

DOI: 10.12264/JFSC2022-0450

基于双频识别声纳(DIDSON)的辽东湾近海沙海蜇监测的应用研究

王彬, 刘修泽, 王小林, 吉光, 董婧

辽宁省海洋水产科学研究院, 辽宁省海洋生物资源与生态学重点实验室, 大连市渔业资源养护重点实验室, 辽宁大连 116023

摘要: 为了解双频识别声纳(DIDSON)在近海海域大型水母沙海蜇(*Nemopilema nomurai*)监测中的效果, 本研究于 2017 年 7 月、8 月通过 DIDSON 的走航观测对辽东湾近海伞径 16~81 cm (7 月份平均伞径 33.01 cm $\pm$ 13.17 cm, 8 月份平均伞径 57.03 cm $\pm$ 13.44 cm)的大型水母沙海蜇开展丰度和垂直分布的监测调查, 并同步结合传统网具调查, 以验证和比对 DIDSON 观测在大型水母沙海蜇监测中的效果。调查结果显示: DIDSON 观测影像可直观显示沙海蜇的数量及其在水层中的位置。7 月份 3 个调查断面声纳观测的沙海蜇丰度分别是 6.13 ind/1000 m³、6.71 ind/1000 m³、7.93 ind/1000 m³, 平均丰度为(6.92 $\pm$ 0.75) ind/1000 m³。8 月份 3 个调查断面声纳观测的沙海蜇丰度分别是 1.41 ind/1000 m³、1.23 ind/1000 m³、0.55 ind/1000 m³, 平均丰度为(1.07 $\pm$ 0.37) ind/1000 m³。比对锚流网调查沙海蜇的丰度, 7 月份和 8 月份 DIDSON 监测的沙海蜇平均丰度分别是网具调查的 4.89 倍和 3.95 倍。声纳观测影像显示沙海蜇主要栖息在调查海域中上层水域(1.1~10 m), 底层水域沙海蜇出现的少。比起传统的网具调查, DIDSON 更加精准的监测调查到调查海区沙海蜇的丰度, 并观测到沙海蜇的垂直分布, 证明双频识别声纳可以适用于浅海大型水母沙海蜇的监测调查工作。研究结果表明, DIDSON 观测可以扩展大型水母沙海蜇监测的内容, 在对其行为学的观测上具有较大的优势。通过延长 DIDSON 走航式观测时间, 扩大 DIDSON 探测范围, 并结合传统网具, 可以更加精准的开展沙海蜇数量的监测。

关键词: 双频识别声纳; 辽东湾; 沙海蜇; 丰度; 分布

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)08-1223-13

20 世纪末以来, 全球多海域大型水母暴发对海洋生态系统、滨海人类活动造成了严重危害^[1-2]。东亚水域则是大型水母暴发的重灾区之一。中、日、韩科学家连续十多年对东亚水域开展了大型水母暴发机理、监测预警及灾害防治等多方面开展了系统的调查研究^[3-5]。辽东湾位于渤海, 是我国北方最重要的渔场之一, 近十多年来, 大型水母暴发在辽东湾连年发生, 对渔业资源和海洋生态系统造成了危害^[6]。在自然海域中开展大型水母监测调查对掌握其生态习性、开展水母灾害预

警防治具有非常重要的意义和价值。

国内外学者通过网具、目视调查、水下摄像机、声学技术和航空影像等技术对大型水母展开了监测调查^[7]。关于声学技术在大型水母监测调查应用方面, 近十多年来, 国际上多种科学鱼探仪^[8-12]、信标^[13]等多种声学技术逐渐用于大型水母监测调查和行为规律研究中, 展现出了良好的观测效果和应用前景^[14]。随着声学技术的发展, 高分辨率的双频识别声纳(dual-frequency identification sonar, DIDSON)在国际上的渔业管理上已经得到了良好

收稿日期: 2022-03-04; **修订日期:** 2022-03-14.

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(2019-ZD-0387; 2019-MS-180); 国家重点研究发展计划项目(2017YFC1404400); 国家环境保护近岸海域生态环境重点实验室基金专项(201804); 辽宁省兴辽英才项目(XLYC2007068); 国家自然科学基金项目(41906138, 31770458).

作者简介: 王彬(1981-), 男, 研究员, 主要从事大型水母自然生态学研究与渔业资源增殖放流效果评估. E-mail: wb81321@sina.com; 共同第一作者: 刘修泽(1981-), 男, 研究员, 主要从事渔业资源生态学研究。

通信作者: 董婧, 女, 研究员, 主要从事渔业资源与大型水母生态学研究. E-mail: 1024470248@qq.com

的应用,在鱼类行为学监测^[15-16],鱼群数量评估^[17-18]等方面展现出优越的监测效果。DIDSON 其最大的优点在于即使在浑浊、黑暗的水体中也能产生清晰的声学影像,又称为声学摄像机^[19],Tiffan 等^[20]采用 DIDSON 观察到哥伦比亚河大麻哈鱼(*Oncorhynchus tshawytscha*)挖洞产卵的情形;太平洋鲑鱼委员会利用 DIDSON 观察了加拿大 Fraser 河上游和下游鲑鱼的洄游情况^[21];Rakowitz 等^[15]利用 DIDSON 定量观察了捷克 Zelivka 水库内鱼类对拖网的回避行为特征,发现 DIDSON 可以清晰的识别对拖网表现出明显回避反应的鱼和对拖网没有表现出明显回避反应的鱼,可以良好的应用于鱼类的行为学研究。Magowan 等^[16]通过 DIDSON 监测了美国马萨诸塞州沿海小河流中成年河鲱(*Alosa pseudoharengus* 及 *Alosa aestivalis*)的数量和洄游方式,利用每天 24 h 记录的图像,根据 DIDSON 影像中鱼类大小、形状和行为的不同,人工计数和识别不同的鱼类。DIDSON 被证明是一种有效的声纳类型,利用它可以连续监测和计数沿海小河中的河鲱鱼。Budnik 等^[22]在北美伊利湖支流的河口附近使用 DIDSON 监测了增殖放流的虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)幼鱼的迁移模式,测量了放流虹鳟的体长,并估算了在放流后的前 7~8 周到达河口时的存活率。在 DIDSON 进行大型水母监测方面,Han 等^[23]和 Makabe 等^[24]曾利用该仪器成功的对近岸盐湖水域暴发的海月水母(*Aurelia* sp.1)进行了监测调查,Honda 等^[25]曾经用 DIDSON 观察了日本海近岸游动的沙海蜇,Lee 等^[26]曾经用 DIDSON 研究了黄海海域沙海蜇的游动速度和伞径的关系。

DIDSON 监测也存在一些弱点:第一是 DIDSON 有最小探测目标的尺寸限制,为了确保探测目标被准确的检测到,一些应用中设置了 4~5 cm 的目标检测阈值^[24, 27-28];第二是探测距离的限制(1.8 MHz 探测频率的最大探测距离 15 m;1.1 MHz 探测频率的最大探测距离 40 m),适合于探测水深较浅的水域;第三个是 DIDSON 具有表面 1 m 左右的探测盲区,使水面表层的探测目标无法被探测到^[24, 29-30]。近十多年来,国内开始将 DIDSON 应用于不同水域的鱼类资源调查与行

为观测。周家飞等^[29]对葛洲坝下游的近坝区域的水域进行了 DIDSON 走航观测和昼夜定点观测,调查了该区域的鱼类资源密度,并分析了鱼类的昼夜垂直分布行为。莫伟均等^[30]利用 DIDSON 对贵州北盘江光照与董箐库区的鱼类进行了水声学调查,监测了鱼类的密度和垂直分布。Zhang 等^[31]通过 DIDSON 对雅砻江中部两河口水电站大坝下游鱼类的洄游规律进行了观测,并进行了自动计数和测量了体长,验证了在 DIDSON 测量水电站下游鱼类洄游行为方面的巨大潜力,这将有助于中国鱼类通道研究和鱼类资源保护。关于声学技术在我国渔业的应用方面,目前我国学者已经先后将声学技术多次应用于海洋重要经济鱼类^[32-34]、淡水鱼类^[29-31, 35]、南极磷虾(*Euphausia superba*)^[36]、头足类^[37-38]等渔业资源的定量评估中,并均取得了良好的应用效果,国内近几年开始了声学技术在大型水母监测调查应用方面的研究^[14, 39-41],尚未发现通过 DIDSON 对我国近海大型水母的观测报道。在本研究中,我们在国内首次尝试采用 DIDSON 开展辽东湾大型水母沙海蜇丰度和分布的监测调查,验证 DIDSON 在我国近海大型水母监测调查中的效果。

