCP 能探测到的散射颗粒粒径为 $16\sim 1\,600\ \mu\text{m}$, 而 75 kHz ADCP 能探测到的散射颗粒粒径为 $64\sim 6\,400\ \mu\text{m}$ 。由于不同 ADCP 的散射颗粒粒径探测范围不同, 故本文不直接对比两型 ADCP 之间的观测结果。此外, 由于锚系系统受到海流影响会来回摆动, 本文利用 ADCP 姿态数据对设备摆动倾斜引起的误差进行了修正。

2 观测结果和讨论

2.1 水文背景季节变化特征

图 2 为观测期间的水温和表征层结的浮力频率情况。表层水温在秋季最大, 约 $29\ ^{\circ}\text{C}$, 在冬季最低, 约 $24\ ^{\circ}\text{C}$ 。在 200 m 以浅区域, 水温秋季最高, 夏季次之, 冬季最低。在 200 m 以深, 水温的季节变化不明显。层结的主要区别在于冬季具有较深的混合层, 表层层结弱, 而其他季节海面附近层结则较强。层结在 4 个季节的区别主要体现在 100 m 以浅区域, 在更深的区域, 层结的季节变化不明显。

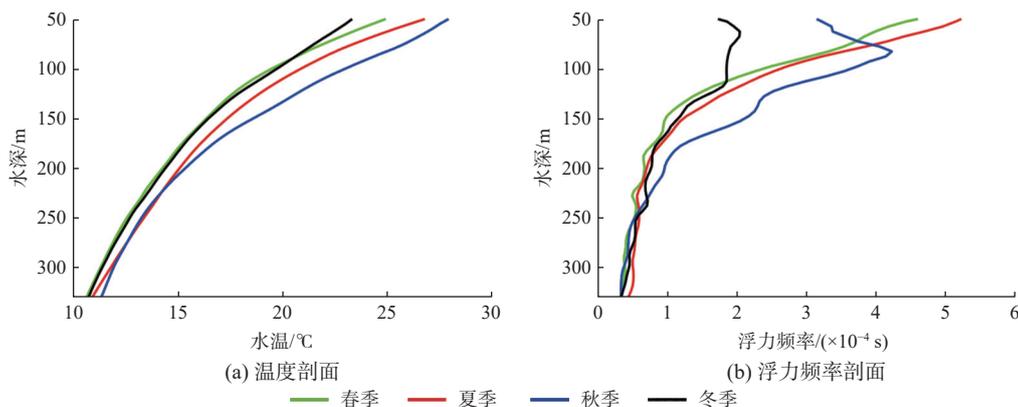


图 2 4 个季节的水温和浮力频率剖面

Fig. 2 The depth profiles of seawater temperature and buoyancy frequency in four seasons

2.2 水体声散射整体季节变化特征

在 4 个季节中声散射均主要分为 2 层, 即位于约 100 m 深度附近的上散射层和位于 400 m 深度附近的深散射层(图 3)。2 个散射层之间每天出现 2 次条带状连接, 这是由于浮游动物的昼夜垂直迁移(Diel Vertical Migration, DVM)引起的强散射条带。由于整体的声散射结构存在明显的昼夜变化, 即上散射层在白天弱、夜间强, 深散射层相应地为白天强、夜间弱, 因此, 浮游动物应为海区内的一个主要散射体来源。

就季节变化而言, 冬季和夏季的上散射层最浅, 位于 100 m 以浅; 春季和秋季的上散射层较深, 其深度接

近 200 m。深散射层冬季最浅, 其上缘接近 300 m 深度处; 夏季最深, 基本位于 400 m 以深位置; 春秋两季相似, 介于冬夏两季之间。因此, 两散射层的距离在夏季最远, 冬季次之, 春、秋季最近。在 200~300 m 深度处、白天出现的较低散射区域内, 冬季的散射最强, 而夏季最弱。此外, 在春季和冬季, 还可发现在上散射层和深散射层之间的 200 m 水深处, 还存在一层较弱的主要出现在夜间的散射层。

