

毕伟传, 梁楚进, 蔺飞龙, 等. 南海北部内波作用下声散射层垂直迁移特征研究[J]. 海洋学报, 2024, 46(8): 37–49, doi:10.12284/hyxb2024073

Bi Weichuan, Liang Chujin, Lin Feilong, et al. Study on the vertical migration characteristics of the acoustic scattering layer under the influence of internal waves in the northern South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(8): 37–49, doi:10.12284/hyxb2024073

# 南海北部内波作用下声散射层垂直迁移特征研究

毕伟传<sup>1</sup>, 梁楚进<sup>1,2,3\*</sup>, 蔺飞龙<sup>1</sup>, 崔子健<sup>3</sup>, 汤俊辉<sup>1</sup>

(1. 自然资源部第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012; 2. 南京信息工程大学 海洋科学学院, 江苏 南京 210044; 3. 浙江大学 海洋学院, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 利用深海潜标搭载的声学多普勒流速剖面仪得到的后向散射强度, 研究了南海北部声散射层的昼夜垂直迁移和内孤立波对其的影响。观测结果表明: 受浮游动物影响, 声散射层主要表现为“昼沉夜浮”, 日出前约 1 h 至日出期间向下移动, 日落至日落后约 1 h 期间向上移动, 平均迁移速度为 4.7 cm/s (上移) 和 5.8 cm/s (下移)。此外, 经过观测海域的内孤立波引起一对先向下后向上的垂向流, 最大垂向流速超过 50 cm/s, 导致声散射层发生数十至上百米的起伏, 海洋上层的声学后向散射强度在内孤立波波谷处达到极大值。进一步的研究显示日间出现内孤立波垂向流速与深度平均后向散射强度变化幅度相关性比夜间的内孤立波高。在两种类型波动引起的垂向流速相当时, 日间的深度平均后向散射强度变化幅度通常大于夜间。

**关键词:** 声学多普勒流速剖面仪; 内孤立波; 声散射层; 昼夜垂直迁移; 南海

中图分类号: P733.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)08-0037-13

## 1 引言

声散射层是海洋中生物(浮游生物和鱼类)密度较高并能造成强烈声散射的水层, 作为海洋生态系统的重要组成部分, 普遍存在于全球海洋中, 不同海域的声散射层的组成、深度和迁移模式存在不同<sup>[1]</sup>。声散射层中的生物是海洋巨型动物(如蓝鲸)的重要食物来源, 它们的昼夜垂直迁移(Diel Vertical Migration, DVM)是“生物泵”的重要组成部分<sup>[2-3]</sup>。同时, 在生物量方面被认为是地球上最大的生物迁移<sup>[4]</sup>, 保守估计至少有 15% 的浮游动物生物量参与迁移<sup>[5]</sup>。昼夜垂直迁移在全球碳循环中扮演着重要角色, 促进海洋混合<sup>[6]</sup>, 为维持海洋层化提供能量<sup>[7-8]</sup>, 还可能对强海流的流速和湍流特征产生影响<sup>[9]</sup>。

针对由浮游动物构成的声散射层的调查方法主

要包括拖网采样和声学采样等方法。与传统的拖网采样方法相比, 非接触的声学采样方法可以避免干扰生物, 并可在更精细的分辨率下对更大区域进行调查<sup>[10-12]</sup>。拖网采样方法无法克服网逃避效应<sup>[13-14]</sup>, 体型大小不同的浮游生物捕获效率差异可导致基于声学观测的生物量估计值相差 5 倍<sup>[15]</sup>。通过潜标或船载的声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)获取的声学数据可以用于研究不同环境因素影响下的生物学变化<sup>[16-19]</sup>。高时间分辨率的声学数据目前被广泛用于识别小尺度现象, 如研究风暴等突发事件对生物变化的影响<sup>[20]</sup>。

深海中声散射层的昼夜垂直迁移主要受光照的影响<sup>[21]</sup>。许多研究认为, 迁徙者在夜间停留在浅水区觅食, 日间则下降到更深的水域以躲避视觉动物的捕食<sup>[22-23]</sup> 或有害的紫外线<sup>[21]</sup>。此外, 季节交替、上升流

收稿日期: 2024-03-07; 修订日期: 2024-06-05。

作者简介: 毕伟传(1999—), 男, 山东省日照市人, 研究方向为深海动力过程。E-mail: biweichuan@foxmail.com

\* 通信作者: 梁楚进(1966—), 男, 湖南省蓝山县人, 研究员, 主要从事物理海洋学研究。E-mail: cjliang@sio.org.cn

和涡旋等都可以改变海洋环境。海洋各个尺度过程引起的海流可以将一些新物种带入观测区域,改变浮游动物的丰度,甚至影响它们的行为<sup>[24-27]</sup>。内波是海洋中常见的小尺度现象,并与高湍流值相关联<sup>[28-29]</sup>。内波破碎可以引起显著的垂直混合<sup>[30]</sup>,提高生物生产力<sup>[31]</sup>。内波的传播还是跨陆架输运和底栖生物(如十足目甲壳动物和多种鱼类)沉降的重要机制<sup>[32]</sup>。

南海作为重要边缘海,不仅生物资源丰富,同时海洋动力过程复杂,包括台风、季节性环流和内波等过程。南海的声散射层和昼夜垂直迁移受到广泛研究<sup>[33-35]</sup>,学者们发现了一系列影响因素,包括涡旋<sup>[36-38]</sup>、台风<sup>[39]</sup>、天文大潮<sup>[40]</sup>等。Yang 等人基于 ADCP 观测研究了南海北部的声散射层,发现昼夜垂直迁移全年均会出现,最大迁移速度可达 9 cm/s,并认为台风激发的强流和降温也会影响昼夜垂直迁移<sup>[39]</sup>。

南海北部的内波强度几乎是全球之最<sup>[41]</sup>,在传播过程中造成的强烈混合<sup>[42]</sup>对海洋的物质能量交换、海洋生态环境有重要的影响<sup>[43]</sup>。内孤立波激发极强的垂向流动<sup>[44]</sup>,将富含溶解氧和二氧化碳的表层水输送到深层,同时将富含营养盐的深层水输送到真光层,有助于提高海洋生物生产力<sup>[45-47]</sup>,还可能在浮游动物的聚集和迁移中发挥重要作用<sup>[48]</sup>。已有研究表明,南海北部的内孤立波主要可以分为 a 型和 b 型两种情况<sup>[49-50]</sup>。a 型与 b 型内孤立波每日约相隔 12 h 出

现, a 波每日到达时间接近,具有显著的规律性,常以波列的形式出现,而 b 波的到达时间则每日延后约 1 h,常以单个孤立子的形式出现<sup>[49]</sup>。由于两类内孤立波通常相隔 12 h 出现,在一个站位同一天的日间和夜间分别出现两类内孤立波。然而,目前对于南海昼夜分别出现的两类内孤立波影响声散射层垂直迁移的研究仍较少。特别是,在声散射层昼夜不同分布的背景下,两类内孤立波激发的强流对声散射层垂直分布的影响差异缺少定性和定量的认识。本文基于南海北部东沙海域两个潜标站位中 ADCP 的 4 个月观测数据,开展声散射层迁移的特征分析,并重点探讨两类内孤立波对声散射层的影响作用。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

2022 年 4-8 月在南海东沙群岛东侧陆坡区布放 2 个全剖面海流连续观测站(图 1a, GEBCO 2023 水深数据来自 [www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/)),分别为 S1 观测站(21.1°N, 117.6°E, 水深约 707 m)和 S2 观测站(20.5°N, 117.3°E, 水深约 734 m)。S1 站位在水深 315 m 处、S2 站位在水深 405 m 处各安装 2 台 75 kHz ADCP, 每处 2 台仪器分别向上和向下观测(图 1b)。每个 ADCP 采样层厚为 16 m, 盲区长度为 23.78 m, 采样间隔为 2 min。S1 站位在水深