1 材料与方法

1.1 研究区域及采样方法

2017 年 7 月 18 日和 2017 年 8 月 18 日,根据前期调查选择沙海蜇出现数量较多的辽东湾营口近海作为监测海域,随机选择 3 个区域,租用辽营渔 15228 号渔船(功率 88.2 kW),按照辽宁省地方标准《沙蜇监测调查技术规程》(DB21/T 2823-2017)^[42]开展传统网具的沙海蜇监测,调查网具为沙海蜇网(50 m×8 m,网目 10 cm),该网具为锚流网,利用海流将沙海蜇兜在网中进行捕获。同时,待调查网具下网结束,在与调查网具相距 50 m 左右沿着下网方向设置 DIDSON 观测断面,调查断面位于沙海蜇进入网口的一侧(图 1),每个断面观测时间 30 min。网具下网的同时,利用 ALEC 公司生产的直读式电磁流速流向仪(AEM213-D)测量下网期间海流的平均流速,1 h 后起网计数捕获的沙海蜇数量。

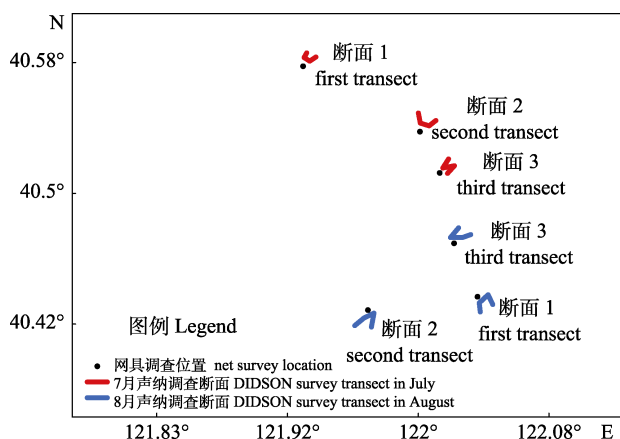


图 1 2017 年辽东湾水域沙海蜇声纳观测断面

Fig.1 The transects of giant jellyfish *Nemopilema nomurai* medusae by DIDSON monitoring in Liaodong Bay, 2017

1.2 数据采集

由于调查区域的最大水深为 14 m, 故双频识别声纳(Aris1800)采用的操作频率为 1.8 MHz (该频率最大探测距离为 15 m, 在小于 15 m 水深的范围内有效观测深度即为水深), 其模式波束水平宽度 0.3° , 垂直宽度 14° , 视野角 29° , 波束数量 96 帧。采用自制的支架将 DIDSON 主机固定在船舷, 调整角度使主机(传感器)下沉至水面以下 0.3 m 处并保持探头垂直于水面, 探头前有 0.7 m 的探测盲区, 水深 1 m 以内为探测盲区(图 2)。调查船待调查网具下网后, 沿着设计断面以 0.7~

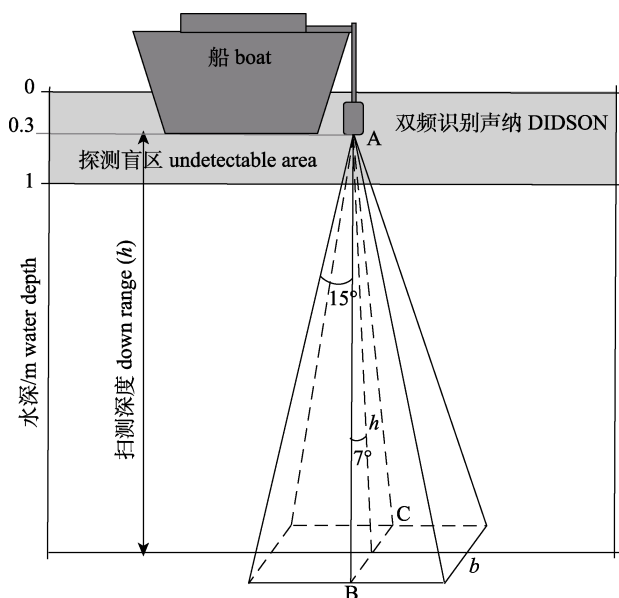


图 2 双频识别声纳观测示意图

Fig.2 Schematic representation of the pyramid-shaped DIDSON view field

0.9 m/s (2.5~3.5 km/h)速度前行, 3 个断面的 DIDSON 观测数据采集时间均为 30 min。采用人工计数的方式记录 DIDSON 观测视频中沙海蜇出现的数量、分布水层及其对应的时间。以 1 min 为时间单元统计观测视频中出现的沙海蜇数量, 并计算其丰度。

1.3 数据处理

沙海蜇丰度计算以观测或者捕获到的沙海蜇数量除以扫海体积来进行计算。DIDSON 观测不同水层的沙海蜇丰度通过不同水层对应沙海蜇数量除以不同水层的扫测体积进行计算, 具体公式如下:

双频识别声纳(DIDSON)扫测体积, 以 DIDSON 走航时扫过的面积乘以航线长度计算, 本研究 DIDSON 扫测体积的公式参考莫伟均等^[30]在北盘江董箐与光照库区鱼类资源水声学调查的方法计算, 将 DIDSON 扫测形成一帧画面所探测的水体近似看做四面体(图 2):

声纳扫测体积通过下列公式计算:

$$V_{\text{DIDSON}} = S_{\text{ABC}}vt \quad (1)$$

$$S_{\text{ABC}} = 0.5bh \quad (2)$$

$$b = 2h \tan 7^\circ \quad (3)$$

式中, V_{DIDSON} 为声纳探测水体体积(m^3); S_{ABC} 为垂直走航方向的四面体中心垂面面积(m^2); v 为声纳探测走航时的船速(m/s); t 为声纳扫测时间(s); b 为声纳探测最远端截面的宽度(m); h 为声纳扫测水体成像最远距离, 即为声纳扫测实际有效深度(m)。

网具扫测体积通过下列公式计算:

$$V_{\text{net}} = LHv_hT \quad (4)$$

式(4)中: V_{net} 为锚流网调查的扫测体积(m^3); L 为锚流网在海中张开的宽度(m), 本研究中按照实际下网宽度 50 m 计算; H 为锚流网在海中的高度(m), 本研究中按照锚流网在海流的冲击下在海中的实际张开高度 3 m 计算; v_h 为通过锚流网的海流速度(m/s), 通过实地测量本研究中海流平均流速为 0.265 m/s; T 为锚流网调查时间(s)。

DIDSON 或者网具监测沙海蜇丰度通过下列公式计算:

$$\rho = 1000n/V \quad (5)$$

式(5)中: ρ 为沙海蜇丰度($\text{ind}/1000 \text{ m}^3$); n 为声纳探测或者网具捕获的沙海蜇数量(ind); V 为声纳或

者网具的扫测体积(m^3)。

2 结果与分析

2.1 观测图像

图 3 为截取的 6 幅 DIDSON 观测视频图像。如图所示, DIDSON 观测图像较为清晰的显示沙海蜇在视野内的数量及其对应的水深。同时, 沙海蜇游动时的角度和体位状态也能被 DIDSON 探头捕捉到, 且由于观测图像为连续的视频数据, 沙海蜇游动穿越 DIDSON 探测范围时的行为特征

可直观的被观测到。

2.2 沙海蜇的平面分布

7 月份, DIDSON 观测到的 30 min 内 3 条调查断面沙海蜇丰度的变化趋势不尽相同。从东向西走航开始, 断面 1 和断面 2 沙海蜇的丰度在不断降低, 断面 3 沙海蜇的丰度在不断增加(图 4)。8 月份, DIDSON 观测到的 30 min 内 3 条调查断面沙海蜇丰度总体较低, 且较为平均, 断面 1 和断面 2 沙海蜇的丰度相对高于断面 3, 断面 3 很多位置未发现沙海蜇(图 5)。

