

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.19149

大亚湾核电临近海域中国毛虾声学探测分析

曾雷^{1, 2, 3, 4}, 陈国宝^{1, 2, 3, 4}, 王腾^{1, 2, 4}, 杨炳忠^{1, 2, 4}, 于杰^{1, 2, 3, 4}, 廖秀丽^{1, 2, 4}, 黄洪辉^{1, 2, 4}

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300;
2. 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300;
3. 中国水产科学研究院海洋牧场技术重点实验室, 广东 广州 510300;
4. 农业农村部南海渔业资源环境科学观测实验站, 广东 广州 510300

摘要: 于 2019 年 1 月 11—14 日在大亚湾核电基地临近海域尝试采用声学探测技术, 同时辅以拖网调查与水下视频观测的方法, 对该海域中国毛虾(*Acetes chinensis*)的空间分布特征、定向迁移聚集规律和种群资源评估方法进行了研究分析, 以期为大亚湾核电基地典型冷源致灾生物中国毛虾的监测预警与应急防控提供新的思路。调查发现, 拖网渔获物中中国毛虾所占比重在 99%以上, 仅有数量极少的水母和鱼类。19:00—07:00 的声学原位观测结果显示, 不同时段中国毛虾海里面积反向散射系数(NASC)波动较大(0.56~170.30 m²/n mile²), 整体呈先增后减的变化趋势, 最高值出现在 22:30—22:40 时段。垂直空间分布上, 中国毛虾主要集群分布于水深 5.2~7.2 m 的中下层水域, 在 22:50—00:10 期间有明显向底层迁移的趋势。水平空间分布上, 中国毛虾生物量密度由湾内至湾口断面逐渐增大。结合不同时段中国毛虾资源动态规律与水下视频观测结果, 调查海域中国毛虾很可能在 19:00—23:00 期间向湾内迁移, 23:00 之后向湾口迁移。综上分析可知, 声学评估方法较传统的渔业调查手段具有生态、高效、时空分辨率高、能提供实时监测数据等诸多优点, 更能满足大亚湾核电站冷源生物安全预警与应急防控的现实需求。

关键词: 大亚湾核电站; 中国毛虾; 资源动态; 空间分布; 声学评估

中图分类号: S93

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2019)06-1029-11

近年来, 海洋生物暴发致使滨海核电站冷源取水堵塞影响核电安全稳定运行事件时有发生^[1-2]。据世界核电运营者协会(WANO)统计, 2004—2015 年发生的 104 起冷源取水堵塞事件中, 海洋生物致灾堵塞占 58%, 可见, 海洋生物暴发是核电安全运行的主要威胁。中国滨海核电冷源安全运行目前亦普遍面临着海洋生物暴发致灾问题, 如 2016 年, 中国国家核安全局通报了红沿河、宁德和岭澳等核电海洋生物堵塞冷源事件^[3]。为保障中国滨海核电站的安全稳定运行, 核电冷源海洋生物堵塞问题尚存诸多技术难题亟待解决, 如典型致灾生物大规模聚集成因分析、致灾生物综

合监测与预警防控技术等^[4-5]。而摸清滨海核电冷源典型致灾生物迁移聚集规律, 进行实时高效监控, 对于核电站致灾生物预警防控有十分重要的意义。

中国毛虾(*Acetes chinensis*)是大亚湾核电基地冷源安全威胁的主要生物之一, 近年来其频繁大规模暴发对核电站的安全运行带来极不利的影响。然而, 目前对于中国毛虾迁移聚集规律尚不详知, 其致灾成因亦未有系统研究。因此, 大亚湾核电基地冷源中国毛虾致灾安全防控工作仍面临着巨大的挑战。目前, 对于该海域中国毛虾的安全防控主要以多重密网拦截和围网打捞为主。然

收稿日期: 2019-05-30; 修订日期: 2019-07-04.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1407501); 农业部财政项目(640).

作者简介: 曾雷(1989—), 男, 助理研究员, 主要从事渔业资源评估与水生态研究. E-mail: 670898494@qq.com

通信作者: 黄洪辉, 男, 研究员, 主要从事海洋生态和海洋环境科学研究. E-mail: huanghh@scsfri.ac.cn

而, 这些方法具有一定的盲目性, 且作业成本较高。建立科学高效的中国毛虾实时监控方法, 摸清其迁移聚集的时空动态, 是实现核电冷源中国毛虾致灾预警和指向性防控的先决条件。近年来, 水下视频常作为特定水域海洋生物资源生态监管的一类方法^[6-7]。但此类方法易受光照、水域环境等条件的限制, 其应用范围非常局限^[8]。声学评估作为一种新兴的水生生物资源评估方法, 在全球范围内不断推广应用并表现出较好的优越性; 与传统渔业调查方法相比, 更加高效快捷、对资源环境损害较小, 且能提供实时的监测数据, 因而表现出更加广阔的应用前景^[9-10]。然而, 基于声学方法对中国毛虾资源评估与动态规律的研究尚未见报道。

本研究拟针对大亚湾核电基地冷源中国毛虾致灾问题, 采用声呐探测、拖网调查及水下视频观测等多种方法, 对该海域中国毛虾时空分布和种群迁移聚集规律等进行了初步研究, 探讨了针对中国毛虾的实时监控和种群资源评估方法, 以期为大亚湾核电基地冷源生物致灾安全预警与防控提供新的思路和科学指导。