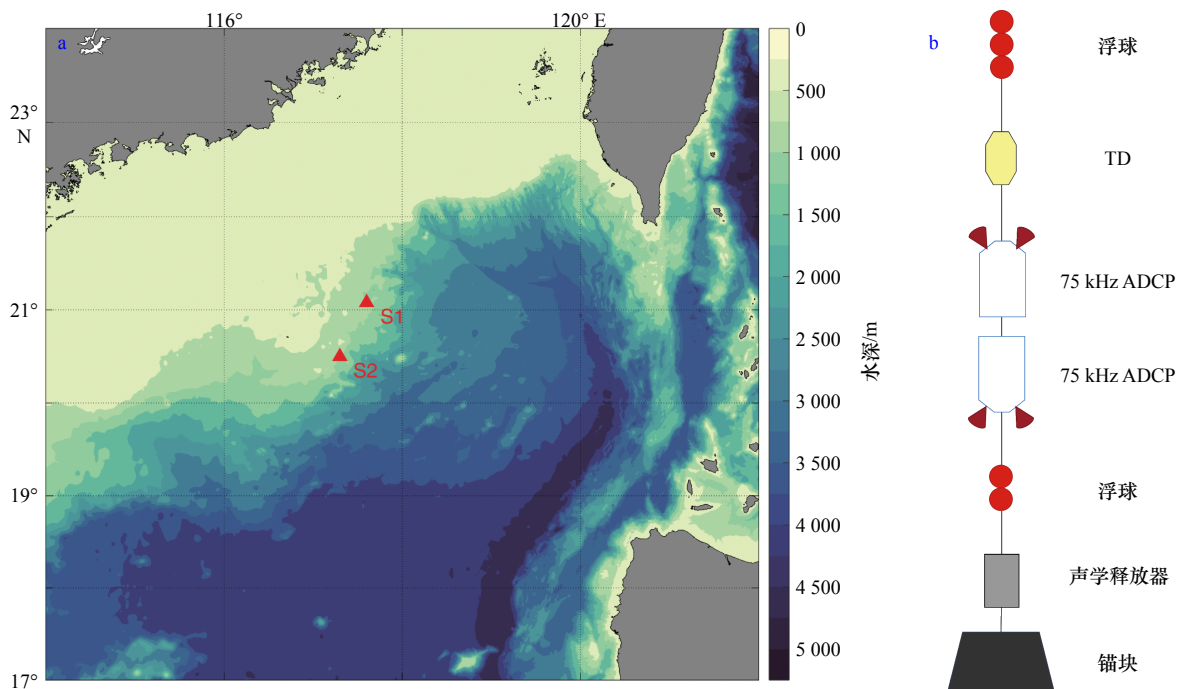


图 1 南海东北部地形(水深)及站位(三角形)分布(a)和潜标结构(b)

Fig. 1 Topography (depth of water) of the northeastern South China Sea and locations of moorings (marked by triangles) (a) and structure of the moorings (b)

270 m处、S2 站位在水深 370 m 处各安装 1 台深海温深仪(TD), 采样间隔为 2 min。

为了估算内孤立波引起的等温线深度变化, 同时使用由现场实测的单点深海温深仪(TD)获取的温度、深度数据和再分析数据集 CMEMS(<https://doi.org/10.48670/moi-00016>)中的全水深温度数据。由于 S1 站位 TD 所在的深度与 13℃ 等温线平均深度接近, 文中通过式(1)估算 13℃ 等温线所在深度, 以更全面地了解研究海域的热力结构。

$$D = d + (13 - T)/k, \quad (1)$$

式中,  $D$  为 13℃ 等温线的深度,  $d$  为 TD 所在深度,  $T$  为 TD 测得的温度,  $k$  是由 CMEMS 全水深温度数据计算得到的温度梯度。

本文观测站位的日出/日落时刻通过 MATLAB 工具包 SUNRISE: sunrise and sunset time 输入日期和经纬度计算得到(<https://github.com/beaudu/sunrise/releases/tag/v1.4.1>)。

## 2.2 后向散射强度的计算方法

ADCP 以固定频率发射声波并接收从海水中的声散射体返回的回声, 运用多普勒效应测量流速。海水中的声散射体主要为浮游生物和悬浮沉积物等, ADCP 接收到的回波强度随声散射体浓度增大而增强<sup>[51]</sup>。由于海水的声吸收效应, 测量层与换能器距离越远, 回波强度衰减越严重。为了避免回波强度随距离的衰减, 将回波强度转换为后向散射强度 (Mean Volume Backscattering Strength, MVBS), 可以更加真实地反映海水中的声散射体浓度<sup>[52]</sup>。研究表明, 可以将后向散射强度作为表征生物量的指标<sup>[27]</sup>。后向散射强度  $S_v$  (单位为 dB) 通过式(2)计算<sup>[52-53]</sup>:

$$S_v = C + 10 \log_{10} [(T_x + 273.16R^2)] - L_{DBM} - P_{DBW} + 2\alpha R + 10 \log_{10} [10^{K_c(E-E_r)/10} - 1], \quad (2)$$

$$R = \frac{B + (L + D)/2 + (N - 1) \times D + D/4}{\cos \theta} \times \frac{c'}{c_1}, \quad (3)$$

$$2\alpha R = 2\alpha_p B / \cos \theta + \sum_{n=1}^b \alpha_n, \quad (4)$$

$$K_c = 127.3 / (T_x + 273), \quad (5)$$

式中,  $C$  是 ADCP 系统常数, 本文 ADCP 工作频率为 76.8 kHz, 该值为 -159.1 dB;  $T_x$  是传感器实时温度 (℃);  $R$  是到一个水层单元的斜距 (单位为 m), 该值是沿波束至相关散射层的距离;  $B$  为 ADCP 的盲区长度;  $D$  为水层单元长度, 本研究用仪器设置为 16 m;  $L$  为 ADCP 的发射脉冲长度, 与  $D$  相等;  $N$  为层数;  $\theta$  为换能器波束与垂直方向的夹角。式(3)中的项  $D/4$  考虑到 ADCP 在每个水层单元的最后四分之一

一进行回波强度采样, 而非在中部;  $c'$  是传感器至水层单元的平均声速。  $c_1$  是仪器使用的声速, 该比值影响很小, 故本文中两者取相同值  $L_{DBM}$  是  $10 \log_{10}(L)$ ,  $L$  为 ADCP 的发射脉冲长度, 与  $D$  相等;  $P_{DBW}$  是  $10 \log_{10}$  (发射功率, W), 本文  $P_{DBW}$  为 24;  $\alpha$  是声吸收系数 (单位为 dB/m), 每个水层单元的吸收  $\alpha_n$  为  $2\alpha D / \cos(\theta)$ , 式(4)中  $\alpha$  是该深度的吸收系数;  $\alpha_p$  是仪器所在处的吸收系数;  $b$  是水层单元编号。  $K_c$  是声信号强度转换系数,  $E$  是 4 个波束的平均回波强度,  $E_r$  是本底噪声值取 45。

## 3 结果

### 3.1 声散射层分布和昼夜垂直迁移的基本特征

图 2 给出了对观测期间每天相同时刻取平均的后向散射强度 (图 2a, b) 和垂向流速 (图 2c, d)。在深度分布上, 观测期间 S1 站位和 S2 站位的最强的声散射层主要分布于海水中层 350~500 m 深度。S2 站位的 ADCP 所在深度较深, 位于最强的深海散射层中, 因此邻近仪器处后向散射强度最大 (图 2b); 而 S1 站位的 ADCP 所在深度较浅, 因此通过下打的 ADCP 观测到较完整的深海散射层 (图 2a)。在时间分布上, 两站位 S1 和 S2 观测到的 MVBS 均呈现显著的昼夜变化, 350 m 以浅的海洋上层日间 MVBS 低于夜间, 夜间 50~130 m 处的上散射层相对较强。图 2 中蓝色 (红色) 虚线代表观测期间的平均日出 (日落) 时刻, 黎明/黄昏时可以观察到 130 m 至 400 m 之间出现向下/向上倾斜的声散射层 (图 2a, b), 反映了浮游动物昼夜垂直迁移的轨迹, 其幅度在 200 m 以上, 持续时间约 1 h。从垂向流速平均的分布来看 (图 2c, d), 100~270 m 范围内的垂向流速变化最为显著。在日出前 1 h, 深度约 100 m 处向下的流速增加, 流速开始增加的时间随着深度增加逐渐延迟; 在日落前 20 min, 深度约 270 m 处向上的流速增加, 流速开始增加的时间随着深度减小逐渐延迟, 流速在日落 after 明显增加。这一结果反映了较浅 (深) 层的生物对光照强度增强 (减弱) 的响应更为积极。由昼夜垂直迁移 200 m 的幅度和 1 h 的时长, 保守估计的理论迁移速度为 5.5 cm/s。黎明时的 MVBS 等值线斜率也略大于黄昏时 (图 2a, b), 声散射层下移平均速度比上移平均速度大, 与先前的观测结果<sup>[39, 54]</sup>一致。在昼夜垂直迁移期间 150~270 m (取较小深度范围以确保处于昼夜垂直迁移轨迹, 图 2c, d) 的深度平均垂向流速为 4.7 cm/s (上移) 和 5.8 cm/s (下移), 与保守估计值接近。