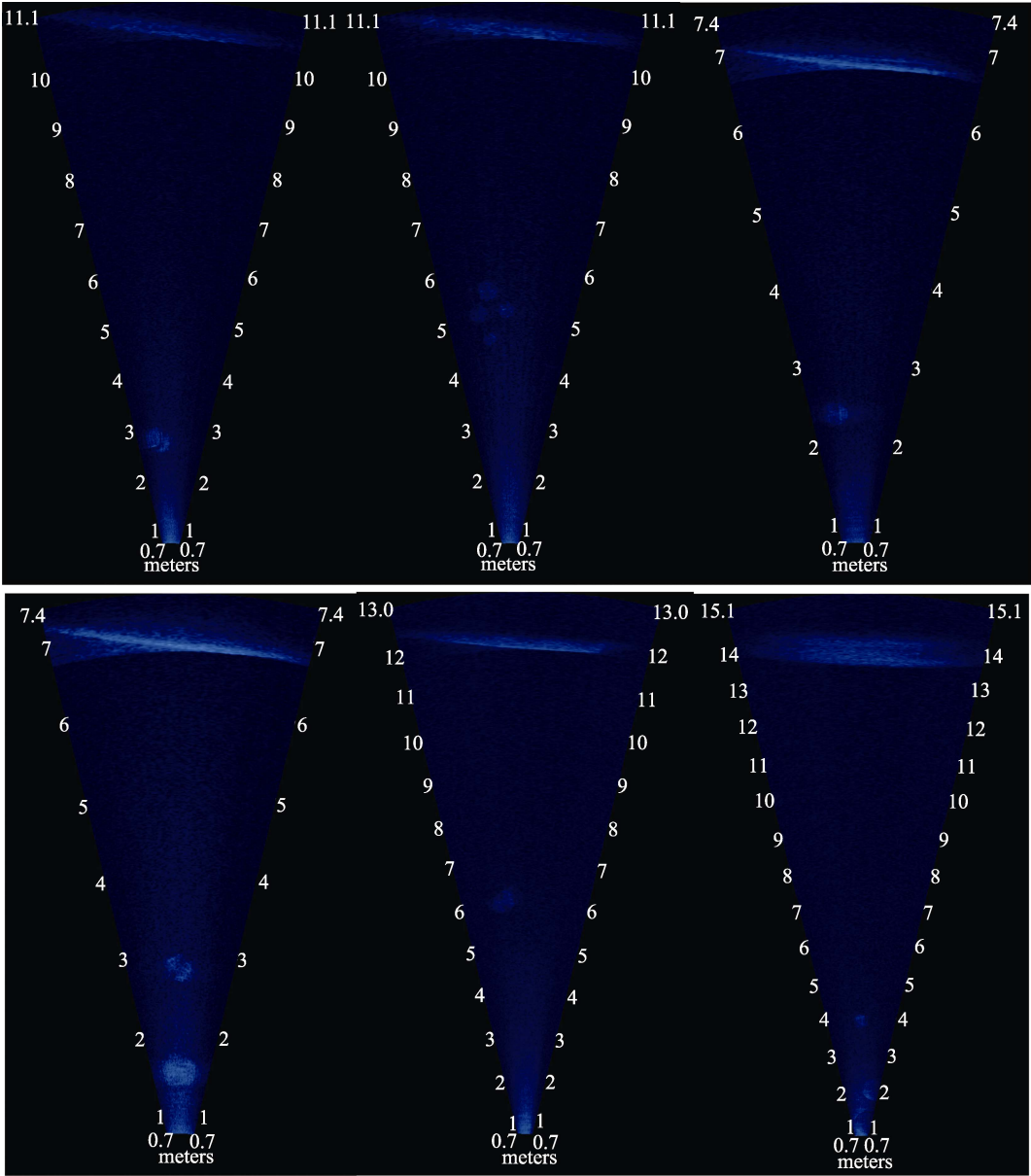


图 3 辽东湾水域 7 月和 8 月双频识别声纳(DIDSON)观测的沙海蜇影像
Fig. 3 The giant jellyfish *Nemopilema nomurai* in DIDSON images in July and August in Liaodong Bay

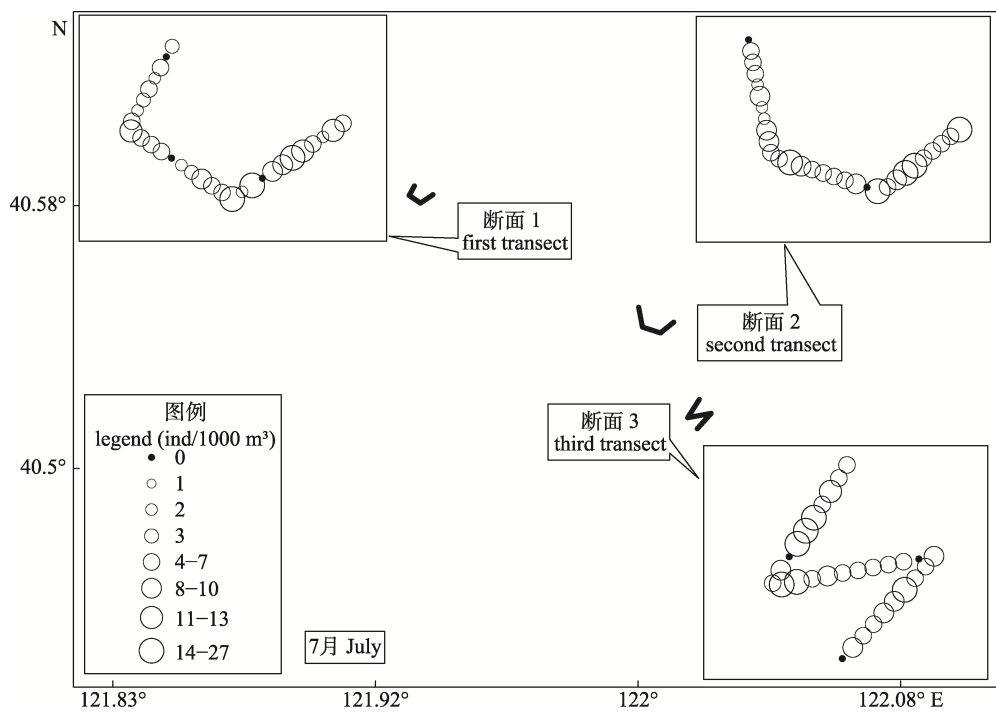


图 4 辽东湾海域 7 月 3 条调查断面 DIDSON 观测沙海蜇丰度平面分布

Fig. 4 Horizontal distribution of giant jellyfish *Nemopilema nomurai* medusae abundance along three transects by DIDSON images in July in Liaodong Bay