图 4 为 300 kHz 声散射层在 4 个季节的变化情况, 可见冬季声散射强度的昼夜变化最不明显。此外, 冬季深散射层深度最浅(图 3), 说明浮游动物在冬季的迁移深度比较浅, 因此导致 300 kHz ADCP 测量范围内的浮游动物昼夜迁移引起的散射强度变化很小。由图 4 可见, 夏季虽然存在昼夜变化, 但是强度较弱, 而夏季的深散射层虽然最深, 但是强度在 4 个季节中最弱(图 3), 说明夏季深散射层中的浮游动物量可能最少; 春季的声散射强度和昼夜变化在 4 个季节中最强也最明显, 秋季虽然由于观测深度较深声散射强度较弱, 但昼夜变化明显(图 3 和图 4), 因此可以认为春秋两季深散射层中的浮游生物量最大, 迁移深度也比较深。

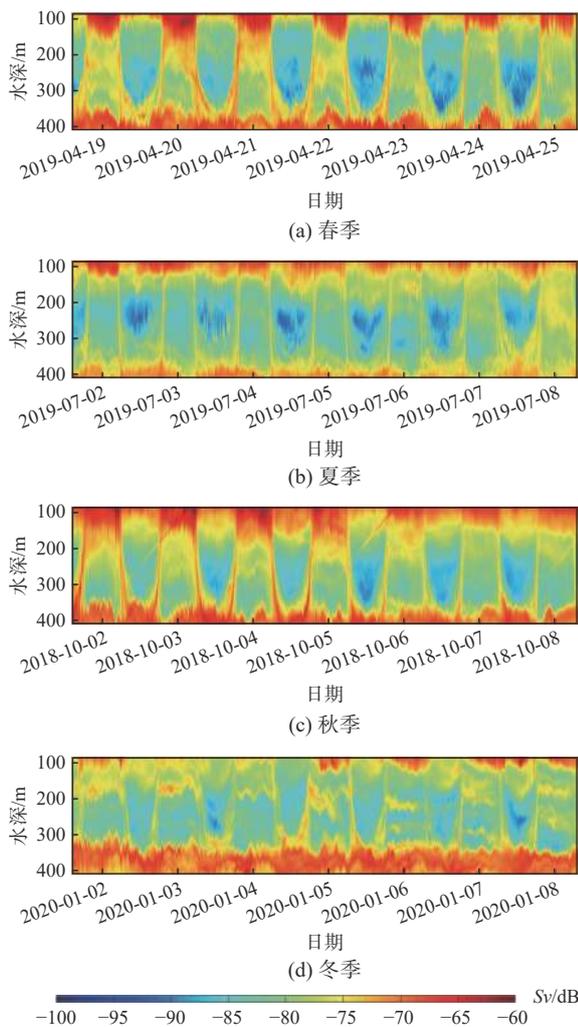


图 3 4 个季节的 75 kHz 声散射强度分布

Fig. 3 Distribution of the sound scattering intensity at 75 kHz in four seasons

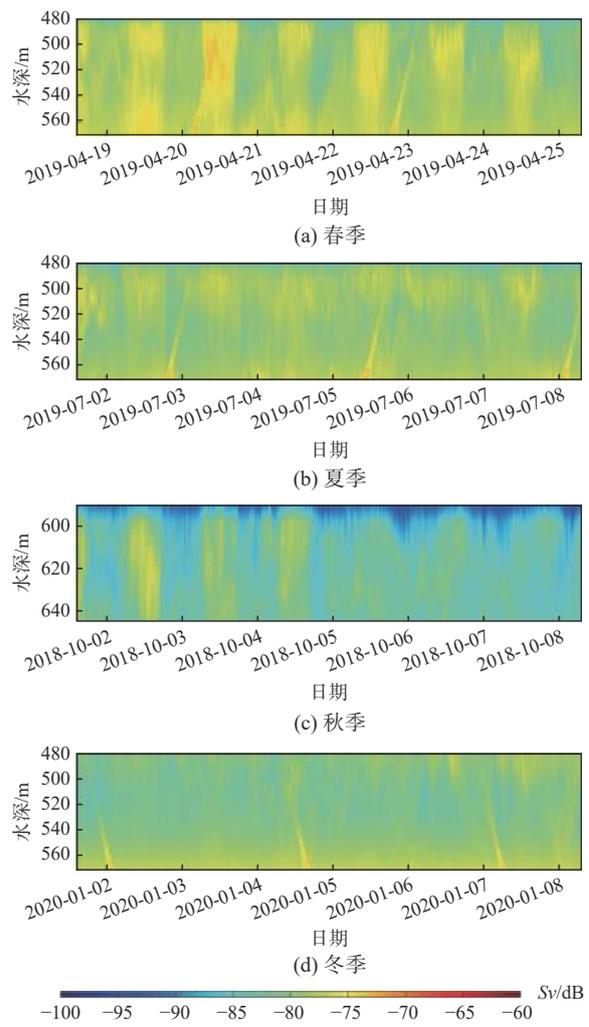


图 4 4 个季节的 300 kHz 声散射强度分布

Fig. 4 Distribution of the sound scattering intensity at 300 kHz in four seasons

2.3 声散射日变化的季节变化特征

散射强度分布的日变化在 4 个季节中也有显著不同的变化特征。图 5 为 4 个季节中的 1 d 散射强度变化