1 材料与方法

1.1 调查设计

据历史资料记载及渔民生产经验, 每年的冬

季(12月至翌年2月)为大亚湾核电基地临近海域中国毛虾的盛产期。因此, 本研究于2019年1月12日8:00—20:00在大亚湾核电站临近海域开展了中国毛虾声学调查, 同时辅以拖网调查与水下视频观测的方法, 以研究该海域中国毛虾空间分布特征, 探讨其迁移聚集规律。

声学调查采用垂直向下的走航式探测方法, 共设计了10个平行断面, 因受调查海域地理环境及人类活动的干扰, 声学调查航迹并不规则(图1)。各声学调查断面间距约1 km; 累计航程约25.83 n mile; 调查区域面积约13.4 n mile²。参照声学探测覆盖率(D)计算公式^[11]: $D=L/\sqrt{A}$; 式中, L 为有效航程, A 为水域面积, 则调查区域声学探测覆盖率为7.06, 该取样强度足以反映调查区域中国毛虾的空间分布特征。

为科学评估调查海域中国毛虾资源密度, 深入了解其资源变动规律, 本研究于2019年1月13日19:00—次日7:00在距离大亚湾核电取水口约1 km海域锚定船只, 开展了声学原位观测。在此期间, 当声学目标信号大规模聚集时通过水下视频的方法进一步确认。于2019年1月14日19:10—22:20在大亚湾核电取水口临近海域同步开展了声学拖网调查, 以分析两种不同方法评估结果的差异, 拖网采样与原位观测位置如图1所示。

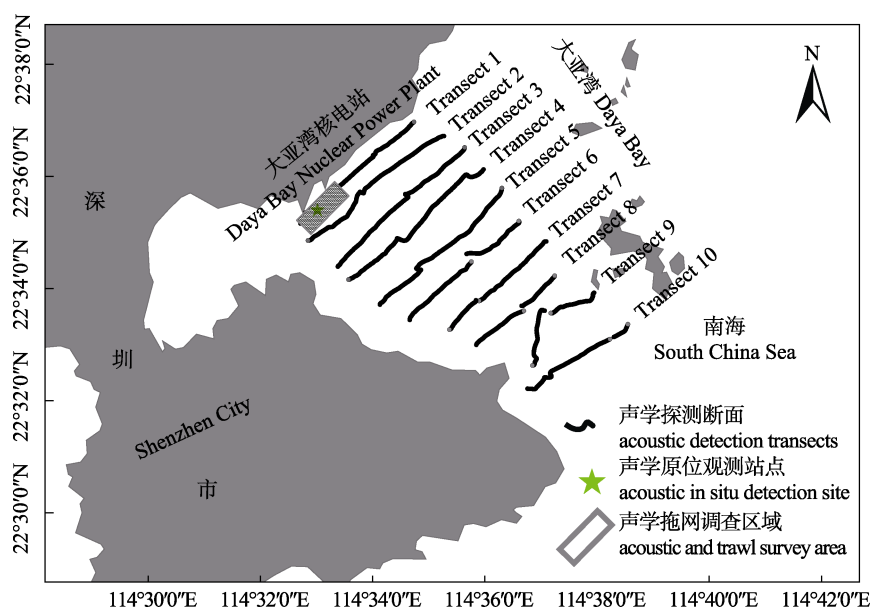


图1 大亚湾核电站取水口临近海域声学探测与拖网调查

Fig. 1 Acoustic detection and trawl investigation near the water intake of Daya Bay Nuclear Power Plant

1.2 数据采集

声学数据的采集主要由便携式分裂波束科学鱼探仪型完成, 工作频率为 200 kHz, 发射功率为 150 W, 脉冲宽度为 256 μ s, 脉冲间隔为 0.2 s/ping, 探测深度设置为 50 m。由于 Simrad EY60 声呐系统缺乏长期的稳定性, 且声波的传播属性受海水介质的影响, 故调查前应按照国际通用的标准球法对科学鱼探仪的收发增益进行现场校正。声学调查过程中, 将换能器置于导流罩内, 固定于船舷中部靠前, 水下 0.8 m 的位置, 以减小船舶发动机噪声及海表风浪的影响。声呐探测目标的位置、大小及动态水深等数据通过 ER60 软件采集, 并由 Gamin GPSCSx (美国) 提供实时同步的经纬度动态数据。声学探测租用当地渔船(粤徐渔 13171), 船长 11 m, 主机功率 73.55 kW, 航速约 10.2 km/h。

生物学样本主要通过专用毛虾拖网获取, 租用当地渔船(粤徐渔 13171)共进行了 7 次拖网作业, 各网次拖网时长在 10~16 min, 平均拖网速度为 1.85 km/h, 网口宽度为 5 m, 网口高度为 4.87 m。所有网次渔获样品均进行现场分类鉴定, 并称重。由于所有网次渔获物均以中国毛虾占绝对优势(99%以上), 故各网次随机抽取约 30 尾中国毛虾样本以测量其体长、体重分布范围, 体长精确至 1 mm, 体重精确至 0.01 g。