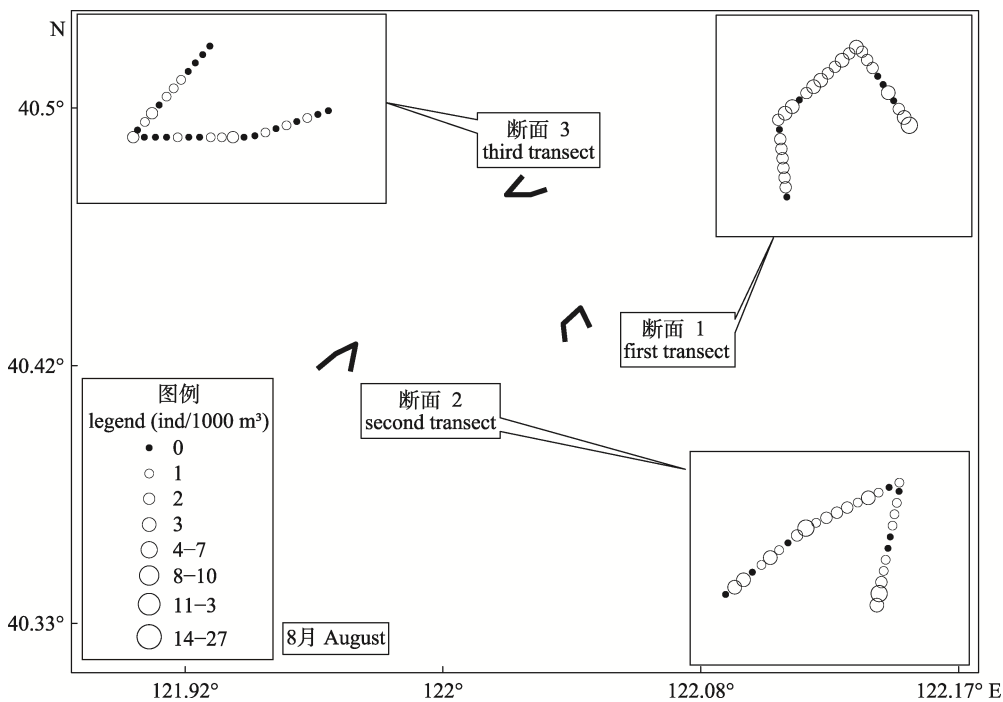


图 5 辽东湾海域 8 月 3 条调查断面 DIDSON 观测沙海蜇丰度平面分布

Fig. 5 Horizontal distribution of giant jellyfish *Nemopilema nomurai* medusae abundance along three transects by DIDSON images in August in Liaodong Bay

2.3 沙海蜇的垂直分布

7 月, 断面 1、断面 2、断面 3 平均水深分别

为 11.0 m、10.0 m 和 7.4 m。通过声纳扫测数据分析计算: 断面 1, 1.1~6.0 m 水深沙海蜇栖息丰度更

高;断面2,沙海蜇垂直分布较为平均,1.1~2.0 m 水深沙海蜇栖息丰度更高;断面3,1.1~3.0 m 水深的沙海蜇丰度更高。(图 6)

8 月,断面1、断面2、断面3 平均水深分别为 12.0 m、14.0 m 和 13.0 m。3 条调查断面观测的沙海蜇主要栖息在 1.1~10.0 m 的水深范围,底层水域未发现沙海蜇的分布(图 7)。

2.4 声纳观测与网具调查沙海蜇丰度的比对

7 月 3 条调查断面的 DIDSON 观测 30 min 内沙

海蜇的总数量分别是 135、122、79 头,其丰度分别为 6.13 ind/1000 m³、6.71 ind/1000 m³、7.93 ind/1000 m³, DIDSON 观测 3 条调查断面沙海蜇平均丰度为 (6.92±0.75) ind/1000 m³。8 月份 3 条调查断面的 DIDSON 观测结果也有差异,且观测到的沙海蜇数量总体上少于 7 月份,其数量分别为 37、44、17 头,丰度分别为 1.41 ind/1000 m³、1.23 ind/1000 m³、0.55 ind/1000 m³ (图 5), DIDSON 观测 3 条调查断面沙海蜇平均丰度为 (1.07±0.37) ind/1000 m³。

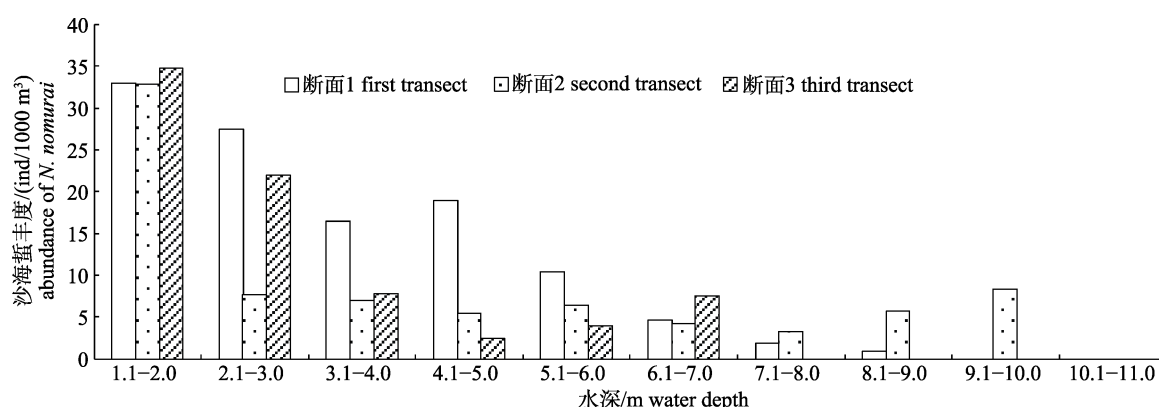


图 6 辽东湾水域 7 月份 DIDSON 观测沙海蜇的垂直分布

Fig. 6 The vertical distribution of giant jellyfish *Nemopilema nomurai* medusae by DIDSON images in July in Liaodong Bay

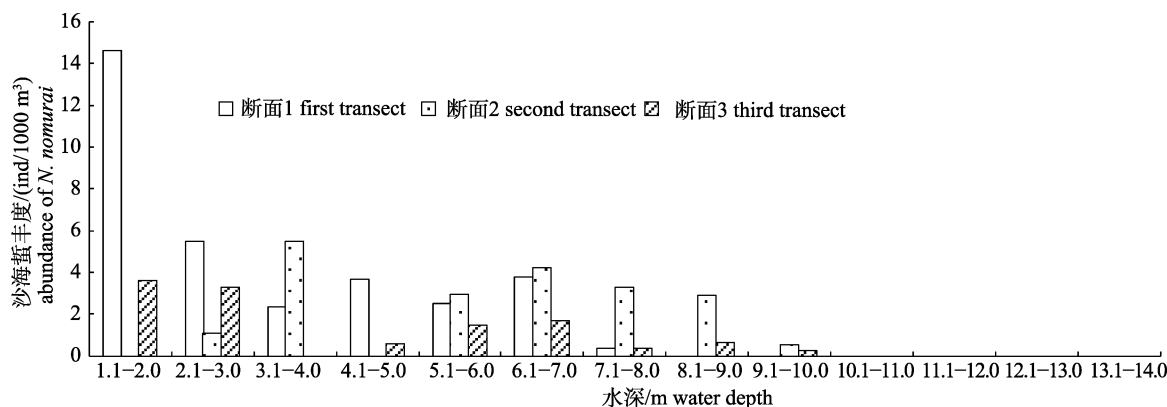


图 7 辽东湾水域 8 月 DIDSON 观测沙海蜇的垂直分布

Fig. 7 The vertical distribution of giant jellyfish *Nemopilema nomurai* medusae by DIDSON images in August in Liaodong Bay

网具调查结果与 DIDSON 观测结果类似,也表现为 7 月沙海蜇丰度高于 8 月,且丰度数值低于 DIDSON 观测结果。7 月网具调查沙海蜇数量分别为 223、125、260 头,其丰度分别为 1.56 ind/1000 m³、0.87 ind/1000 m³、1.82 ind/1000 m³,网具调查 3 条调查断面沙海蜇平均丰度为 (1.42±0.42) ind/1000 m³;

DIDSON 观测到的沙海蜇平均丰度是网具调查的 4.89 倍(图 8)。8 月网具调查沙海蜇数量分别为 31、62、23 头,其丰度分别为 0.22 ind/1000 m³、0.43 ind/1000 m³、0.16 ind/1000 m³,网具调查 3 条调查断面沙海蜇平均丰度为 (0.27±0.12) ind/1000 m³; DIDSON 观测到的沙海蜇丰度是网具调查的 3.95