选取观测期间垂向流速变化最为显著的 100~

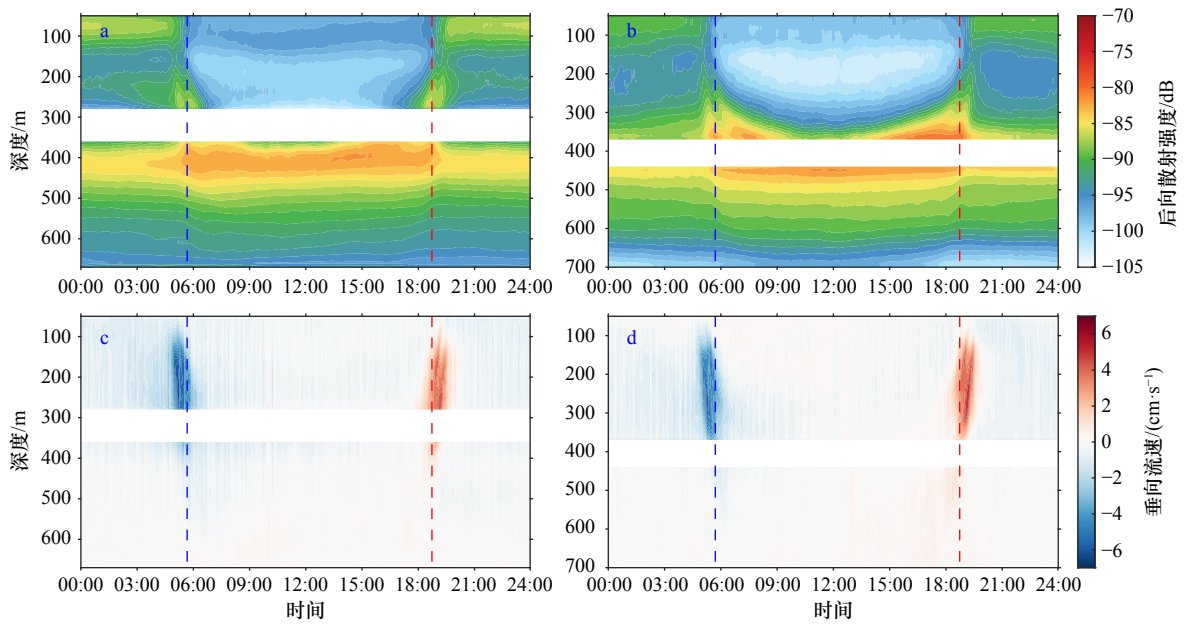


图2 观测期间的平均昼夜垂直迁移模式

Fig. 2 The average diel vertical migration patterns during the observation period

a. S1 站位后向散射强度, b. S2 站位后向散射强度, c. S1 站位垂向流速, d. S2 站位垂向流速。空白区域为两台 ADCP 的盲区, 蓝色(红色)虚线代表观测期间的平均日出(日落)时刻

a. MVBS of Station S1, b. MVBS of Station S2, c. vertical velocities of Stations S1, d. vertical velocities of Stations S2. The blank areas represent the blank distance of the two ADCPs. The blue (red) dashed lines indicate the average sunrise (sunset) times during the observation period

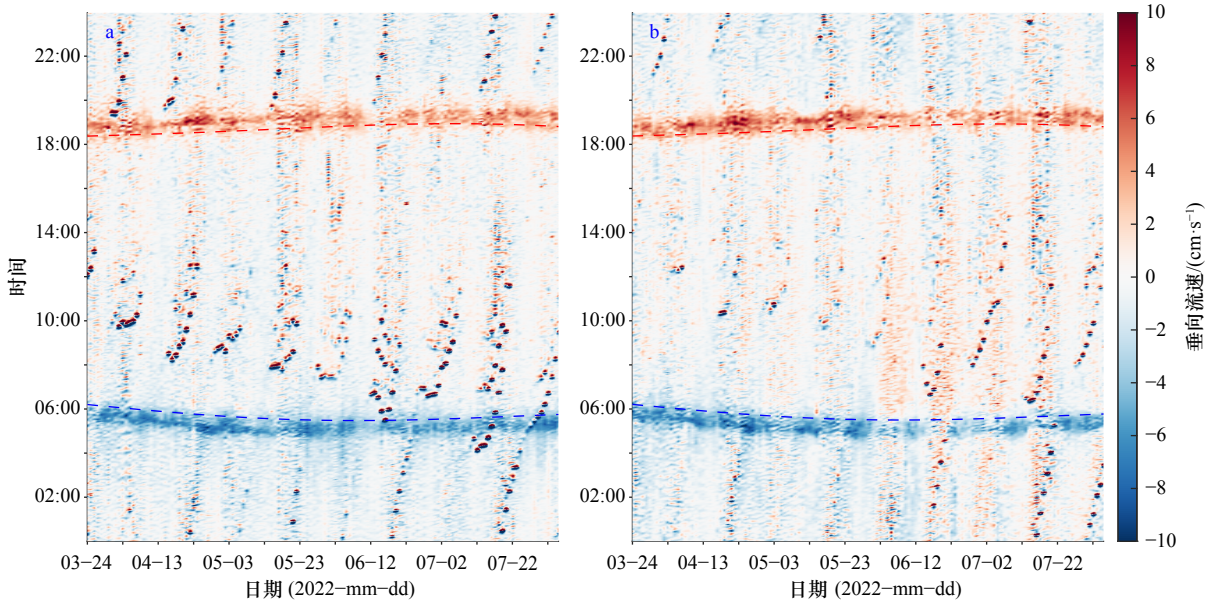


图3 海洋上层(100~270 m)深度平均垂向流速

Fig. 3 Depth-averaged vertical velocities of the upper ocean layer (100 m to 270 m)

a. S1 站位, b. S2 站位。蓝色(红色)虚线代表日出(日落)时刻

a. Station S1, b. Station S2. The blue (red) dashed lines indicate the times of sunrise (sunset)

270 m 深度, 进行深度平均后得到随时间变化的深度平均垂向流速分布(图3)。昼夜垂直迁移期间 ADCP 测得的垂向流速最大可超过 9 cm/s。向下(向上)的垂向流速开始增加的时间从3月底观测开始到

6月逐渐提前(推迟), 夏至日后逐渐推迟(提前), 与日出/日落时刻(图3中的虚线)的变化趋势同步。S1 和 S2 站位的日出/日落时刻(图3中的虚线)在4个月的观测期间存在近 40 min 的变化, 每天日出前

约 1 h, 向下的垂向流速开始增加到 4 cm/s 以上, 日出后减小到 2 cm/s 以下, 每天日落时, 向上的垂向流速开始增加到 4 cm/s 以上, 日落后约 1 h 减小到 2 cm/s 以下。MVBS 和垂向流速的变化均与日出日落相关, 表明光照是激发浮游动物昼夜垂直迁移的决定性因素。图 3 中还可可见许多深色斑点, 代表 10 cm/s 以上的强垂向流, 主要分布于每天 7 点至 10 点和 19 点至 22 点, 可能由内孤立波引起, 将在下文 3.2 节中详细介绍。

以日出后 2 h 到日落前 2 h 作为日间, 日落后 2 h 到日出前 2 h 作为夜间, 得到两个时间段的平均 MVBS 剖面(图 4a, b)。S1 站位的平均 MVBS 剖面的昼夜相交深度在 300~360 m 之间(两台 ADCP 的盲区)(图 4a), S2 站位的平均 MVBS 剖面的昼夜相交深度则位于 350 m(图 4b), 可以视其为浮游动物昼夜聚集区的分界深度, 该深度以上日间 MVBS 低于夜间, 该深度以下则日间 MVBS 高于夜间。将观测期间每天相同时刻的海洋上层(50~270 m)和下层(450~650 m)的 MVBS 进行深度平均(图 4c, d), 结果显示: 海洋上层的深度平均 MVBS 昼夜差异较大, 夜间比日间高约 7 dB(图 4c); 下层的深度平均 MVBS 昼夜差异较小, 夜间比日间低约 1.5~2 dB(图 4d)。