1.3 数据处理

声学数据的处理与分析主要参照 Echoview 标准资源量评估水声学数据处理技术手册^[12]和大湖渔业声学调查标准操作流程^[13]完成。考虑声学探测盲区及海表噪声信号的影响, 首先将声学积分起始水深设置为 1.2 m; 进一步利用海底自动检测功能板块(best bottom candidate)生成海底轮廓曲线, 并将声学积分终止水深设置为海底 0.3 m 以上水域, 以剔除海底非目标信号的干扰, 个别位置通过手动编辑修正。Sv 映像中绝大部分背景噪声利用虚拟变量数据生成器模块进行消除^[14], 其他非目标信号(如气泡、礁石及其他大型游泳生物等)经回波映像解析后手动剔除, 以提高声学评估结果准确性。

此外, 在声学调查过程中, 通过随机抽样的方式, 于 2019 年 1 月 13 日 19:00 至次日 6 点进行

了水下视频观测, 以辅助声学回波映像的识别, 其结果如图 2 所示。调查海域中国毛虾主要以群体形式存在, 故其资源密度的估算宜采用回波积分法。以 500 m 为基本积分单元, 其积分阈值的设定主要根据阈值响应(threshold response)模块中 NASC 的梯度变化特征确定。由于目标生物中国毛虾个体极小, 声学回波信号较弱, 本研究中其积分阈值设置为 -77 dB。

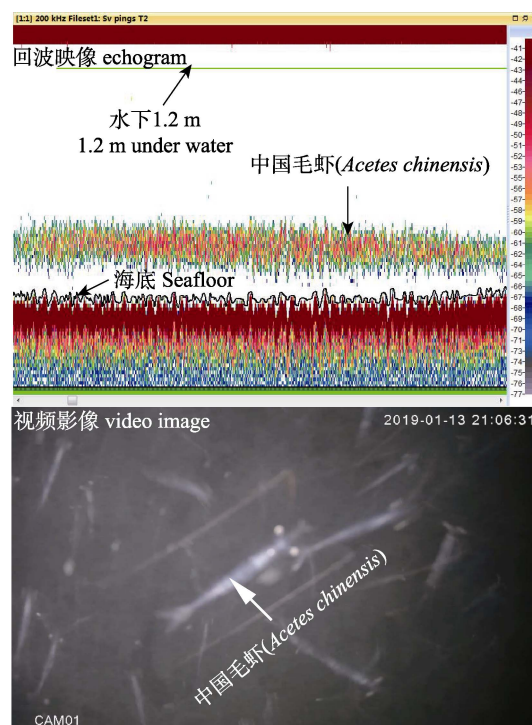


图2 声学原位观测位点中国毛虾 Sv 回波映像与水下视频观测

Fig. 2 Sv echogram and video image of *Acetes chinensis* at the acoustic in situ detection site

1.4 资源评估

1.4.1 回波积分法 中国毛虾为调查期间大亚湾核电站临近海域第一优势群体, 在渔获物中所占比重超 99%。因此, 其资源密度的估算可参照单一种类海洋渔业资源声学评估方法, 其计算公式为:

$$\rho = \frac{NASC}{4\pi \cdot \sigma_{bs}} \cdot W \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

$$\overline{\sigma_{bs}} = 10^{TS/10} \quad (2)$$

$$TS = A \left[\frac{\log_{10}(BkL)}{BkL} \right]^C + D(kL)^6 + E(kL)^5 + F(kL)^4 + G(kL)^3 + H(kL)^2 + I(kL) + J + 20 \log_{10} \left(\frac{L}{L_0} \right) \quad (3)$$

式中, ρ 为中国毛虾生物量密度(kg/n mile²); NASC 为海里面积声学反向散射系数(m²/n mile²); W 为中国毛虾个体平均体重(g/ind); $\overline{\sigma_{bs}}$ (back-scattering cross-section)为中国毛虾反向散射截面(m²); TS(target strength)为中国毛虾目标强度, 其计算方法参照南极磷虾目标强度声学模型 SDWBA (stochastic distorted wave born approximation)^[15], 其中 $A \sim J$ 为模型系数, L 为样本体长, L_0 为参考体长, k 为脉冲数(取值为 1)。由于各网次中国毛虾抽样体长分布基本一致, 因此不同网次中国毛虾平均反向散射截面取同一值。

1.4.2 扫海面积法 基于中国毛虾拖网调查数据, 其生物量密度(kg/n mile²)可根据扫海面积法获得, 计算公式为:

$$B = Y/A(1-E) \tag{4}$$

式中, B 为中国毛虾生物量密度(kg/n mile²); Y 为单位时间渔获质量(kg/h); A 为单位时间扫海面积(n mile²/h); E 是逃逸率, 基于中国毛虾自游泳能力较弱, 且网具捕捞效率较高, 本研究中逃逸率设置为 10%。

2 结果与分析

2.1 渔获组成与分析

大亚湾核电取水口临近海域毛虾拖网调查渔获物结果表明, 中国毛虾为调查期间该海域绝对优势物种。除第 5 网次渔获物中含少量双生水母(*Diphyes chamissonis*)和数量极少的几尾静蝠(*Secutor insidiator*)和丽叶鲙(*Caranx kalla*)外, 其他网次渔获物全部为中国毛虾。各网次中国毛虾总生物量在 0.84~131.60 kg 之间, 平均生物量约 45.42 kg。生物学测量结果显示, 调查期间该海域中国毛虾体长范围在 17~32 mm 之间, 平均体长为 24 mm; 体重范围在 0.03~0.24 g, 个体平均体重约为 0.09 g。调查海域中国毛虾体长-体重关系为: $W=0.0069L^{2.9268}$ ($n=217, R^2=0.6413$)。