倍(图 9)。

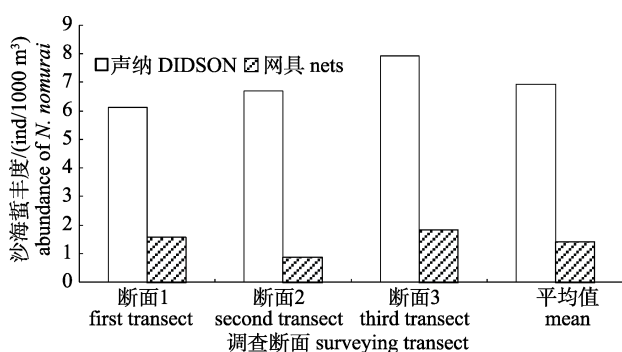


图 8 辽东湾水域 7 月 DIDSON 观测的沙海蜇丰度和网具监测沙海蜇丰度的比对

Fig. 8 Comparison of abundance of giant jellyfish *Nemopilema nomurai* medusae in different layers by DIDSON images and by nets in July in Liaodong Bay

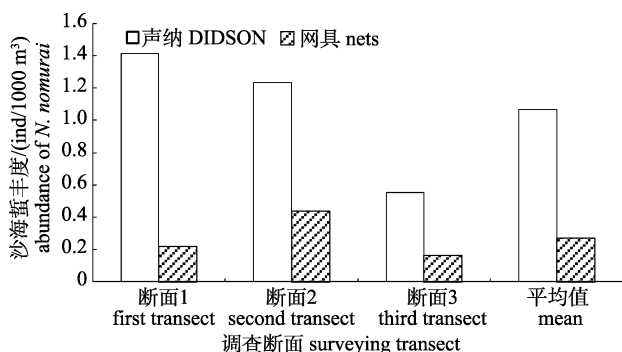


图 9 辽东湾水域 8 月 DIDSON 观测的沙海蜇丰度和网具监测沙海蜇丰度的比对

Fig. 9 Comparison of abundance of giant jellyfish *Nemopilema nomurai* medusae in different layers by DIDSON images and by nets in August in Liaodong Bay

2.5 沙海蜇伞径测量

根据网具调查所获沙海蜇, 测量了沙海蜇伞

径, 由于网具捕获的沙海蜇部分伞径损坏, 选择大多数完整的沙海蜇伞径进行了测量。7 月捕获的沙海蜇伞径变化范围为 16~75 cm, 平均伞径为 (33.01 ± 13.17) cm; 8 月捕获的沙海蜇伞径变化范围为 27~81 cm, 平均伞径为 (57.03 ± 13.44) cm (图 10)。

3 讨论

3.1 DIDSON 在其他渔业资源和大型水母监测中的优点

Zhang 等^[43]通过 DIDSON 观察了养殖中华鲟 (*Acipenser sinensis*) 的游泳模式并测量了体长, Doebling 等^[44]通过 DIDSON 观测了新西兰塔斯曼湾莫埃卡河流域沿海河口潮汐水闸处小型鱼类(全长约 60 mm)的迁徙分布特征, 证实了 DIDSON 也可以用于观测较小的鱼类的栖息分布特征。Hwang 等^[45]通过回声探测仪结合 DIDSON 观测了济州岛海域附近带鱼 (*Trichiurus lepturus*) 的栖息习性, 并测量了带鱼的体长, 发现带鱼在夜晚会以头部朝向海面的方式垂直游动。Swanson 等^[46]使用双频识别声纳(DIDSON)监测了密歇根湖支流博德曼河的 3 种大小的洄游鱼类在春季和夏季进入河流的行为, 并对鱼类行为的环境影响因子进行了评估。Giorli 等^[47]利用 DIDSON 观测了夏威夷近海中上层海洋动物的空间分布, 并测量了密度和大小, 发现可以通过海洋动物的运动轨迹区分鱼类、鱿鱼和无脊椎动物等, 并且海况条件会影响 DIDSON 影像视频的质量, 因此尽可能选择风平浪静的天气开展 DIDSON 观测。并且

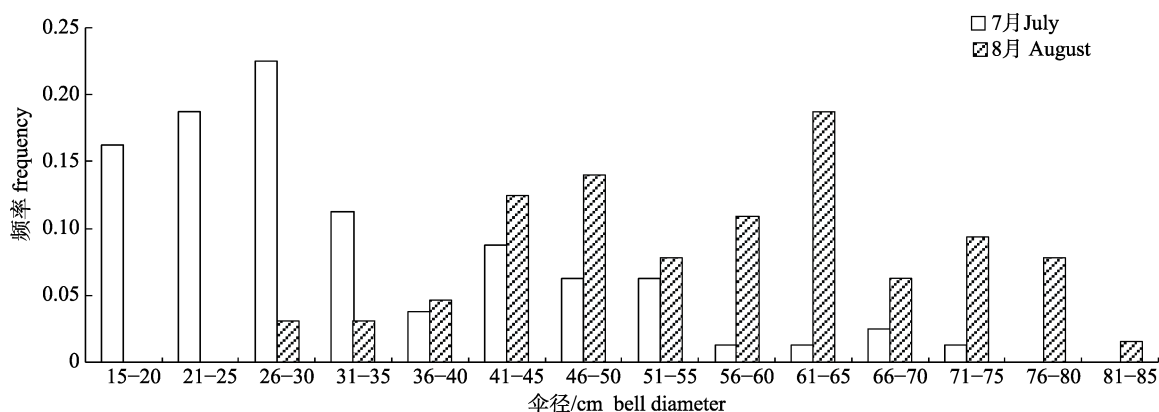


图 10 辽东湾水域 7 月和 8 月沙海蜇伞径出现频率分布图

Fig. 10 The bell diameter frequency distribution of giant jellyfish *Nemopilema nomurai* medusae in Liaodong Bay from net samples in July and August in Liaodong Bay

DIDSON 在渔业管理的应用中,逐渐开发出了自动计数的计数方式^[44,48]。童剑锋等^[49-50]通过 DIDSON 进行了香鱼(*Plecoglossus altivelis*)的有效识别并进行了软件自动计数,得到了很好的效果;张进^[51]根据 DIDSON 的成像特点,对其采集的图像进行预处理,增强其视觉效果,对上海滴水湖进行了渔业资源调查,对湖中的鱼类进行了软件自动计数和资源量估算。张翔^[52]通过 DIDSON 对象山港人工鱼礁鱼类的分布情况进行了研究,并对 Echoview 软件自动计数的结果误差进行了验证,验证结果表明自动计数与人工计数相比,计数结果一般偏大(误差 2.4%~13.3%),总体来说,自动计数的偏差在可控范围之内。若从计数效率及计数方法上考虑,对比之下,自动计数仍是目前来说较好的计数方法。关于 DIDSON 在大型水母的监测和调查方面, Han 等^[23]运用 DIDSON 清晰的监测了近岸盐湖水域中伞径 4.1~19.6 cm (平均 13.1 cm)的海月水母, Makabe 等^[24]通过 DIDSON 再次监测了近岸盐湖中的海月水母的时空分布和季节种群动态,并发现通过 DIDSON 清晰识别出海月水母的最小伞径为 5.0 cm。在 DIDSON 监测大型水母沙海蜇的方面, Honda 等^[25]通过 DIDSON 清晰的观察到沙海蜇在海中的移动状况和垂直分布的水层, Lee 等^[26]用 DIDSON 研究了黄海海域沙海蜇的游动速度和伞径的关系。采用双频识别声纳 DIDSON 监测大型水母,由于该仪器超高的声学分辨率,使得大型水母本身的轮廓、水中的方位、生殖腺甚至附属器等特征可以被有效识别出来^[23],在浅海水域是一种精准的监测大型水母的方法之一,并且可以监测到大型水母分布的水层特征。由于本研究调查时间较短,沙海蜇个体数量较少,人工计数的方法即可以满足数据处理的要求。本研究 and Han 等^[23]、Makabe 等^[24]大型水母的声纳观测图像计数中均只采用了人工计数的方法,未采用通过软件自动计数的方法^[40, 44]。

从本研究的调查结果来看,双频识别声纳 DIDSON 进行了不损害海洋生物情况的丰度评估,较为清晰的显示出大型水母沙海蜇分布的水层和数量,显示了双频识别声纳 DIDSON 对大型水母