### 3.2 内孤立波对声散射层的影响

#### 3.2.1 东沙海域内孤立波的基本特征

南海东北部的内孤立波主要由吕宋海峡的潮流

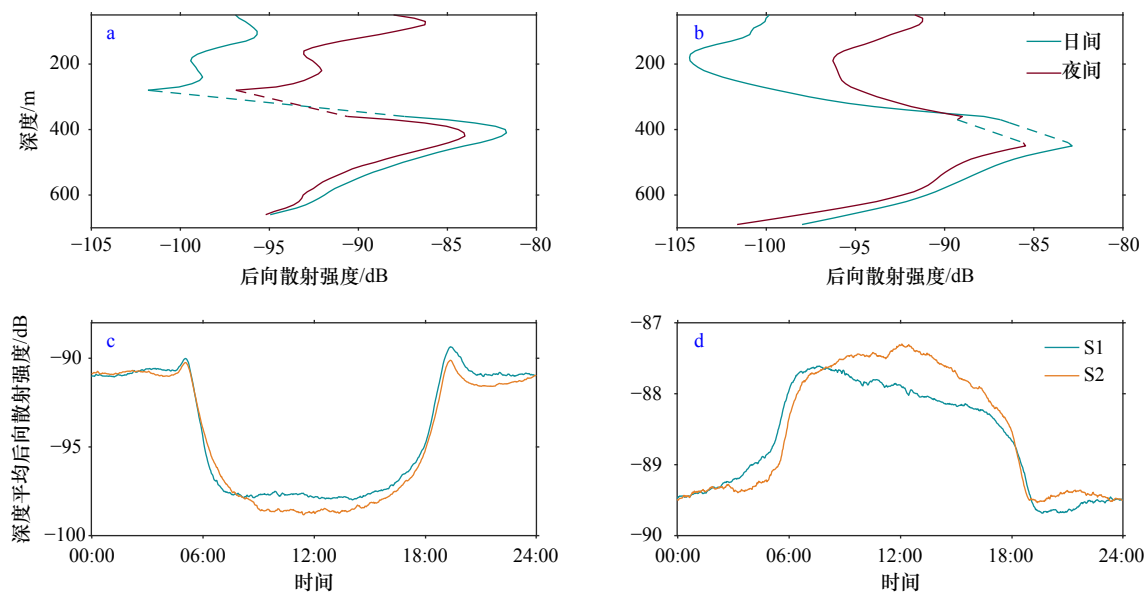


图 4 S1 站位昼夜平均后向散射强度剖面(a), S2 站位昼夜平均后向散射强度剖面(b)(虚线部分为 ADCP 盲区); 海洋上层 50~270 m 深度平均后向散射强度(c), 海洋下层 450~650 m 深度平均后向散射强度(d)

Fig. 4 Daytime and nighttime average MVBS profiles at Station S1 (a); daytime and nighttime average MVBS profiles at Station S2 (b) (the dashed sections represent the blank distance of two ADCPs); depth-averaged MVBS of the ocean's upper layer from 50 m to 270 m depth (c); depth-averaged MVBS of the ocean's lower layer from 450 m to 650 m depth (d)

与地形相互作用生成的<sup>[55]</sup>。本文选取了大潮期间昼夜内孤立波均较强的时间段(2022 年 4 月 1 日至 4 日)来说明。图 5 给出了该时间段垂向流速(左侧)和东西向流速(右侧)分布, 虚线框标出了内孤立波。每日的日间和夜间均有内孤立波出现, 在单个内孤立波经过时, 在垂直方向上引起一对先向下后向上的垂向流, 持续时间约为 20 min, 垂向流速一般在 15 cm/s 以上, 甚至可超过 50 cm/s。在水平方向上, 上层向西的流速一般在 50 cm/s 以上, 甚至可超过 150 cm/s, 例如 4 月 3 日最大水平流速达到 186 cm/s, 下层流速较小, 方向与上层相反, 向东的流速在 50 cm/s 以下。在出现时间上日间和夜间的内孤立波存在不同, 日间的内孤立波的几乎每天都在相同时间出现, 而夜间的内孤立波每天出现时间均比前一天延后约 1 h。例如 4 月 1 日至 4 日日间的内孤立波, 日间均在 09:50 前后 20 min 内出现内孤立波, 夜间则依次在 19:16, 19:46, 20:52, 21:56 出现内孤立波。前人在南海北部内孤立波的研究中, 将每日准时出现的内孤立波称为 a 型, 每日后延 1 h 出现的称为 b 型波<sup>[49]</sup>。在图 6 的后向散射强度分布中, 与内孤立波经过时的强流速时间对应, 声散射层深度起伏的幅度为几十至上百米。海洋上层(50~270 m)在内孤立波经过时后向散射增强, 并在内孤立波波谷处达到极大值, 随后减弱至平常值。

#### 3.2.2 昼夜内孤立波对声散射层的影响比较

由前文所述, 受光照影响, 夜间海洋上层生物量

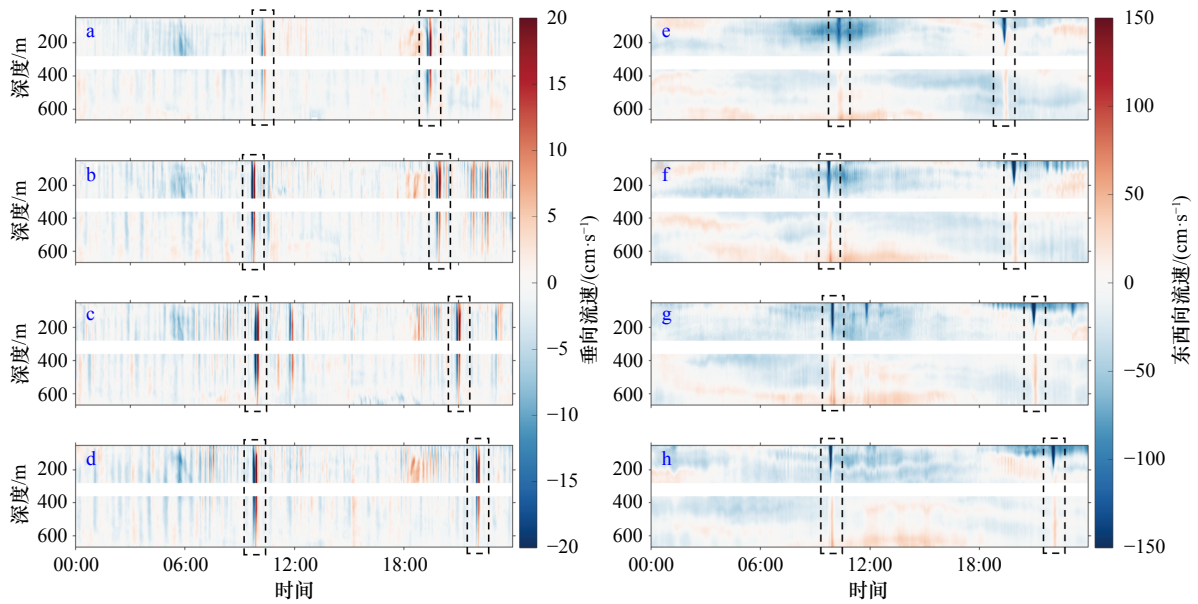


图5 S1 站位垂向流速在4月1日(a)、4月2日(b)、4月3日(c)、4月4日(d)的分布和东西向流速在4月1日(e)、4月2日(f)、4月3日(g)、4月4日(h)的分布(虚线框内标示了内孤立波)

Fig. 5 Vertical velocities of Station S1 on April 1 (a), April 2 (b), April 3 (c), and April 4 (d), and the east-west velocities on April 1 (e), April 2 (f), April 3 (g), and April 4 (h) (dashed boxes mark the presence of internal solitary waves)

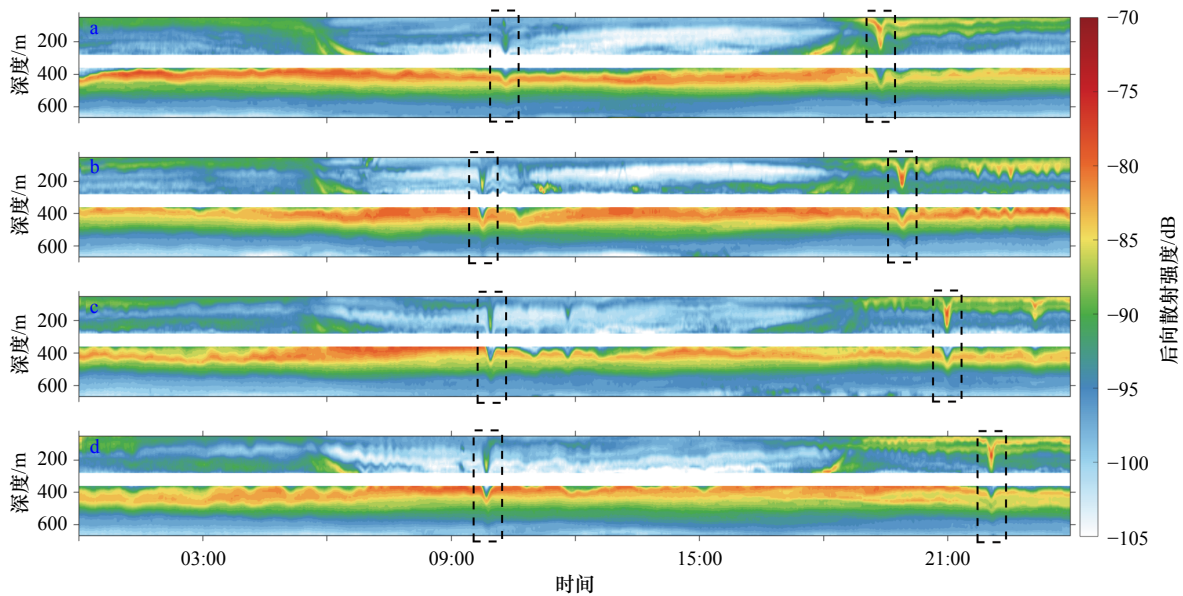


图6 S1 站位后向散射强度在4月1日(a)、4月2日(b)、4月3日(c)、4月4日(d)的分布(虚线框内标示了内孤立波)