情况,其最主要特征体现在浮游动物昼夜迁移发生时间显著不同。夏季,浮游动物离开上散射层的时间最早,在清晨 05:00 即开始向下迁移,在傍晚浮游动物从深散射层回到上散射层的时间最晚,返回时间接近 20:00;冬季,浮游动物向深散射层迁移的时间最晚,在早晨 06:00 之后才开始迁移,在傍晚浮游动物从深散射层回到上散射层的时间最早,在 18:00 之前即能回到上散射层;春秋两季的迁移时间介于冬夏两季之间。

由图 5 还可见内波活动引起的散射层的快速抖动。其中,春季的散射层抖动更密集而冬季的散射层抖动相对较少,这表明夏季的内波活动更多,这与此前的内波观测结果基本一致^[31]。

图 6 为 300 kHz 声散射强度的日变化情况。由图 6 可见,春秋两季声散射强度存在显著的昼夜变化,即白天向下迁移的浮游动物使 480~580 m 乃至 590~640 m(秋季)深度的声散射产生了显著上升;在夏季,这一深度声散射强度的昼夜变化很弱,这可能主要是由深散射层在夏季本身强度较弱引起的(图 5);在冬季,这一深度的声散射强度的昼夜变化也不明显,这应主要是由深散射层在冬季比较浅所致。

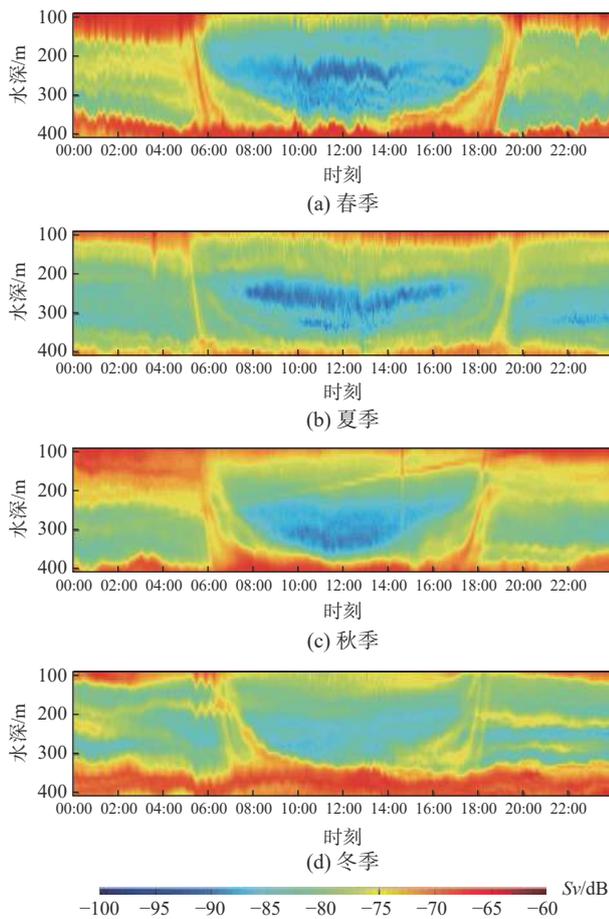


图 5 4 个季节的 75 kHz 声散射强度日变化

Fig. 5 The daily variation of the sound scattering intensity at 75 kHz in four seasons