沙海蜇良好的观测效果。采用高分辨率成像声纳技术调查水母的方式,即使在低可见度的水体中也可以提供了近似于视频质量的水下生物的声学影像,尽管水母的声学影像没有鱼类清晰,但是可以通过水母体本身的轮廓、水中的方位乃至生殖腺等特征将水母与鱼类有效鉴别出来^[23]。证明双频识别声纳是可以应用于浅海大型水母沙海蜇的观测和调查。从声纳观测和网具监测的沙海蜇丰度对比来看,2017 年 7 月份和 8 月份声纳监测的沙海蜇丰度分别是网具监测的 4.89 倍和 3.95 倍,而 Han 等^[23]的监测结果显示,声纳监测的海月水母丰度是网具监测的 3.3 倍。从对大型水母观测的伞径来看, Han 等^[23]对伞径 4.1~19.6 cm (平均 13.1 cm)的海月水母进行了观测,本文则对伞径 16~81 cm (7 月份平均伞径 33.01 cm±13.17 cm, 8 月份平均伞径 57.03 cm±13.44 cm)的沙海蜇进行了观测,本研究观测的大型水母伞径更大,进而在声纳观测图像中水母更加易于识别,体现出了良好的观测效果。

3.2 本研究的创新点与不足

目前 DIDSON 在国内渔业管理的应用一般是在河流、水库和湖泊^[29-31, 51]中鱼类资源的观测和评估,以及在浅海人工鱼礁区鱼类资源的监测^[52-53]。本研究在国内首次将 DIDSON 应用于浅海海域大型水母监测调查中,证明了 DIDSON 是可以应用于浅海海域大型水母沙海蜇的监测调查的。本研究中,双频识别声纳清晰的观测到沙海蜇在调查海域栖息的水层和实时分布状况,与传统网具监测调查相比, DIDSON 更为准确的评估了调查海区大型水母沙海蜇的丰度。本研究结果显示, DIDSON 观测可以扩展大型水母沙海蜇监测的内容,对沙海蜇行为学的观测有进一步的发展空间,在大型水母行为学研究和资源量评估方面具有明显优势,该方法在浅海海域大型水母沙海蜇的监测调查具有一定的优越性,值得进一步研究应用。但本研究中也有一些需要在今后的工作中继续研究改进的地方,主要如下:

1) DIDSON 具有较高的工作频率,要求探测时的走航船速较慢。张进^[51]在研究中指出,一旦船速较快,采集到的鱼体目标就会出现锯齿状轮

廓,当速度降低时锯齿状特征就有明显改善。为了能够得到清晰的数据,数据采集的时候一定要保持测量船的平稳,选择风浪小的天气测量,船的速度不宜过快,一般3到4节最好。在针对DIDSON声纳图像的诸多研究中多采用定点观测^[16,44]或者慢速走航探测^[29-30,51],所采集到的数据质量较好^[27]。因此本研究 and Han 等^[23]的研究均采用了较慢的走航船速(2.5~3.5 km/h),这就导致在相同时间内DIDSON 扫测体积低于传统网具调查的扫测体积。莫伟均等^[30]在北盘江董箐与光照库区鱼类资源水声学调查中认为 DIDSON 走航船速需要控制在5 km/h 以内才可以保证较好的图像质量;周家飞等^[29]在葛洲坝下游近坝区水域鱼类资源 DIDSON 走航探测中,经过多次实验,认为船速维持在7 km/h 以下时,可以保证探测图像较好的质量。本研究是在浅海中,受到波浪和潮流的影响,采用了更低的船速,但在今后的调查中,是否可以根据上述国内的经验尝试采用相对略高的船速是否能得到清晰的水母监测图像,增加单位时间内的DIDSON走航观测范围,减小单位时间内扫测体积较小而带来的声纳观测数据的随机性。

2) 本研究和 Han 等^[23]均是通过测量网具调查的大型水母伞径结果来计算 DIDSON 探测的大型水母伞径。在对 DIDSON 探测影像进行人工测量时无法考虑到被测生物的角度,测量方法比较机械,只能暂定影像框选被测生物进行测量,这样就会造成测量的局限性^[52]。探测区域的沙海蜇的游动体态不同,对测量沙海蜇伞径的区别很大。今后可以继续研究并建立大型水母不同的体态与伞径的函数关系,通过 DIDSON 观测图像测量大型水母伞径。另外可以今后尝试根据声学影像对被测大型水母进行科学、有效的提取和识别,进而建立客观、准确的声学特征和生物学特征之间的模型关系,利用 Echoriew 等软件来实现大型水母声学图像的自动计数和跟踪。

3) 本研究中沙海蜇主要栖息在调查海域中上层水域(1.1~10 m),底层水域沙海蜇出现的少。这点与 Han 等^[23]的海月水母栖息在中上层水域丰度更高的观测结果相同。海水的物理化学条件,如低盐度水或风驱动的海流表层和底层缺氧可能

会影响垂直方向水母的分布^[23, 54-55]。另外调查时间也会影响水母的垂直分布, Honda 等^[56]对12只伞径在0.8 m至1.6 m的沙海蜇游泳深度进行了声学信标跟踪,发现日本海沙海蜇的活动范围与海洋的垂直结构有明显关系,夜晚的游泳深度要明显高于白天,中午时刻的游泳深度相对于清晨明显变浅,午夜的游泳深度要明显高于夜间的其他时间段。因此建议在今后的调查中增加 DIDSON 观测时间,包括进行长时间昼夜24 h 的定点观测等,进一步掌握近海沙海蜇的生态栖息习性。

4 总结

考虑到大型水母在海区中分布水层的不同,未来的大型水母监测调查则是需要多种技术全方位的调查,弥补各自的缺点。在未来大型水母监测中可根据具体监测海域情况将 DIDSON、传统网具以及目视调查等方法选择性的结合使用,特别是有些海域状况复杂或者沙海蜇数量太多撑破网具,难以开展网具调查时,可采用 DIDSON 进行沙海蜇监测调查。本研究中声纳观测的沙海蜇平均丰度明显高于网具监测,由于本研究的声纳观测扫测体积低于网具扫测体积,有可能造成声纳监测数据的随机性要高于网具监测,在今后的监测中,通过延长走航观测时间,增大扫测体积,可得到更加科学的结果,进一步的研究声纳观测和网具监测大型水母丰度的差异。本研究的结果证明双频识别声纳是适用于近海大型水母沙海蜇的监测调查工作的,在今后的工作中,我们还需要将双频识别声纳用于更多种类的大型水母观测中以验证其在不同大型水母监测调查的应用效果。

参考文献:

- [1] Purcell J E, Uye S, Lo W. Anthropogenic causes of jellyfish blooms and their direct consequences for humans: A review[J]. Marine Ecology Progress Series, 2007, 350: 153-174.
- [2] Purcell J E. Predation on zooplankton by large jellyfish, *Aurelia labiata*, *Cyanea capillata* and *Aequorea aequorea*, in prince William sound, Alaska[J]. Marine Ecology Progress Series, 2003, 246: 137-152.
- [3] Kawahara M, Uye S I, Ohtsu K, et al. Unusual population