2.2 中国毛虾资源密度评估

在假定逃逸率为 10%的情况下, 根据扫海面积法, 调查期间该海域各网次中国毛虾生物量密度在 1885.45~182792.40 kg/n mile²(表 1), 平均生物量密度约为 69060.03 kg/n mile²。基于南极磷虾

(*Euphausia superba*)目标强度(SDWBA)计算模型, 则该海域中国毛虾反向散射截面 σ_{bs} 约为 $2.16 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 。在此基础上, 采用回波积分法计算可知, 调查期间该海域中国毛虾生物量密度在 959.28~76754.14 kg/n mile²(表 1), 平均生物量密度约为 31042.64 kg/n mile²。可见, 调查海域中国毛虾生物量密度声学评估结果明显低于扫海面积法评估结果, 约为后者的 1/2; 但二者表现出相同的变化趋势。

表 1 两种不同方法中国毛虾生物量密度估算
Tab. 1 Biomass density estimation of Acetes chinensis in two different methods

网次 net number	生物量密度/(kg/n mile ²) biomass density	
	拖网 trawl	声学 acoustics
1	1885.45	959.28
2	28285.09	14467.34
3	17285.33	8154.12
4	46670.4	21252.92
5	182792.40	76754.14
6	152651.10	69125.94
7	53850.46	26584.74

2.2 中国毛虾资源变动规律

大亚湾核电取水口临近海域中国毛虾声学原位观测结果如图 3 所示, 不同时段(19:00—7:00)中国毛虾海里面积反向散射系数(NASC)在 0.56~170.30 m²/n mile²之间波动, 其均值为 39.80 m²/n mile²。整体上, 中国毛虾 NASC 在夜间表现出先

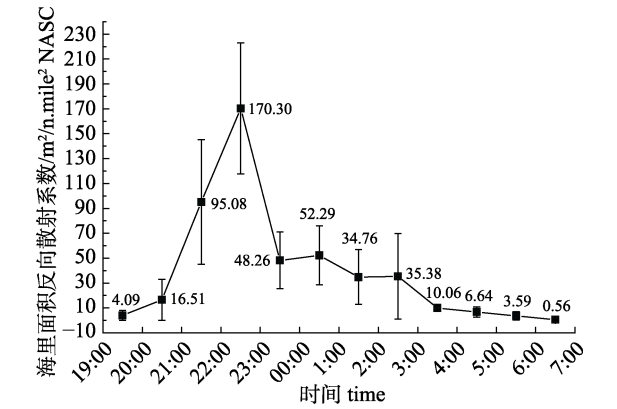


图 3 声学原位观测位点不同时段中国毛虾 NASC 变化规律

Fig. 3 NASC variations of Acetes chinensis in different periods at the acoustic in situ detection site

增大后减小的变化趋势。以 10 min 为基本声学积分单元, 声学原位观测位点中国毛虾 NASC 在 22:30—22:40 有最大值 $232.14 \text{ m}^2/\text{n mile}^2$, 在回波映像中表现出高度聚集的群体特征; 在 6:50—7:00 有最小值 $0.37 \text{ m}^2/\text{n mile}^2$, 此时中国毛虾在回波映像中主要以分散或较小群体形式出现。

2.3 中国毛虾时空分布特征

2.3.1 水平分布 以 500 m 为基本声学积分单元,

调查海域中国毛虾昼间(8:00—20:00)NASC 在 $0.59\sim63.97 \text{ m}^2/\text{n mile}^2$, 其均值为 $16.15 \text{ m}^2/\text{n mile}^2$; 其中, 声学原位观测位点中国毛虾昼间 NASC 值约为 $0.84 \text{ m}^2/\text{n mile}^2$ 。不同断面(transects 1~10)中国毛虾 NASC 在 $3.52\sim42.38 \text{ m}^2/\text{n mile}^2$; 其空间分布特征如图 4 所示: 沿纬度方向上(A 方向)大体呈稳步增大的变化趋势, 但沿经度方向上(B 方向)并未表现出明显的空间分布特征。