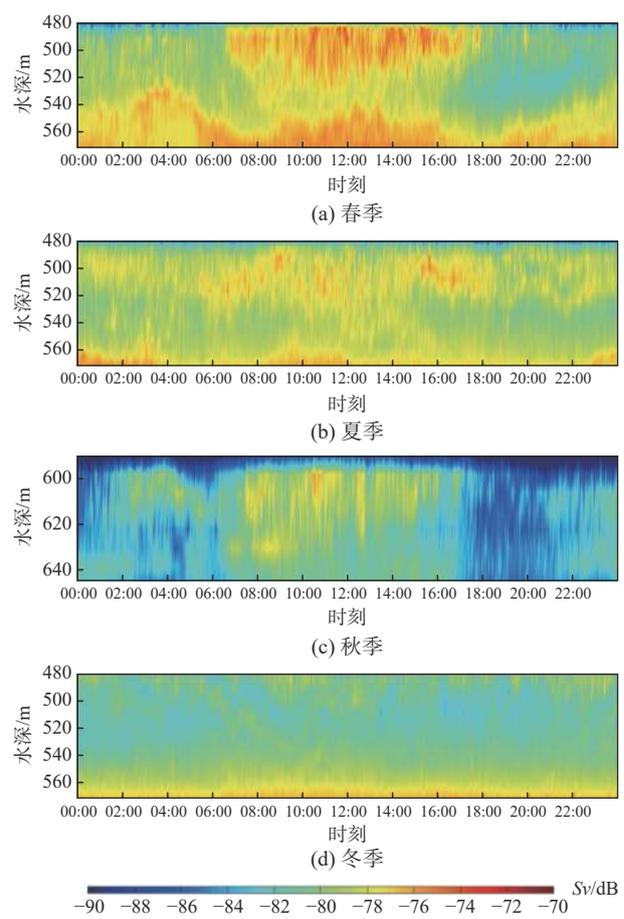


图 6 4 个季节的 300 kHz 声散射强度日变化

Fig. 6 The daily variation of the sound scattering intensity at 300 kHz in four seasons

2.4 时间平均声散射强度的季节变化

图 7 为 4 个季节中时间平均 75 kHz 声散射强度的深度分布,从图 7 中可见明显的 2 层散射层结构和散射强度的四季变化。在上散射层中(100 m 以浅),同深度层夏秋两季的声散射强度最强,而春冬两季较低;在深散射层中,春冬两季声散射最强,而夏秋较低。深散射层存在散射强度极大值,冬季极大值的位置最浅,夏季最深。在 2 个散射层之间存在声散射强度极小值,秋季的散射极小值所处深度最深,位于约 300 m 深度处;夏

季的散射极小值所处深度最浅, 位于约 240 m 深度处; 秋季的散射强度极小值最小, 而其余 3 个季节的极小值比较接近。

图 8 为不同季节时间平均的 300 kHz 声散射强度在 490~580 m 深度层的变化情况。由于秋季的观测深度不在此深度范围, 所以没有一起比较。从春、夏、冬三个季节可见, 在 490~580 m 深度层, 声散射强度也存在一个极小值, 该值深度在冬季最浅, 位于约 520 m 深度处; 在夏季最深, 位于约 530 m 深度处; 春季则处于冬夏之间。

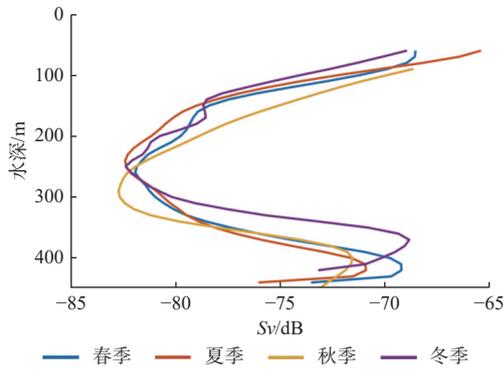


图 7 时间平均 75 kHz 声散射强度深度剖面的季节变化
Fig. 7 The Seasonal variations of depth profiles of the time-averaged sound scattering intensity at 75 kHz