Fig. 6 Distribution of MVBS at Station S1 on April 1 (a), April 2 (b), April 3 (c), and April 4 (d) (dashed boxes mark the presence of internal solitary waves)

相对日间较高,强声散射层出现在较浅的深度。为探究日间与夜间的内孤立波对声散射层在深度分布的不同影响,文中选取2022年4月4日日间(图7)和夜间(图8)的两次强度接近的内孤立波进行分析。4月4日日间的内孤立波最大垂向流速为31 cm/s(图7a),最大东西向流速为202 cm/s(图7b);夜间的内孤立波最大垂向流速为28 cm/s(图8a),最大东西向流速为

196 cm/s(图8b)。两者引起声散射层的起伏均为约150 m(图7c,图8c)。日间和夜间内孤立波引起的13℃等温线起伏均超过110 m。日间的内孤立波引起海洋上层(50~270 m)深度平均MVBS增强为8 dB(图7d),MVBS增强的最大深度位于210 m,最大变化幅度为16.8 dB(图9);夜间的内孤立波引起海洋上层深度平均MVBS增强为6 dB(图8d),MVBS增强的最大深

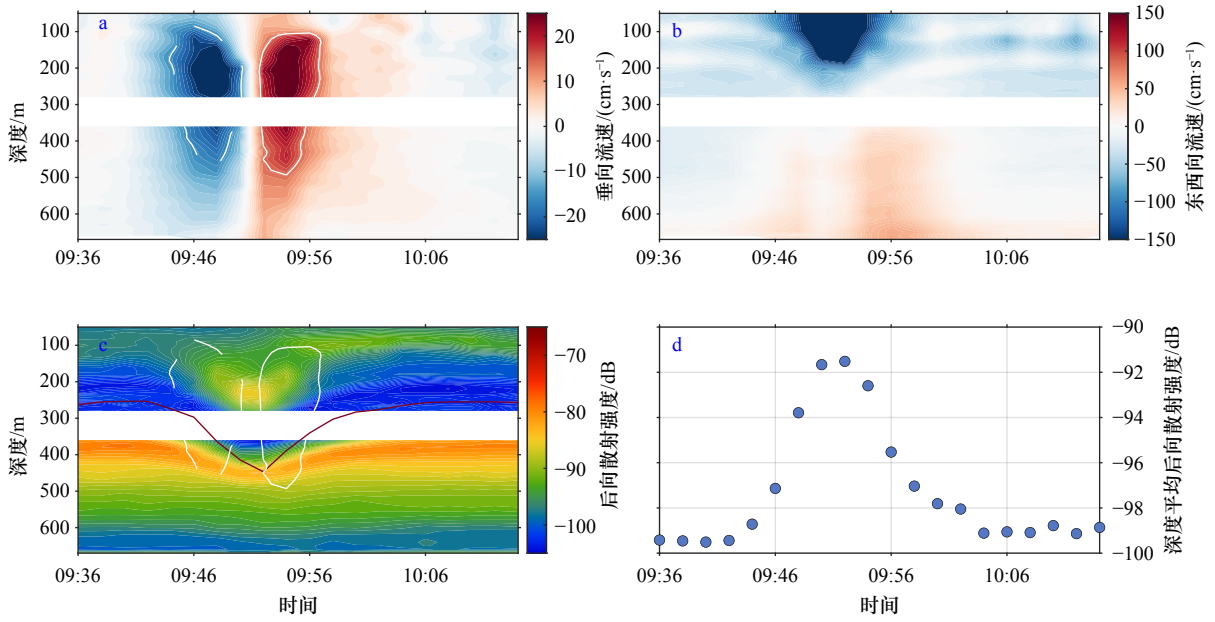


图7 S1 站点 4月4日 日间的内孤立波垂向流速(a), 东西向流速(b), 后向散射强度(c), 海洋上层(50~270 m)的深度平均后向散射强度(d)

Fig. 7 Internal solitary waves at Station S1 during daytime on April 4 vertical velocity (a), east-west velocity (b), MVBS (c), depth-averaged MVBS of the ocean's upper layer (50 m to 270 m) (d)

空白区域为两台 ADCP 的盲区, 棕色线表示 13°C 等温线, 白色实线(虚线)为垂向流速 15 cm/s(-15 cm/s)等值线  
Blank areas indicate the blank distance of the two ADCPs. The brown line represents the 13°C isotherm. The white solid line (dashed line) represents contour lines of vertical velocity at 15 cm/s (-15 cm/s)

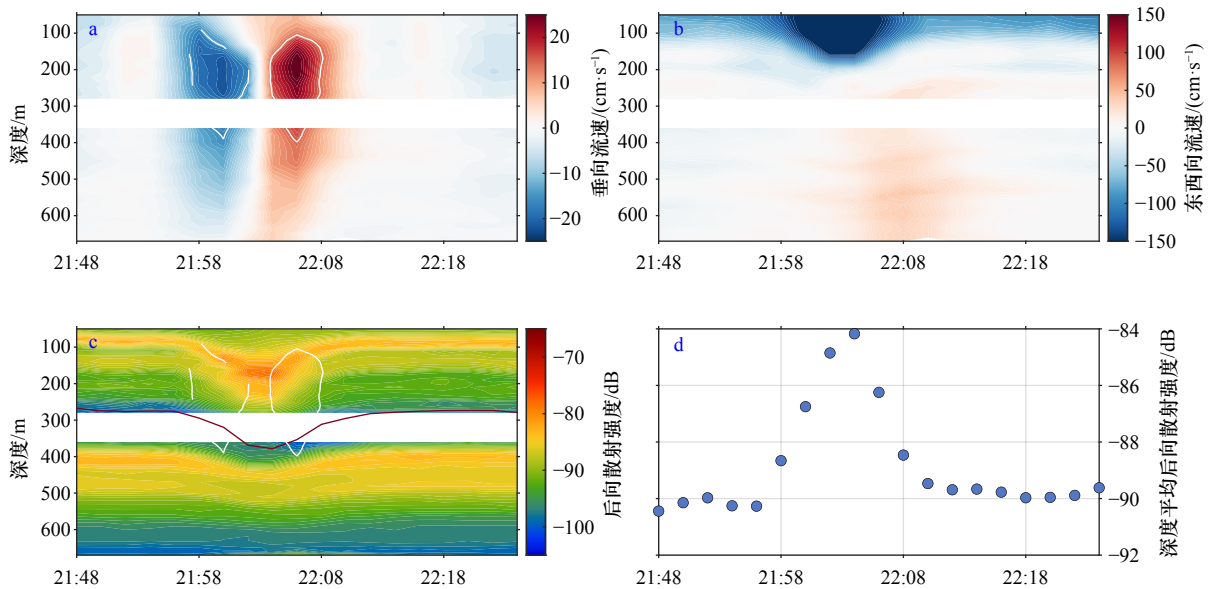


图8 S1 站点 4月4日 夜间的内孤立波垂向流速(a), 东西向流速(b), 后向散射强度(c), 海洋上层(50~270 m)的深度平均后向散射强度(d)

Fig. 8 Internal solitary waves at Station S1 during nighttime on April 4 vertical velocity (a), east-west velocity (b), MVBS (c), depth-averaged MVBS of the ocean's upper layer (50 m to 270 m) (d)

空白区域为两台 ADCP 的盲区, 棕色线表示 13°C 等温线, 白色实线(虚线)为垂向流速 15 cm/s(-15 cm/s)等值线  
Blank areas indicate the blank distance of the two ADCPs. The brown line represents the 13°C isotherm. The white solid line (dashed line) represents contour lines of vertical velocity at 15 cm/s (-15 cm/s)

度位于 170 m, 最大变化幅度为 14.3 dB(图 9)。由于主散射层的下移, 360~420 m 处 MVBS 明显降低(图 7c, 图 8c), 日间最大变化幅度为-18.7 dB, 夜间最大变化幅度为-11.4 dB。深层海水(450 m 以深)在内孤立波经过期间受影响较小, MVBS 变化幅度在 $\pm 3.5$  dB 以下(图 9)。