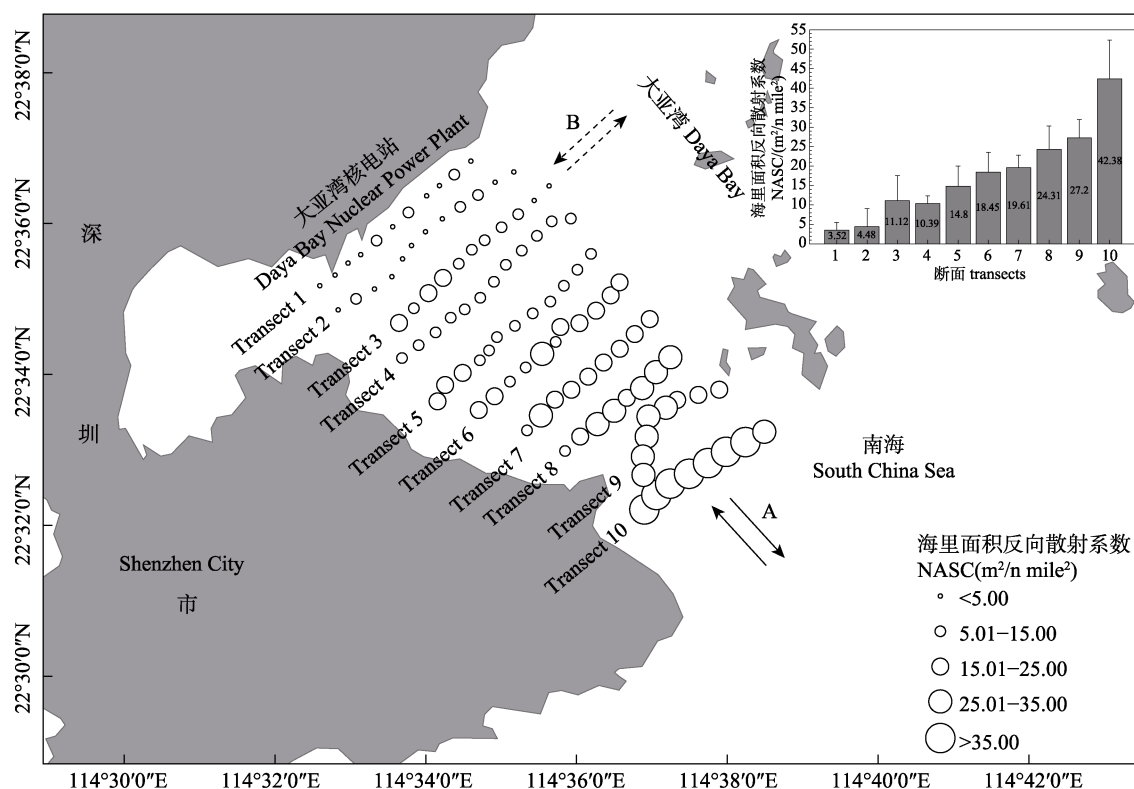


图 4 大亚湾核电站临近海域中国毛虾昼间水平分布特征

Fig. 4 The diurnal horizontal distribution pattern of *Acetes chinensis* near the Daya Bay Nuclear Power Plant

2.3.2 垂直分布 根据声学探测结果, 调查海域水深范围在 5.05~18.33 m, 区域平均水深为 13.25 m, 且各断面平均水深由湾内至湾口逐渐增加。调查海域声学积分起始水层设置为海表 1.2 m 以下至海底 0.3 m 之上, 以减小海表声学探测盲区、船舶噪声、波浪及海底非目标信号对声学评估结果的影响。在垂直方向上, 以 1 m 为基本积分单元, 各断面不同水层中国毛虾分布特征基本一致(图 5), 整体表现出随水深的增加, 其 NASC 值大致呈先增后减的变化趋势。由此可知, 调查海域中国毛

虾在白天主要栖息于中下层或近底层水域, 但各断面底层水域其 NASC 值明显低于其临近水层。

此外, 声学原位观测位点不同时段中国毛虾垂直分布特征如图 6 所示: 整体上, 中国毛虾 NASC 在中下层水域(5.2~7.2 m)所占比重明显高于其他水层, 该结果与各断面中国毛虾昼间垂直分布特征基本一致。但在个别时段, 如 22:50—00:10 期间, 中国毛虾 NASC 在 7.2~8.2 m 水层所占的比重大幅增加, 而 5.2~6.2 m 水层所占比重明显减小, 说明在此期间中国毛虾有向底层迁移的趋势。