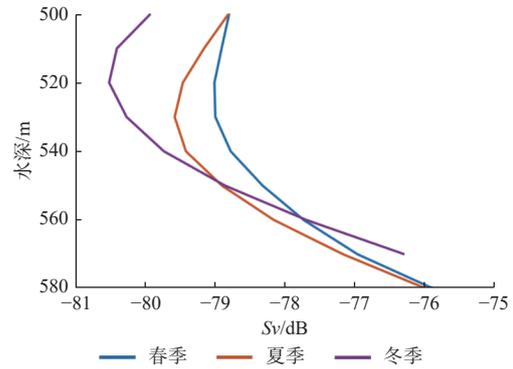


图 8 时间平均 300 kHz 声散射强度深度剖面的季节变化
Fig. 8 The Seasonal variations of depth profiles of the time-averaged sound scattering intensity at 300 kHz

3 结 语

本文利用在南海 4 个季节开展的锚系观测数据, 通过修正 ADCP 的回声强度数据得到了声散射强度的垂向和时间变化分布。对比分析了海区水体声散射强度的整体季节变化特征、日变化的季节变化特征以及时间平均的声散射强度的季节变化。主要结论如下:

1) 观测结果表明水体声散射分布存在明显的上散射层和深散射层, 散射层分布存在显著的季节变化。上散射层在冬夏最浅, 位于 100 m 以浅, 春秋最深, 接近 200 m; 深散射层同样在冬季最浅, 其上缘位于约 300 m 深度处, 而夏季深散射层的深度最深, 基本位于 400 m 以深区域, 春秋两季则介于冬夏两季之间。因此, 上散射层和深散射层之间的距离在冬季最近, 在夏季最远。

2) 浮游动物是海区中的主要散射体, 散射强度的变化体现出浮游动物在四季昼夜迁移特性的不同。在早晨, 夏季浮游动物离开上散射层的时间最早, 而冬季则最晚, 春秋两季的迁移时间介于冬夏两季之间。在傍晚, 冬季浮游动物从深散射层回到上散射层的时间最早, 而夏季则最晚。冬季浮游动物处于上散射层的时间为 18:00 至次日 06:00, 约 12 h; 夏季浮游动物处于上散射层的时间为 20:00 至次日 05:00, 约 9 h。

3) 声散射强度还可以指示浮游动物生物量的季节变化。从时间平均的声散射强度的垂直分布来看, 上散射层在春秋两季的声散射强度最强, 而冬夏较低, 表明春秋两季上散射层中的浮游动物生物量最多, 而冬夏两季的浮游动物生物量较少, 这可能是由于观测海区位于亚热带, 春秋两季的温度更适宜浮游动物生存。在深散射层中, 冬夏两季声散射最强, 而春秋最低。深散射层中存在散射强度极大值, 冬季散射强度极大值的位置最浅。此外, 在 2 个散射层之间存在散射极小值, 春季的声散射强度极小值最深, 秋季的极小值最浅。

海洋中的声散射源复杂多样, 因此海洋中声散射的时空变化是复杂的, 本研究利用长时间序列的定点连续现场观测数据虽然给出了南海北部的高频声散射季节变化特征, 并讨论了浮游动物和海洋微结构在其中扮演的重要角色, 但本研究的观测数据仍很有限, 对声散射场季节变化的更深入认识仍需要结合更丰富的同步水文和生态环境等的观测, 此外, 根据浮游动物的动态生长特征等环境特点建立声散射模型是今后了解和利用海区声散射场动态变化的一个必要手段。

参考文献 (References):