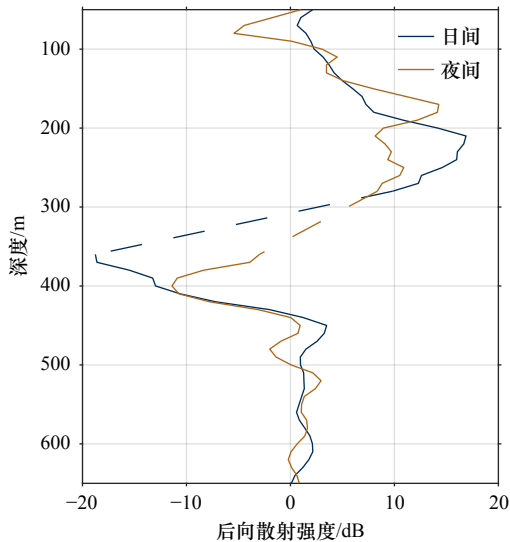


图 9 4月4日内孤立波期间后向散射强度变化幅度深度剖面  
Fig. 9 Depth profile of MVBS variation during internal solitary waves on April 4

蓝色为日间的内孤立波, 黄色为夜间的内孤立波,  
虚线部分为 ADCP 盲区  
Blue indicates daytime internal solitary waves and yellow indicates  
nighttime internal solitary waves. The dashed sections represent  
the blank distance of two ADCPs

## 4 讨论

先前研究中浮游动物昼夜垂直迁移的平均速度一般为 2~5 cm/s<sup>[20, 54, 56]</sup>, 最大速度则可达 10~15 cm/s<sup>[57-58]</sup>。本文中, 通过昼夜垂直迁移期间 ADCP 测得的垂向流速计算的平均上移(下移)速度为 4.7 cm/s (5.8 cm/s), 与新几内亚岛海域(4 cm/s)<sup>[59]</sup>, 拉扎列夫海(1.5~1.6 cm/s)<sup>[60]</sup>, 吕宋海峡(2.1~2.9 cm/s)<sup>[33]</sup>, 南海琼东南海域(3~4 cm/s)<sup>[39]</sup> 和安达曼海(3.8 cm/s)<sup>[61]</sup> 的结果相比较快。我们推测过去的研究可能低估了昼夜垂直迁移的实际速度, 主要由于它们大多使用低于 1 cph 的 ADCP 采样频率, 难以观测到最大昼夜垂直迁移速度<sup>[37]</sup>。

可能受到观测海域东侧地形的(20.5°N, 118°E 处, 图 1)影响, S1 站位内孤立波的数量(图 3a)明显比 S2 站位(图 3b)多, 因此本文主要对 S1 站位内孤立波的结果进行讨论。内孤立波经过时, 出现一对先向

下后向上的垂向流速(图 7a, 图 8a), 同时海洋上层深度平均 MVBS 呈现迅速增大后迅速减小的趋势, 垂直向下/向上的流速分别对应于上散射层的向下/向上移动和海洋上层深度平均 MVBS 的增加/减弱(图 7d, 图 8d)。夜间浮游生物返回海洋上层, 夜间上层 MVBS 显著高于日间, 在夜间强背景值 MVBS 的“掩盖”下, 夜间内孤立波引起的海洋上层声散射层变化弱于日间(图 7d, 图 8d)。内波被认为是浮游植物斑块分布的机制之一, 在内波的波峰以下和波谷以上聚集浮游植物<sup>[62-63]</sup>, 类似的效应也已经在浮游动物中得到证实<sup>[62, 64]</sup>, 在稳定层化的条件下形成的浮游动物聚集层可能会受到内波活动的影响发生几米至上百米的垂直位移<sup>[65-66]</sup>。夜间的 MVBS 增强(图 8c)最大的位置比日间的更浅(图 9), 150~200 m 处的 MVBS 增强主要由于原本位于 50~100 m 的上散射层的下移。主散射层的下移也造成 360~420 m 处 MVBS 明显降低(图 9)。值得一提的是, 4月4日日间的内孤立波造成 MVBS 增强最大值深度达到 200~250 m 处(图 7c, 图 9), 根据日间和夜间垂直流速的比较, 本文认为可能是日间的垂向流更强, 影响深度范围较大。在观测站位, 无论日间和夜间, 450 m 以深的深层海水受内孤立波影响较小, MVBS 没有明显的增强或减弱(图 9)。

为了便于讨论昼夜内孤立波与 MVBS 变化的关系, 在图 10 展示了昼夜内孤立波最大垂向流速与其导致的深度平均 MVBS 变化幅度的关系。值得注意的是, 日间的内孤立波经过时, 海洋上层(50~270 m)深度平均 MVBS 的变化幅度与最大垂向流速呈现出较强的线性相关性( $R^2 = 0.61$ ,  $p = 2.5 \times 10^{-12}$ )。然而, 夜

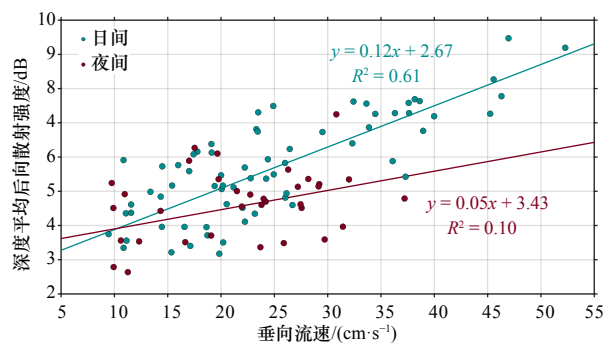


图 10 内孤立波导致的深度平均后向散射强度变化幅度与最大垂向流速的关系

Fig. 10 Relationship between the depth-averaged MVBS variation induced by internal solitary waves and the maximum vertical velocity

绿色点为日间出现的内孤立波, 红色点为夜间出现的内孤立波  
Green dots represent internal solitary waves occurring during the daytime,  
while red dots represent those occurring during the nighttime

间的内孤立波经过时, 海洋上层深度平均 MVBS 的变化幅度与最大垂向流速的线性相关性较弱 ( $R^2 = 0.10$ ,  $p = 0.12$ )。海洋上层深度平均 MVBS 在内孤立波经过期间的变化幅度平均为 5.2 dB, 其中夜间为 4.5 dB, 日间为 5.6 dB。夜间海洋上层较大的 MVBS 背景值限制了 MVBS 的增强的幅度, 图 10 中夜间内孤立波(红色点)大多分布在日间内孤立波(绿色点)下方, 表明在最大垂向流速相同的情况下, 日间的内孤立波造成的海洋上层 MVBS 变化幅度往往大于夜间的内孤立波。日间的内孤立波通常为 a 波, 每日出现时间接近, 夜间的内孤立波通常为 b 波, 出现时间每日延后约 1 h, 而夜间不同时间段的海洋上层 MVBS 背景值存在差异, 也可能解释了为何夜间的深度平均 MVBS 变化幅度与内孤立波的最大垂向流速相关性较弱。

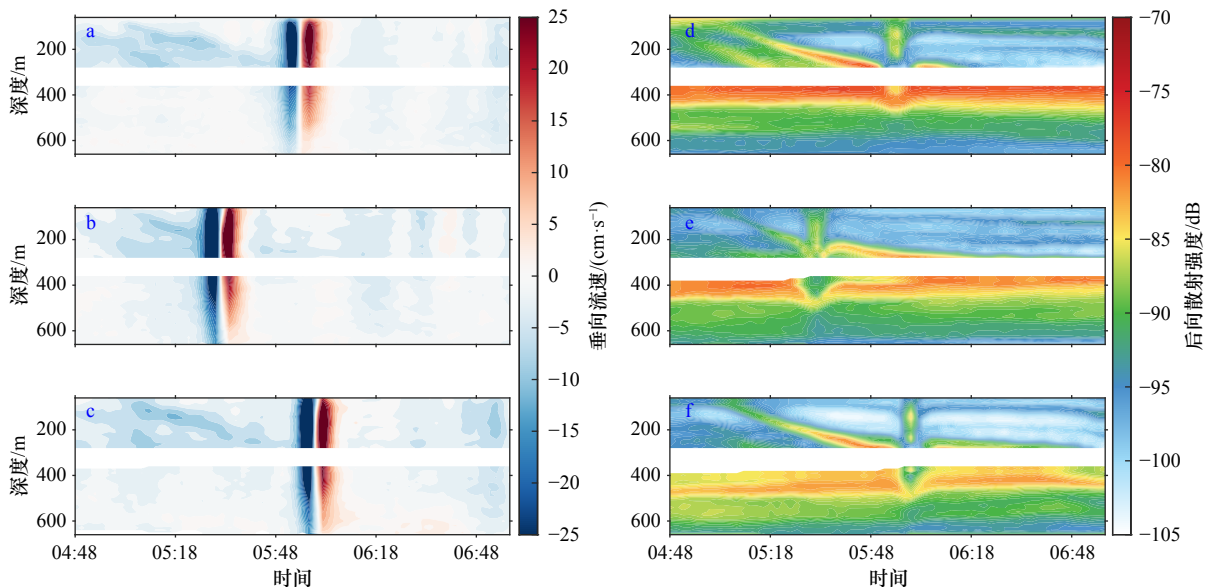


图 11 S1 站位 6 月 15 日至 6 月 17 日昼夜垂直迁移期间的垂向流速(a. 6 月 15 日, b. 6 月 16 日, c. 6 月 17 日)和后向散射强度(d. 6 月 15 日, e. 6 月 16 日, f. 6 月 17 日)