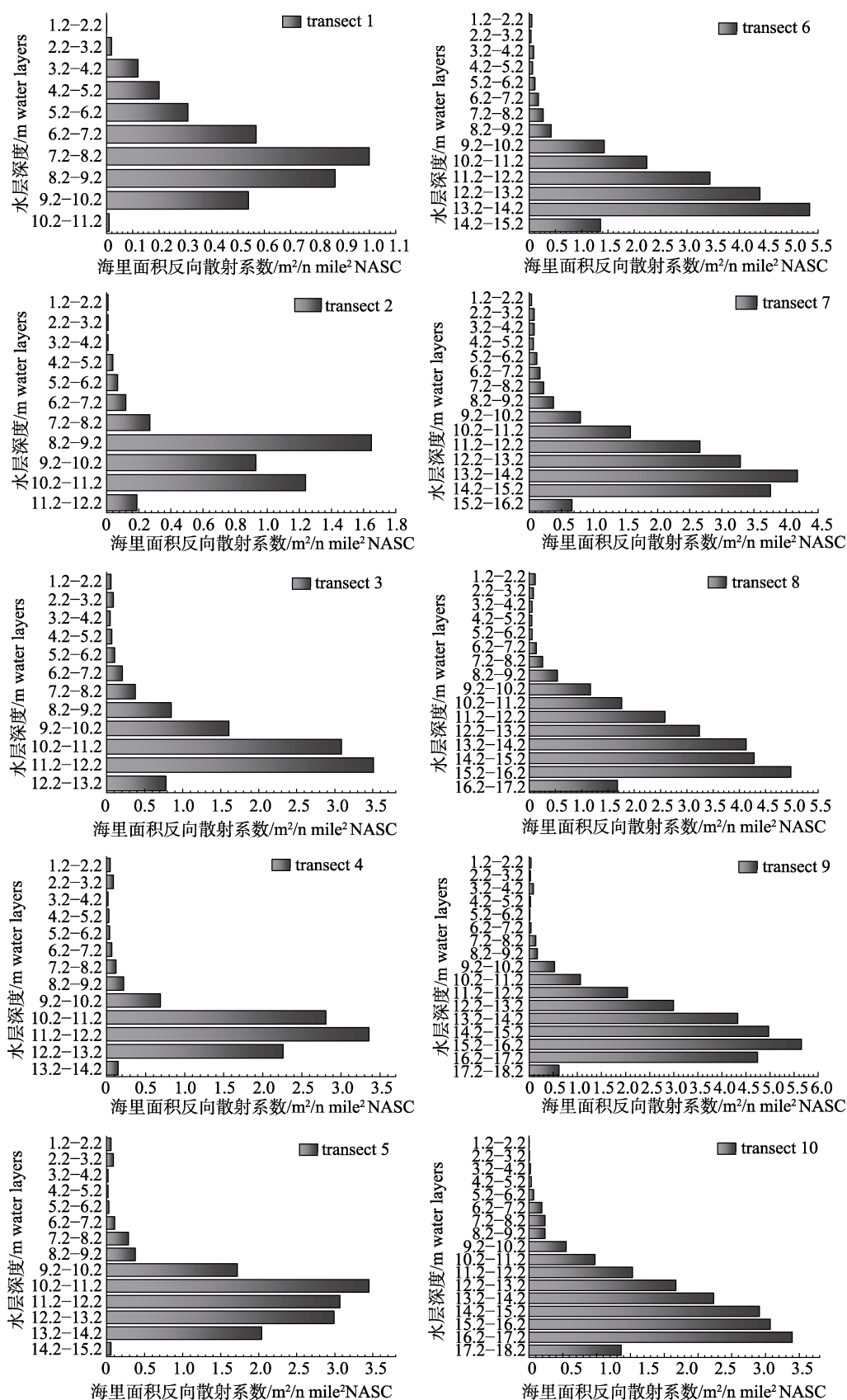


图 5 各断面不同水层中国毛虾昼间垂直分布特征

Fig. 5 The diurnal vertical distribution pattern of *Acetes chinensis* at different water layers of each transect

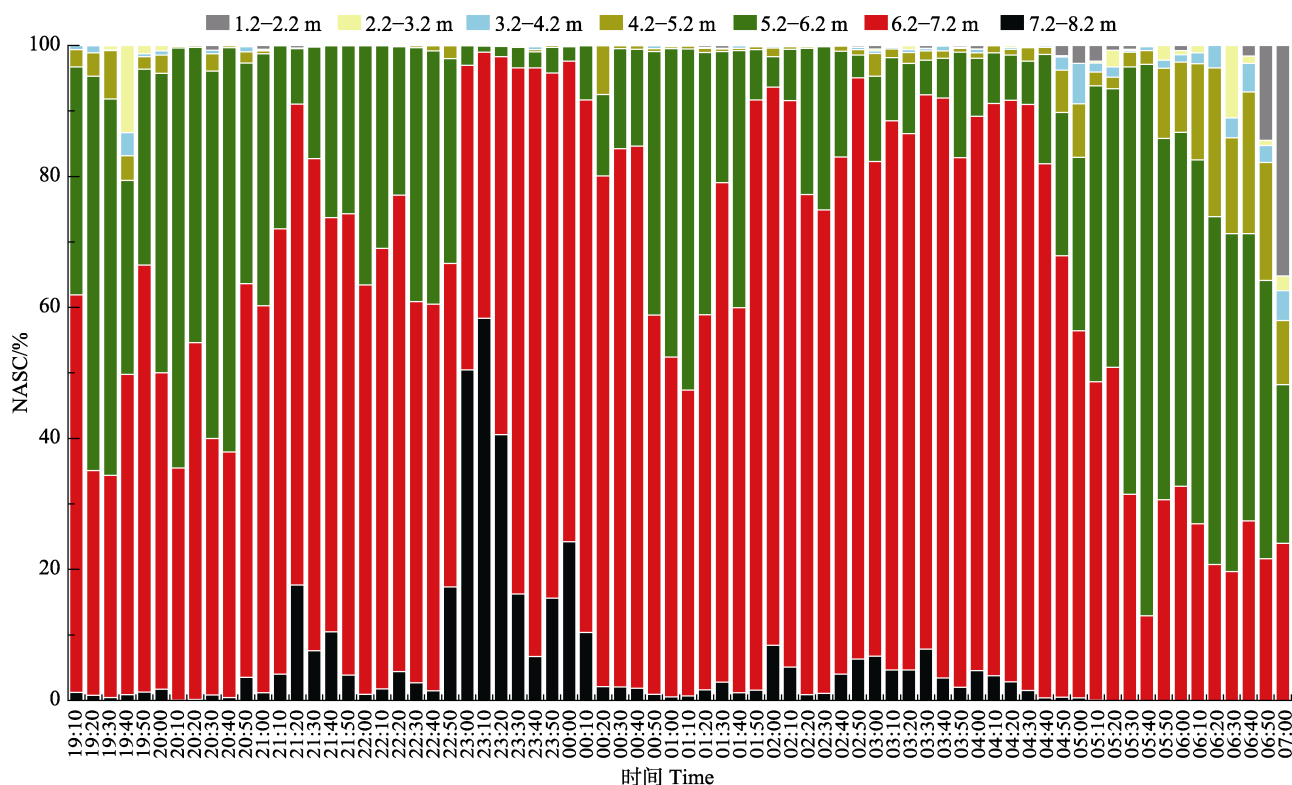


图 6 声学原位观测位点不同时段中国毛虾垂直分布规律

Fig. 6 The vertical distribution pattern of *Acetes chinensis* in different time periods at the acoustic in situ detection site