- explosion of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* (Scyphozoa: Rhizostomeae) in East Asian waters[J]. Marine Ecology Progress Series, 2006, 307: 161-173.
- [4] Dong Z J, Liu D Y, Keesing J K. Jellyfish blooms in China: Dominant species, causes and consequences[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60(7): 954-963.
- [5] Cheng J H, Ding F Y, Li S F, et al. A study on the quantity distribution of macro-jellyfish and its relationship to seawater temperature and salinity in the East China Sea Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 440-445, 660. [程家骅, 丁峰元, 李圣法, 等. 东海区大型水母数量分布特征及其与温盐度的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 440-445, 660.]
- [6] Dong J, Jiang L X, Sun M, et al. Biology of giant jellyfish in the Bohai Sea and northern Yellow Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 2013: 1-265. [董婧, 姜连新, 孙明, 等. 渤海与黄海北部大型水母生物学研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2013: 1-265.]
- [7] Yang D F, Cui W L, Zhang H L, et al. Application of new technology in jellyfish monitoring[J]. Ocean development and management, 2014(4): 38-41. [杨东方, 崔文林, 张洪亮, 等. 新技术在水母监测中的应用[J]. 海洋开发与管理, 2014(4): 38-41.]
- [8] Brierley A S, Axelsen B E, Buecher E, et al. Acoustic observations of jellyfish in the Namibian Benguela[J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, 210: 55-66.
- [9] Brierley A S, Axelsen B E, Boyer D C, et al. Single-target echo detections of jellyfish[J]. ICES Journal of Marine Science, 2004, 61(3): 383-393.
- [10] Brierley A S, Boyer D C, Axelsen B E, et al. Towards the acoustic estimation of jellyfish abundance[J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 295: 105-111.
- [11] Gorbatenko K M, Nikolayev A V, Figurkin A L, et al. Quantitative composition, distribution, and feeding of large jellyfish (Scyphozoa et Hydrozoa) on the West Kamchatka shelf in summer[J]. Russian Journal of Marine Biology, 2009, 35(7): 579-592.
- [12] Robertis A D, Taylor K. In situ target strength measurements of the scyphomedusa *Chrysaora melanaster*[J]. Fisheries Research, 2014, 153: 18-23.
- [13] Gordon M R, Seymour J E. Quantifying movement of the tropical Australian cubozoan *Chironex fleckeri* using acoustic telemetry[J]. Hydrobiologia, 2009, 616(1): 87-97.
- [14] Wang B, Fang L C, Dong J, et al. Review of acoustic techniques in the monitoring and assessment of the giant jellyfish[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8187-8196. [王彬, 房立晨, 董婧, 等. 大型水母声学观测与评估技术研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8187-8196.]
- [15] Rakowitz G, Tušer M, Řiha M, et al. Use of high-frequency imaging sonar (DIDSON) to observe fish behaviour towards a surface trawl[J]. Fisheries Research, 2012, 123-124: 37-48.
- [16] Magowan K, Reitsma J, Murphy D. Use of dual-frequency identification sonar to monitor adult river herring in a small coastal stream[J]. Marine and Coastal Fisheries, 2012, 4(1): 651-659.
- [17] Petreman I C, Jones N E, Milne S W. Observer bias and subsampling efficiencies for estimating the number of migrating fish in rivers using Dual-frequency IDentification SONar (DIDSON)[J]. Fisheries Research, 2014, 155: 160-167.
- [18] Hughes J B, Hightower J E. Combining split-beam and dual-frequency identification sonars to estimate abundance of anadromous fishes in the Roanoke River, north Carolina[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2015, 35(2): 229-240.
- [19] Belche E O, Lynn, D C. Acoustic, Near-video-quality Images for Work in Turbid Water[C]. Proceedings of Underwater Intervention 2000, January 2000.
- [20] Tiffan K F, Rondorf D W, Skalicky J J. Imaging fall Chinook salmon redds in the Columbia river with a dual-frequency identification sonar[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2004, 24(4): 1421-1426.
- [21] Xie Y B, Gray A P, Martens F J, et al. Use of Dual-Frequency Identification Sonar to verify salmon flux and to examine fish behaviour in the Fraser River[R]. Pacific Salmon Commission Technical Report, 2005, No. 16: 1-58.
- [22] Budnik R R, Miner J G. Novel aspects of stocked juvenile steelhead emigration patterns as revealed using dual- frequency identification sonar[J]. Journal of Great Lakes Research, 2017, 43(5): 970-977.
- [23] Han C H, Uye S I. Quantification of the abundance and distribution of the common jellyfish *Aurelia aurita* s.l. with a Dual-frequency IDentification SONar (DIDSON)[J]. Journal of Plankton Research, 2009, 31(8): 805-814.
- [24] Makabe R, Kurihara T, Uye S I. Spatio-temporal distribution and seasonal population dynamics of the jellyfish *Aurelia aurita* s.l. studied with Dual-frequency IDentification SONar (DIDSON)[J]. Journal of Plankton Research, 2012, 34(11): 936-950.
- [25] Honda N, Watanabe T. Observation of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* using an underwater acoustic camera[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 2007, 73(5): 919-921.
- [26] Lee K, Bae B S, Kim I O, et al. Measurement of swimming speed of giant jellyfish *Nemopilema nomurai* using acoustics and visualization analysis[J]. Fisheries Science, 2010, 76(6): 893-899.
- [27] Shen W, Zhu Z H, Zhang J, et al. Fish target recognition and

- counting based on Dual-frequency Identification Sonar[J]. Fishery Modernization, 2020, 47(6): 81-87. [沈蔚, 朱振宏, 张进, 等. 基于双频识别声纳的鱼类目标识别与计数[J]. 渔业现代化, 2020, 47(6): 81-87.]
- [28] Smith C S, Paxton A B, Donaher S E, et al. Acoustic camera and net surveys reveal that nursery enhancement at living shorelines may be restricted to the marsh platform[J]. Ecological Engineering, 2021, 166: 106232.
- [29] Zhou J F, Wang C F, Liu D F, et al. Hydro-acoustic investigation and assessment on fishes in the near downstream of gezhouba dam[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(11): 1551-1557. [周家飞, 王从锋, 刘德富, 等. 葛洲坝下游近坝区水域鱼类资源声学调查与评估[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1551-1557.]
- [30] Mo W J, Wang C F, Qin X H, et al. Acoustic monitoring on fish resources in the dongqing and Guangzhao reservoirs of Beipan River[J]. Journal of Hydroecology, 2015, 36(3): 10-17. [莫伟均, 王从锋, 秦孝辉, 等. 北盘江董箐与光照库区鱼类资源水声学调查[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(3): 10-17.]
- [31] Zhang P, Qiao Y, Jin Y, et al. Upstream migration of fishes downstream of an under-construction hydroelectric dam and implications for the operation of fish passage facilities[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 23: e01143.
- [32] Chen G B, Li Y Z, Zhao X Y, et al. Acoustic assessment of five groups commercial fish in South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(2): 128-134. [陈国宝, 李永振, 赵宪勇, 等. 南海 5 类重要经济鱼类资源声学评估[J]. 海洋学报(中文版), 2006, 28(2): 128-134.]
- [33] Li N N, Chen G B, Yu J, et al. Assessment of biomass in artificial reef area of Yangmeikeng in Daya Bay using acoustic method[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(11): 1640-1649. [李娜娜, 陈国宝, 于杰, 等. 大亚湾杨梅坑人工鱼礁水域生物资源量声学评估[J]. 水产学报, 2011, 35(11): 1640-1649.]
- [34] Tang Y, Lin D, Zhang G, et al. Testing the tracking of behaviour of a caged *Takifugu rubripes* (Temminck & Schlegel, 1850) using acoustic telemetry[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2013, 29(6): 1456-1458.
- [35] Tao J P, Chen Y B, Qiao Y, et al. Hydroacoustic surveys on spatial distribution of fishes in the Three Gorges reservoir during the first impoundment[J]. Journal of Hydroecology, 2008, 29(5): 25-33. [陶江平, 陈永柏, 乔晔, 等. 三峡水库成库期间鱼类空间分布的水声学调查[J]. 水生态学杂志, 2008, 29(5): 25-33.]
- [36] Zhang J C, Zhao X Y, Wang X L, et al. Numericalization of pictorial image of *Antarctic krill* echogram taken from a commercial echo-sounder[J]. Progress in Fishery Sciences, 2012, 33(4): 64-71. [张吉昌, 赵宪勇, 王新良, 等. 商用探鱼仪南极磷虾声学图像的数值化处理[J]. 渔业科学进展, 2012, 33(4): 64-71.]
- [37] Yang Q, Li Y Z, Zhang P, et al. Acoustic survey of the *Symplectoteuthis oualaniensis* resources in the South China Sea based on light falling-net[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(7): 1032-1039. [杨权, 李永振, 张鹏, 等. 基于灯光罩网法的南海鳶乌贼声学评估技术研究[J]. 水产学报, 2013, 37(7): 1032-1039.]
- [38] Zhang J, Chen G B, Zhang P, et al. Estimation of purpleback flying squid (*Sthenoteuthis oualaniensis*) resource in the central and southern South China Sea based on fisheries acoustics and light-falling net[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014(4): 822-831. [张俊, 陈国宝, 张鹏, 等. 基于渔业声学 and 灯光罩网的南海中南部鳶乌贼资源评估[J]. 中国水产科学, 2014(4): 822-831.]
- [39] Zhang Y, Li G J, Wang Z S, et al. A method of jellyfish detection based on acoustic image[J]. Technical Acoustics, 2016, 35(3): 79-80. [张阳, 李桂娟, 王振山, 等. 基于高分辨率多波束声成像的水母探测方法[J]. 声学技术, 2016, 35(3): 79-80.]
- [40] Wang Z, Fu Y Y. Monitoring of cold source biomass at water intake of hongyanhe nuclear power plant by using acoustic methods[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(36): 169-172. [王梓, 付媛媛. 基于声学方法的核电厂取水口冷源生物量监测[J]. 科学技术创新, 2021(36): 169-172.]
- [41] Fu Y Y, Tang Y, Wang S, et al. Flux measurement of jellyfish near Hongyanhe Nuclear Power Station area in summer by using acoustic methods[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021, 36(2): 325-333. [付媛媛, 汤勇, 王珊, 等. 基于声学技术的红沿河核电站附近海域夏季水母通量测量[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(2): 325-333.]
- [42] Wang B, Dong J, Li Y L, et al. Technical specification for *Nemopilema nomurai* monitoring survey[S]. Local standards of Liaoning Province, DB21/T 2823-2017. [王彬, 董婧, 李玉龙, 等. 沙蜃监测调查技术规程[S]. 辽宁省地方标准, DB21/T 2823-2017]
- [43] Zhang H, Wei Q W, Kang M. Measurement of swimming pattern and body length of cultured Chinese sturgeon by use of imaging sonar[J]. Aquaculture, 2014, 434: 184-187.
- [44] Doehring K, Young R, Hay J, et al. Suitability of Dual-frequency Identification Sonar (DIDSON) to monitor juvenile fish movement at floodgates[J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 2011, 45(3): 413-422.
- [45] Hwang K, Yoon E A, Kang S, et al. Behavioral patterns and in situ target strength of the hairtail (*Trichiurus lepturus*) via