Fig. 11 Vertical velocities from June 15 to June 17 (a. June 15, b. June 16, c. June 17) and MVBS (d. June 15, e. June 16, f. June 17) during the DVM period at Station S1

## 5 结论

基于南海北部 2 个站位的 ADCP 回声数据推算的后向散射强度, 本文得到的主要结论如下:

(1) 声散射层在深度的分布上主要表现为“昼沉夜浮”, 日出前约 1 h 至日出期间向下移动, 日落至日落约 1 h 期间向上移动, 平均迁移速度为 4.7 cm/s (上移) 和 5.8 cm/s (下移)。观测海域的最强的深海散射层分布于中层 350~500 m, 夜间生物聚集于海洋上层, 在 50~130 m 的上散射层也相对较强。浮游生物

为探究内孤立波对昼夜垂直迁移的影响, 图 11 展示了 6 月 15 日至 6 月 17 日的黎明(均有内孤立波经过)昼夜垂直迁移期间的垂向流速和后向散射强度分布。声散射层在内孤立波经过前以约 8 cm/s 的速度下沉, 而内孤立波引起垂向流速超过 25 cm/s 的强流(图 11a-c), 大大超过了浮游动物昼夜垂直迁移期间垂向运动的速度, 干扰浮游动物的垂直迁移: 由于内孤立波波前的下沉流, 浮游动物聚集的声散射层快速下沉, 而波后的上升流又使其大致返回内波经过前的深度, 浮游动物受到干扰后可以继续迁移(图 11e)。尽管内孤立波持续的时间较短, 对于捕食者和被捕食者之间的相互作用可能没有决定性的影响, 但如果昼夜垂直迁移延误或提前也可能对参与迁移的浮游动物造成不利影响, 而对游泳速度较快的捕食者可能有利<sup>[67-68]</sup>。

夜间和日间生物聚居层的分界面深度在 300~360 m 之间。

(2) 当内孤立波经过时, 后向散射强度与垂直流速的变化是同步的, 声散射层深度起伏可达几十至上百米。垂直向下和向上的流速分别对应于海洋上层深度平均后向散射强度的增加和减弱。此外, 昼夜垂直迁移期间的内孤立波可能在一定程度上干扰浮游动物的迁移。

(3) 日间的 a 型内孤立波经过潜标时, 深度平均后向散射强度的变化幅度与最大垂向流速呈现出较

强的线性相关性;夜间的 b 型内孤立波最大垂向流速与深度平均后向散射强度的变化幅度相关性较弱。在两种类型内孤立波引起的垂向流速相当时,日间的深度平均后向散射强度变化幅度往往大于夜间。

#### 参考文献:

- [1] Tont S A. Deep scattering layers: patterns in the Pacific[J]. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations, 1976, 18: 112–117.
- [2] Steinberg D K, Carlson C A, Bates N R, et al. Zooplankton vertical migration and the active transport of dissolved organic and inorganic carbon in the Sargasso Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2000, 47(1): 137–158.
- [3] Al-Mutairi H, Landry M R. Active export of carbon and nitrogen at Station ALOHA by diel migrant zooplankton[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2001, 48(8/9): 2083–2103.
- [4] Hays G C. A review of the adaptive significance and ecosystem consequences of zooplankton diel vertical migrations[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 503(1): 163–170.
- [5] Ianson D, Jackson G A, Angel M V, et al. Effect of net avoidance on estimates of diel vertical migration[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(6): 2297–2303.
- [6] Huntley M E, Zhou Meng. Influence of animals on turbulence in the sea[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, 273: 65–79.
- [7] Dewar W K, Bingham R J, Iverson R L, et al. Does the marine biosphere mix the ocean?[J]. *Journal of Marine Research*, 2006, 64(4): 541–561.
- [8] Katija K. Biogenic inputs to ocean mixing[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2012, 215(6): 1040–1049.
- [9] Dean C W. Biophysical interactions in the straits of Florida: turbulent mixing due to diel vertical migrations of zooplankton[D]. Fort Lauderdale: Nova Southeastern University, 2014.
- [10] Lü Liangang, Liu Jianjun, Yu Fei, et al. Vertical migration of sound scatterers in the southern Yellow Sea in summer[J]. *Ocean Science Journal*, 2007, 42(1): 1–8.
- [11] 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 Zhao, Lü Liangang, Yang Guangbing, 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.
- [12] 王雨微, 黄二辉, 许德伟. 海洋生物声散射层研究现状综述 [J]. *海洋开发与管理*, 2021, 38(9): 43–48.  
Wang Yuwei, Huang Erhui, Xu Dewei. International research advances in marine biological acoustic scattering layer[J]. *Ocean Development and Management*, 2021, 38(9): 43–48.
- [13] Postel L, da Silva A J, Mohrholz V, et al. Zooplankton biomass variability off Angola and Namibia investigated by a lowered ADCP and net sampling[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 68(1/2): 143–166.
- [14] Kaartvedt S, Staby A, Aksnes D L. Efficient trawl avoidance by mesopelagic fishes causes large underestimation of their biomass[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, 456: 1–6.
- [15] Davison P, Lara-Lopez A, Koslow J A. Mesopelagic fish biomass in the southern California current ecosystem[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 112: 129–142.
- [16] Zhou Meng, Dorland R D. Aggregation and vertical migration behavior of *Euphausiasuperba*[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, 51(17/19): 2119–2137.
- [17] Radenac M H, Plimpton P E, Lebourges-Dhaussy A, et al. Impact of environmental forcing on the acoustic backscattering strength in the equatorial Pacific: diurnal, lunar, intraseasonal, and interannual variability[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2010, 57(10): 1314–1328.
- [18] Menkès C E, Allain V, Rodier M, et al. Seasonal oceanography from physics to micronekton in the South-West Pacific[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 113: 125–144.
- [19] Smeti H, Pagano M, Menkes C, et al. Spatial and temporal variability of zooplankton off New Caledonia (southwestern Pacific) from acoustics and net measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(4): 2676–2700.
- [20] Jiang Songnian, 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.
- [21] Haney J F. Diel patterns of zooplankton behavior[J]. *Bulletin of Marine Science*, 1988, 43(3): 583–603.
- [22] 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.
- [23] Cohen J H, Forward Jr R B. Spectral sensitivity of vertically migrating marine copepods[J]. *The Biological Bulletin*, 2002, 203(3): 307–314.
- [24] Zhou Meng, Huntley M E. The principle of biological attraction, demonstrated by the bio-continuum theory of zooplankton patch dynamics[J]. *Journal of Marine Research*, 1996, 54(5): 1017–1037.
- [25] Lü Liangang, Wang Xiao, Wang Huiwu, et al. The variations of zooplankton biomass and their migration associated with the Yellow Sea Warm Current[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 64: 10–19.
- [26] Wang Zhankun, DiMarco S F, Ingle S, et al. Seasonal and annual variability of vertically migrating scattering layers in the northern Ara-