- [1] CISEWSKI B, STRASS V H, RHEIN M, et al. Seasonal variation of diel vertical migration of zooplankton from ADCP backscatter time series data in the Lazarev Sea, Antarctica[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2010, 57(1): 78-94.
- [2] JIANG S, DICKEY T D, STEINBERG D K, et al. Temporal variability of zooplankton biomass from ADCP backscatter time series data at the Bermuda Testbed Mooring site[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2007, 54(4): 608-636.
- [3] SINDLINGER L R, BIGGS D C, DIMARCO S F. Temporal and spatial variability of ADCP backscatter on a continental slope[J]. *Continental Shelf Research*, 2005, 25(2): 259-275.
- [4] GLIWICZ M Z. Predation and the evolution of vertical migration in zooplankton[J]. *Nature*, 1986, 320: 746-748.
- [5] INOUE R, KITAMURA M, FUJIKI T. Diel vertical migration of zooplankton at the S1 biogeochemical mooring revealed from acoustic backscattering strength[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121: 1031-1050.
- [6] HEYWOOD K J, SCROPE-HOWE S, BARTON E D. Estimation of zooplankton abundance from shipborne ADCP backscatter[J]. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 1991, 38(6): 677-691.
- [7] CHEN Z, WANG Z, LIU Y, et al. Estimating the Flow Velocity and Discharge of ADCP Unmeasured Area in Tidal Reach[J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2016, 52: 201-2018.
- [8] THURNHERR A M. The finescale response of lowered ADCP velocity measurements processed with different methods[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(4): 597-600.
- [9] NASH J D, MOUM J N. River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean[J]. *Nature*, 2005, 437(7057): 400-403.
- [10] ROSS T, LUECK R. Sound scattering from oceanic turbulence[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(6): 1344.
- [11] LAVERY A C, CHU D, MOUM J N. Measurements of acoustic scattering from zooplankton and oceanic microstructure using a broadband echosounder[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2009, 67: 379-394.
- [12] DEAN C, SOLOVIEV A, HIRONS A, et al. Biomixing due to diel vertical migrations of zooplankton: Comparison of computational fluid dynamics model with observations[J]. *Ocean Modelling*, 2016, 98: 51-64.
- [13] BIANCHI D, MISLAN K. Global patterns of diel vertical migration times and velocities from acoustic data[J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61(1): 353-364.
- [14] BIANCHI D, GALBRAITH E D, CAROZZA D A, et al. Intensification of open-ocean oxygen depletion by vertically migrating animals[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(7): 545-548.
- [15] ASHJIAN C J, SMITH S L, FLAGG C N, et al. The influence of a Gulf Stream meander on the distribution of zooplankton biomass in the Slope Water, the Gulf Stream, and the Sargasso Sea, described using a shipboard acoustic Doppler current profiler[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1994, 41(1): 23-50.
- [16] WISHNER K F, SEIBEL B A, ROMAN C, et al. Ocean deoxygenation and zooplankton: Very small oxygen differences matter[J]. *Science Advances*, 2018, 4(12): u5180.
- [17] YUAN Y, WEI H, ZHAO L, et al. Implications of intermittent turbulent bursts for sediment resuspension in a coastal bottom boundary layer: a field study in the western Yellow Sea, China[J]. *Marine Geology*, 2009, 263(1): 87-96.
- [18] YUAN Y, WEI H, ZHAO L, et al. Observations of sediment resuspension and settling off the mouth of Jiaozhou Bay, Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(19): 2630-2643.
- [19] HOITINK A, HOEKSTRA P. Observations of suspended sediment from ADCP and OBS measurements in a mud-dominated environment[J]. *Coastal Engineering*, 2005, 52(2): 103-118.
- [20] 徐智优, 原庆东, 熊学军, 等. 南海东北部C型内孤立波的观测与分析[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(2): 211-225. XU Z Y, YUAN Q D, XIONG X J, et al. Observation and analysis of type C internal solitary waves in the northeastern South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(2): 211-225.
- [21] 谢华荣, 熊学军, 陈亮. 南海北部陆坡内孤立波对桩柱作用力的极值推算[J]. *海洋科学进展*, 2019, 37(2): 171-186. XIE H, XIONG X, CHEN L. Calculation of the maximal force exerted by internal solitary waves on piles in slope area of the northern South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2019, 37(2): 171-186.
- [22] WILSON C D, FIRING E. Sunrise swimmers bias acoustic Doppler current profiles[J]. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 1992, 39(5): 885-892.
- [23] SASSI M G, HOITINK A J F, VERMEULEN B. Impact of sound attenuation by suspended sediment on ADCP backscatter calibrations[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(9): 2997-3002.
- [24] 刘浩, 陈亮, 王火平, 等. 柱形内波观测浮标的设计与稳定性分析[J]. *海岸工程*, 2021, 40(4): 261-268. LIU H, CHEN L, WANG H P, et al. Design and stability analysis of cylindrical inner wave observation buoy[J]. *Coastal Engineering*, 2021, 40(4): 261-268.