- coupling of scientific echosounder and acoustic camera data[J]. *Ocean Science Journal*, 2017, 52(4): 563-571.
- [46] Swanson R G, McCann E L, Johnson N S, et al. Environmental factors influencing annual sucker (*Catostomus* sp.) migration into a Great Lakes tributary[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2021, 47(4): 1159-1170.
- [47] Giorli G, Drazen J C, Neuheimer A B, et al. Deep Sea animal density and size estimated using a Dual-frequency IDentification SONar (DIDSON) offshore the island of Hawaii[J]. *Progress in Oceanography*, 2018, 160: 155-166.
- [48] Han J, Honda N, Asada A, et al. Automated acoustic method for counting and sizing farmed fish during transfer using DIDSON[J]. *Fisheries Science*, 2009, 75(6): 1359-1367.
- [49] Tong J F, Han J, Shen W. Preliminary research on the image processing of acoustic camera and its application in fishery[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2010(17): 149-152, 156. [童剑锋, 韩军, 沈蔚. 声学摄像仪图像处理的初步研究及在渔业上的应用[J]. *湖南农业科学*, 2010(17): 149-152, 156.]
- [50] Tong J F, Han J, Asada A, et al. Counting method of upstream juvenile ayu (*Plecoglossus altivelis*) by acoustic camera[J]. *Fishery modernization*, 2009, 36(2): 29-33. [童剑锋, 韩军, 浅田昭, 等. 基于声学摄像仪的溯河洄游幼香鱼计数[J]. *渔业现代化*, 2009, 36(2): 29-33.]
- [51] Zhang J. Researches on DIDSON-based fish quantitative assessment technology[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012. [张进. 基于双频识别声纳 DIDSON 的鱼群定量评估技术[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.]
- [52] Zhang X. Study on fish distribution in artificial reef region based on DIDSON[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. [张翔. 基于双频识别声纳的人工鱼礁区鱼类分布研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.]
- [53] Guo D, Dong J, Fu J, et al. Artificial reef and fisheries estimation in dalu island based on dual frequency sonar[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018(2): 41-48. [郭栋, 董婧, 付杰, 等. 基于双频识别声纳的东港大鹿岛人工鱼礁调查研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2018(2): 41-48.]
- [54] Graham W M. Numerical increases and distributional shifts of *Chrysaora quinquecirrha* (Desor) and *Aurelia aurita* (Linné) (Cnidaria: Scyphozoa) in the northern Gulf of Mexico[M]// *Jellyfish Blooms: Ecological and Societal Importance*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001: 97-111.
- [55] Albert D J. What, on the mind of a jellyfish? A review of behavioural observations on *Aurelia* sp. jellyfish[J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2011, 35(3): 474-482.
- [56] Honda N, Watanabe T, Matsushita Y. Swimming depths of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* investigated using pop-up archival transmitting tags and ultrasonic pingers[J]. *Fisheries Science*, 2009, 75(4): 947-956.

Application of Dual-Frequency Identification Sonar (DIDSON) to monitor giant jellyfish *Nemopilema nomurai* in inshore waters of Liaodong Bay

WANG Bin, LIU Xiuze, WANG Xiaolin, JI Guang, DONG Jing

Liaoning Key Laboratory of Marine Biological Resources and Ecology; Dalian Key Laboratory of Conservation of Fishery Resources; Liaoning Ocean and Fisheries Science Research Institute, Dalian 116023, China

Abstract: Since the end of the 20th century, giant jellyfish blooms have occurred on a nearly annual basis around the globe, with disastrous effects on the ecology of marine systems, fishery resources, coastal industries, and coastal tourism. Researchers, both domestically and abroad, have thoroughly investigated this phenomenon using nets, visual observations, underwater cameras, acoustic technology, aerial imagery, and other means to elucidate the underlying mechanisms of giant jellyfish blooms. In recent years, acoustic technology has been used to investigate the stock and behavior of giant jellyfish globally. These technologies have demonstrated favorable monitoring capabilities and the potential for their application in both resource assessment and the kinematics of the giant jellyfish. To determine the effect of Dual-Frequency Identification Sonar (DIDSON) on giant jellyfish *Nemopilema nomurai* monitoring in Liaodong Bay, we used DIDSON to determine quantitatively the abundance and distribution of giant jellyfish *N. nomurai* with individual medusae of 16–81 cm (33.01 cm $\pm$ 13.17 cm in July and 57.03 cm $\pm$ 13.44 cm in August) bell diameter in inshore waters of Liaodong Bay in July and August, 2017, and jellyfish anchor flow net samples were conducted simultaneously to verify DIDSON observations in the monitoring of large jellyfish. The survey results showed that DIDSON observation images can directly display the number of jellyfish and their positions in the water layer. The abundance of *N. nomurai* estimated by the DIDSON was 6.13 ind/(1000 m³), 6.71 ind/(1000 m³), 7.93 ind/(1000 m³) with mean (6.92 $\pm$ 0.75) ind/(1000 m³) in July, and 1.41 ind/(1000 m³), 1.23 ind/(1000 m³), 0.55 ind/(1000 m³) with mean (1.07 $\pm$ 0.37) ind/(1000 m³) in August. The overall average abundance of jellyfish estimated by DIDSON in July and August was 4.89 times and 3.95 times higher than that estimated by net, respectively. DIDSON images showed that *N. nomurai* mainly inhabited the upper and middle waters (1.1–10 m), with fewer in the bottom layer. Compared with the traditional network survey, DIDSON can more accurately observe the abundance of jellyfish in the survey area and their vertical distribution. The results suggest that it is effective to monitor the giant jellyfish using DIDSON in shallow water. The results showed that DIDSON observation can expand the monitoring content of large jellyfish, affording great advantages in the observation of its behavior. By extending the DIDSON navigation observation time and expanding its detection range, and in combination with traditional nets, the abundance of large jellyfish can be monitored more accurately.

Key words: DIDSON; Liaodong Bay; *Nemopilema nomurai*; abundance; distribution

Corresponding author: DOND Jing. E-mail: 1024470248@qq.com