- bian Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2014, 90: 152–165.
- [27] 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(2): 1031–1050.
- [28] Sandstrom H, Elliot J A, Cchrane N A. Observing groups of solitary internal waves and turbulence with BATFISH and echo-sounder[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1989, 19(7): 987–997.
- [29] Hebert D, Moum J N, Paulson C A, et al. Turbulence and internal waves at the equator. Part II: details of a single event[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1992, 22(11): 1346–1356.
- [30] Wallace B C, Wilkinson D L. Run-up of internal waves on a gentle slope in a two-layered system[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1988, 191: 419–442.
- [31] Sangrá P, Basterretxea G, Pelegrí J L, et al. Chlorophyll increase due to internal waves on the shelf break of Gran Canaria (Canary Islands)[J]. *Scientia Marina*, 2001, 65(S1): 89–97.
- [32] Greer A T, Cowen R K, Guigand C M, et al. The role of internal waves in larval fish interactions with potential predators and prey[J]. *Progress in Oceanography*, 2014, 127: 47–61.
- [33] Yang Chenghao, Liao Guanghong, Yuan Yaochu, et al. The diel vertical migration of sound scatterers observed by an acoustic Doppler current profiler in the Luzon Strait from July 2009 to April 2011[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(11): 1–9.
- [34] 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 Shigang, Tang Yong, Chen Guobao, 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.
- [35] 王东旭. 南海中部深海散射层声学特性及时空分布研究 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2017.  
Wang Dongxu. Acoustic characteristics and Spatio-temporal distribution of deep scattering layer in the central South China Sea[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2017.
- [36] 陈钊. 南海声散射层和涡旋对其影响的研究 [D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2016.  
Chen Zhao. Study on the sound scattering layer in the South China Sea and the influence of eddies[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2016.
- [37] 李琦, 陈朝晖. 基于 ADCP 回声的黑潮-亲潮混合区浮游动物昼夜垂直迁移研究 [J]. *海洋与湖沼*, 2022, 53(2): 305–319.  
Li Qi, Chen Zhaohui. Diel vertical migration of zooplankton in the Kuroshio-Oyashio mixed zone based on ADCP echo[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2022, 53(2): 305–319.
- [38] Wang Bei, Yu Fei, Wang Ran, et al. Intraseasonal variability of the deep scattering layer induced by mesoscale eddy[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: 1367410.
- [39] Yang Chenghao, Xu Dongfeng, Chen Zuozhi, et al. Diel vertical migration of zooplankton and micronekton on the northern slope of the South China Sea observed by a moored ADCP[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2019, 167: 93–104.
- [40] 刘明东, 杨光兵, 熊学军, 等. 天文大潮对南海北部浮游动物生物量的影响 [J]. *海洋科学进展*, 2023, 41(1): 123–134.  
Liu Mingdong, Yang Guangbing, Xiong Xuejun, et al. Effect of astronomical tide on the zooplankton biomass in the northern South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2023, 41(1): 123–134.
- [41] Cai Shuqun, Xie Jieshuo, He Jianling. An overview of internal solitary waves in the South China Sea[J]. *Surveys in Geophysics*, 2012, 33(5): 927–943.
- [42] Tian Jiwei, Zhou Lei, Zhang Xiaoqian. Latitudinal distribution of mixing rate caused by the  $M_2$  internal tide[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2006, 36(1): 35–42.
- [43] Liu A K, Chang Y S, Hsu M K, et al. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C4): 7995–8008.
- [44] 蔡树群, 何建玲, 谢皆烁. 近 10 年来南海孤立内波的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(7): 703–710.  
Cai Shuqun, He Jianling, Xie Jieshuo. Recent decadal progress of the study on internal solitons in the South China Sea[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(7): 703–710.
- [45] Holligan P M, Pingree R D, Mardell G T. Oceanic solitons, nutrient pulses and phytoplankton growth[J]. *Nature*, 1985, 314(6009): 348–350.
- [46] Pan Xiaojun, Wong G T F, Shiah F K, et al. Enhancement of biological productivity by internal waves: observations in the summertime in the northern South China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 2012, 68(3): 427–437.
- [47] Guan Zhenyu, Ge Ruping, Li Yunxia, et al. Diel variation of phytoplankton communities in the northern South China Sea under the effect of internal solitary waves and its response to environmental factors[J]. *Water*, 2023, 15(13): 2422.
- [48] Lennert-Cody C E, Franks P J S. Plankton patchiness in high-frequency internal waves[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 186: 59–66.
- [49] Ramp S R, Tang T Y, Duda T F, et al. Internal solitons in the northeastern South China Sea. Part I: Sources and deep water propagation[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(4): 1157–1181.
- [50] 黄晓冬. 南海内孤立波的空间分布与时间变化特征研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.  
Huang Xiaodong. Study on the spatial distributions and temporal variations of internal solitary waves in the South China Sea[D]. Qing-

- dao: Ocean University of China, 2013.
- [51] Gordon R L. Acoustic Doppler current profiler Principles of operation: a practical primer[M]. San Diego, California USA by RD Instruments, January 8, 1996, 7.
- [52] Deines K L. Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers[C]//Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurement (Cat. No. 99CH36331). San Diego, CA, USA: IEEE, 1999: 249–253.
- [53] Mullison J. Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers-updated[C]//Proceedings of the ASCE Hydraulic Measurements & Experimental Methods Conference. Durham, NH, USA, 2017: 9–12.
- [54] Potiris E, Frangoulis C, Kalampokis A, et al. Acoustic Doppler current profiler observations of migration patterns of zooplankton in the Cretan Sea[J]. *Ocean Science*, 2018, 14(4): 783–800.
- [55] 袁叔尧, 邓九仔. 南海北部内孤立波数学模型 [J]. *热带海洋*, 1999, 18(3): 16–23.  
Yuan Shuyao, Deng Jiuzi. Mathematical model of internal solitary waves in northern South China Sea[J]. *Tropic Oceanology*, 1999, 18(3): 16–23.
- [56] 徐亚军, 赵亮, 原野. 基于声学仪器与粒径分析仪研究东海浮游动物昼夜垂直迁移过程 [J]. *海洋学报*, 2016, 38(8): 123–130.  
Xu Yajun, Zhao Liang, Yuan Ye. The diel vertical migration of zooplankton observed by an acoustic Doppler current profiler and particle size analyzer in the East China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(8): 123–130.
- [57] Luo Jiangang, Ortner P B, Forcucci D, et al. Diel vertical migration of zooplankton and mesopelagic fish in the Arabian Sea[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2000, 47(7/8): 1451–1473.
- [58] Ariza A, Landeira J M, Escánez A, et al. Vertical distribution, composition and migratory patterns of acoustic scattering layers in the Canary Islands[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 157: 82–91.
- [59] Kaneko A, Zhu Xiaohua, Radenac M H. Diurnal variability and its quantification of subsurface sound scatterers in the western equatorial Pacific[J]. *Journal of Oceanography*, 1996, 52(5): 655–674.
- [60] 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.
- [61] Liu Yanliang, Guo Jingsong, Xue Yuhuan, et al. Seasonal variation in diel vertical migration of zooplankton and micronekton in the Andaman Sea observed by a moored ADCP[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2022, 179: 103663.
- [62] Haury L R, Briscoe M G, Orr M H. Tidally generated internal wave packets in Massachusetts Bay[J]. *Nature*, 1979, 278(5702): 312–317.
- [63] Lennert-Cody C E, Franks P J S. Fluorescence patches in high-frequency internal waves[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 235: 29–42.
- [64] Haury L R, Wiebe P H, Orr M H, et al. Tidally generated high-frequency internal wave packets and their effects on plankton in Massachusetts Bay[J]. *Journal of Marine Research*, 1983, 41(1): 65–112.
- [65] Hsu M K, Liu A K. Nonlinear internal waves in the South China Sea[C]//Proceedings of the Ninth (1999) International Offshore and Polar Engineering Conference. Brest, France: ISOPE, 1999: ISOPE-I-99-253.
- [66] Cheriton O M, McManus M A, Stacey M T, et al. Physical and biological controls on the maintenance and dissipation of a thin phytoplankton layer[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 378: 55–69.
- [67] Haney J C. Ocean internal waves as sources of small-scale patchiness in seabird distribution on the Blake Plateau[J]. *The Auk*, 1987, 104(1): 129–133.
- [68] Silber G K, Smultea M A. Harbor porpoises utilize tidally-induced internal waves[J]. *Bulletin Southern California Academy of Sciences*, 1990, 89(3): 139–142.

## Study on the vertical migration characteristics of the acoustic scattering layer under the influence of internal waves in the northern South China Sea

Bi Weichuan<sup>1</sup>, Liang Chujin<sup>1,2,3</sup>, Lin Feilong<sup>1</sup>, Cui Zijian<sup>3</sup>, Tang Junhui<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 2. School of Ocean Science, Nanjing University of Information and Technology, Nanjing 210044, China; 3. School of Ocean Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Based on the Acoustic Doppler Current Profiler carried by deep-sea moorings, we investigated the diel vertical migration of the acoustic scattering layer and the impact of internal solitary waves on it in the northern South China Sea. The observational results reveal that the acoustic scattering layer, influenced by zooplankton, ascends to shallower depth within approximately an hour after sunset, remains there throughout the night, then migrates to the deeper depth within about an hour before sunrise. The average migration velocities are 4.7 cm/s (upward) and 5.8 cm/s (downward). Additionally, internal solitary waves observed in the region induce a pair of downward and upward currents, with maximum vertical velocities exceeding 50 cm/s, leading to fluctuations of tens to hundreds of meters in the acoustic scattering layer. The acoustic backscattering strength of the ocean's upper layer reaches its maximum value at the troughs of internal solitary waves. Further research indicates that the daytime internal solitary waves exhibit a stronger correlation between the vertical velocity and the depth-averaged backscattering strength variation compared to the nighttime internal solitary waves. When the vertical velocities induced by both types of waves are equal, the depth-averaged backscattering strength variations during the day are typically greater than those at night.

**Key words:** Acoustic Doppler Current Profiler; internal solitary waves; acoustic scattering layer; diel vertical migration; South China Sea