3 讨论

3.1 不同方法中国毛虾资源评估结果的比较

相关研究指出,受捕捞效率、水域环境、目标识别等诸多因素的影响,渔业资源声学评估结果与传统的渔获物调查分析结果之间往往存在不同程度的偏差^[16]。扫海面积法作为拖网渔业资源评估的主要方法,其结果取决于渔获率 Y 和逃逸率 E 之间的比例关系。而渔获率往往受网具类型、规格、水域环境及水生生物行为特征等诸多因素的影响^[17-19]。通过多种渔业方式对比分析发现,拖网捕捞作为一种主动的渔捞方法,较定置网、刺网等表现出更高的捕捞效率和较低的物种选择性^[20-21]。调查海域渔业资源的组成分析主要基于底拖网渔获物。

研究发现,中国毛虾在该海域渔获物组成中占 99% 以上,且最大渔获率达 493.5 kg/h。上述结果表明,毛虾专用底拖网作业对于该海域中国毛虾具有极高的捕捞效率。然而,由于拖网渔获物中水分含量较高,从而使渔获率评估结果偏高。

本研究底拖网作业所用网具为虾拖网,网口宽度为 5 m,网口高度为 4.87 m,网口规格仅 3 mm,因而其取样水层为近底层 5 m 左右的深度范围,仅基于该水层拖网渔获物扫海面积法评估结果与真实结果存在一定差异。相关研究表明,复杂的水域生态环境往往能为水生生物提供较好的庇护场所,从而降低其被捕食/捕获的概率^[22]。调查海域主要优势种类中国毛虾自游泳能力较弱;而该海域受中央列岛环流的影响,水流相对较急^[23],因而中国毛虾逃逸率较低。本研究中,逃逸率取值为 0.1 可能是影响中国毛虾扫海面积法评估结果的另一因子。此外,扫海面积法采用随机抽样调查的方式,当随机抽样结果之间存在较大差异,且样本数较少时,其评估结果亦可能存在较大偏差。本研究中,各网次扫海面积法评估结果差异较大(1885.45~182792.40 kg/n mile²),应尽量增加样本数以减小随机抽样产生的误差。

声学评估作为海洋渔业资源评估的另一有效方法,其结果亦受诸多因素的影响^[24-26]。本研究中,声学积分终止水深设置在海底 0.3 m 之上,而

根据声学原位观测结果(图 7),拖网调查时段中国毛虾有向底层迁移的运动趋势,故贴近海底的目标不在声学积分范围之内,在一定程度上可能使 NASC 评估结果偏低^[27-28]。相关研究表明,游泳生物大规模聚集所产生的遮蔽效应往往会导致声学评估结果偏低^[29]。根据 Sv 回波映像的识别与水下视频观测结果,大亚湾核电站取水口临近海域拖网调查时段中国毛虾主要以集群形式存在,从而使声学评估结果偏低。然而,游泳生物的聚集程度与遮蔽效应之间的数学关系目前尚不明确,因而有关种群聚集对声学评估结果所产生的影响仍无法量化分析。此外,声学反射系数是将声学回波积分值转换为资源密度的关键参数^[30-31]。本研究中,中国毛虾声学反射系数的计算主要依据南极磷虾目标强度 SDWBA 模型,从而使调查海域中国毛虾生物量密度声学评估结果存在一定偏差。我国在游泳生物目标强度理论基础研究方面仍相对落后,建议加强相关方面的研究以提高渔业资源声学评估结果的准确性。

本研究分别应用了声学评估法和扫海面积法对大亚湾核电站临近海域中国毛虾生物量密度进

行了评估与分析,结果表明:拖网调查海域中国毛虾平均生物量密度声学评估结果($31042.64 \text{ kg/n mile}^2$)明显低于扫海面积法计算结果($69060.03 \text{ kg/n mile}^2$)。进一步研究发现,调查海域声学评估结果与扫海面积法评估结果之间存在如下线性关系 $Y=2.3419X-3640.3$, ($n=7$, $R^2=0.996$); 式中, Y 为扫海面积法评估结果, X 为声学评估结果。但拟合样本数($n=7$)较少,应进一步增大抽样数以优化该拟合结果,从而实现声学评估结果与拖网调查结果之间的相互转化,增加评估结果的可信度。