- [25] 陈钊, 吕连港, 杨光兵, 等. 基于船载ADCP和LADCP观测的南海声散射层[J]. *海洋科学进展*, 2016, 34(2): 240-249. CHEN Z, LÜ L G, YANG G B, et al. Research on sound scattering layer in the South China Sea observed with ship-board ADCP and LADCP[J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(2): 240-249.
- [26] 刘世刚, 汤勇, 陈国宝, 等. 南海深海声学散射层垂直分布和昼夜变化初步研究[J]. *海洋科学进展*, 2015, 33(2): 173-181. LIU S G, TANG Y, CHEN G B, et al. Vertical distribution and diurnal movement of the deep scattering layer in the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2015, 33(2): 173-181.
- [27] 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(3): 53-56. CHEN C Y, ZHANG S Z. A practical investigation on demersal fish and DSL rhythmic vertical migration by acoustic method[J]. *Marine Sciences*, 1994(3): 53-56.
- [28] 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 Y X, YANG Y H, LI Z K, et al. Deep scattering layer in the South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 1986, 8(1): 107-110.
- [29] 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: IEEE, 1999.
- [30] GARTNER J W, CHENG R T, WANG P, et al. Laboratory and field evaluations of the LISST-100 instrument for suspended particle size determinations[J]. *Marine Geology*, 2001, 175(1): 199-219.
- [31] CHEN L, ZHENG Q, XIONG X, et al. Dynamic and statistical features of internal solitary waves on the continental slope in the northern South China Sea derived from mooring observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(6): 4078-4097.

Seasonal Variation of Sound Scattering in the Northern South China Sea

GAO Shuang¹, YANG Guang-bing^{2,3,4,5}, XIONG Xue-jun^{2,3,4,5}

(1. Deepwater Engineering & Construction Center, Shenzhen Branch, CNOOC (China) Co., Ltd., Shenzhen 518067, China;

2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;

3. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, MNR, Qingdao 266061, China;

4. Shandong Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, Qingdao 266061, China;

5. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: Sound scattering is an important acoustic phenomenon. High-frequency acoustic scattering signals generated by seawater bodies can be used to conduct acoustic oceanographic research for various purposes and may interfere with the underwater acoustic equipment. However, the background sound scattering of seawater bodies is characterized by significant spatial and temporal variations. As a result, it is of great significance to carry out the observations of time-varying sound scattering in a specific sea area. In this study, sound scattering data of 80 days covering four seasons are collected by using two ADCPs equipped in a mooring system in the Northern South China Sea. The data include two frequency bands of 75 kHz and 300 kHz and involve almost the whole water column from the surface to about 600 m deep. There exist two acoustic scattering layers in the vertical direction of the water column: one is the upper scattering layer, which is distributed at a water depth shallower than about 100 m in winter and summer and about 200 m in spring and autumn, and the other is the lower scattering layer, which lies at a water depth deeper than about 300 m in winter and about 400 m in summer. Therefore, the distance between the two scattering layers is the farthest in summer and the closest in spring and autumn. The acoustic scattering intensity in the two scattering layers also shows significant seasonal variations. In the upper layer the acoustic scattering intensity is stronger in summer and autumn and weaker in spring and winter, whereas in the deep layer the acoustic scattering intensity is exactly the opposite.

Key words: sound scattering; northern South China Sea; ADCP; zooplankton

Received: December 17, 2021