3.2 中国毛虾分布特征与迁移规律声学探究

目前,有关中国毛虾的研究主要包括生物学特征、渔业生产及渔情预报等方面^[32-34]。有关中国毛虾时空分布特征的研究相对较少,仅曾现英等^[33]研究了渤海湾、莱州湾中国毛虾季节分布特征。以上研究均基于传统的渔业调查手段,声学评估方法应用于中国毛虾时空分布特征的研究至今未见报道。声学方法早在 20 世纪 70 年代便开始应用于渔业领域,现已成为海洋生物资源评估的重要手段之一^[36]。本研究采用声学原位观测与走航探测的方法对大亚湾核电站临近海域中国毛虾的时空分布特征与资源动态规律进行了深入分析。研究发现,中国毛虾在垂直方向上主要分布于近底层水域(图 5),且在夜间有短暂的垂直迁移趋势(图 6)。在水平空间上,从湾内向湾口海域沿纬度方向上中国毛虾 NASC 值逐渐增大(图 4)。在时间跨度上,声学原位观测位点中国毛虾 NASC 值大致呈先增加后减小的变化趋势(图 3),且该区域白天(约 13:00)声学走航探测结果($\text{NASC}=0.84 \text{ m}^2/\text{n mile}^2$)明显低于夜间($\text{NASC}_{22:30-22:40}=232.14 \text{ m}^2/\text{n mile}^2$)。水下视频观测结果显示,中国毛虾在夜间集群分布于近底水层,且在白天并未藏匿于海底岩石缝隙中(图 7),说明中国毛虾资源密度的昼夜差异主要来源于水平迁移,而非垂直迁移或栖息地庇护效应。综上分析可知,调查海域中国毛虾在 A 方向上(图 4)有明显的昼夜迁移特征,具体表现为:在夜间 19:00—23:00 期间向湾内迁移,之后向湾口外海域迁移。为进一步确认该水平迁移规律,下一步将在大亚湾核电站取水口临近海域及湾口海域开展同步声学原位观测



图 7 不同时段中国毛虾水下视频观测
Fig. 7 Underwater video observation of *Acetes chinensis* in different time periods

实验。该研究结果可从时间和空间层面上为大亚湾核电站冷源安全的防控与预警提供了理论支撑。一方面, 建议在大亚湾湾口海域于日落时分进行拦网打捞以切断其迁移路径; 另一方面, 建议于中国毛虾大规模聚集时期(21:00—0:00)在核电站取水口附近集中打捞以增大捕捞效率。

声学方法应用于大亚湾核电站典型致灾生物中国毛虾的资源评估与时空分布研究, 较传统网具调查、目视调查等方法具有科学、高效、直观、对资源环境损害小且能提供实时监测数据等诸多优点, 为大亚湾核电站典型致灾生物中国毛虾的综合监测与预警防控技术的研发提供了新的思路。然而, 对于大亚湾核电站典型致灾生物中国毛虾空间分布特征与定向迁移规律的诱发机制目前尚不明确。相关研究表明, 中国毛虾在时空尺度上的分布特征与迁移规律受气候、水文、生理特征及人类活动等诸多因素的影响^[37-38]。曾现英等^[33]研究发现, 中国毛虾为广温广盐性生物, 其季节分布特征主要受温度的调控, 而盐度对中国毛虾季节分布的影响只是在最适温度条件下才有明显表现。根据大亚湾核电站水环境长期在线监测结果, 当该海域水温在 18℃左右时, 中国毛虾大规模暴发。根据声学原位观测结果, 调查期间中国毛虾 NASC 峰值高达 232.14 m²/n mile², 期间该海域底层水温在 18.7~19.1℃。综上分析可知, 水温是调节中国毛虾资源变动的重要因素之一。此外, 中国毛虾自游泳能力较弱, 在水平空间上的运动能力十分有限, 基本属于随波逐流型, 其时空分布特征与昼夜迁移规律很可能与调查海域水流特征相关。由于本研究缺乏相应的理化环境数据, 对于影响大亚湾核电站临近海域中国毛虾时空分布特征与定向迁移规律的主要生物/非生物因子尚待进一步研究。

参考文献:

- [1] Azila A, Chong V C. Multispecies impingement in a tropical power plant, Straits of Malacca[J]. Marine Environmental Research, 2010, 70(1): 13-25.
- [2] Kumar S B, Mohanty A K, Das N P I, et al. Impingement of marine organisms in a tropical atomic power plant cooling water system[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 124(1): 555-562.
- [3] Zhang C W, Guan C J, Xu P, et al. Analysis on risk organisms for the cold source water of nuclear power plant in the eastern waters of Liaodong bay[J]. Marine Environmental Science, 2019, 38(1): 44-48. [张朝文, 关春江, 徐鹏, 等. 辽东湾东部海域核电冷源取水区的风险生物分析[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(1): 44-48.]
- [4] Zhang F, Li C L, Sun S, et al. Progress on studying jellyfish bloom, and the monitoring and control[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(6): 1187-1195. [张芳, 李超伦, 孙松, 等. 水母灾害的形成机理、监测预测及防控技术研究进展[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1187-1195.]
- [5] Wu L J, Gao S, Bai T. Review on the migration mechanisms of large jellyfish and techniques of the monitoring, forecasting, and warning of jellyfish disaster[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): 3103-3107. [吴玲娟, 高松, 白涛. 大型水母迁移规律和灾害监测预警技术研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 3103-3107.]
- [6] Tessier A, Pastor J, Francour P, et al. Video transects as a complement to underwater visual census to study reserve effect on fish assemblages[J]. Aquatic Biology, 2013, 18(3): 229-241.
- [7] Prato G, Thiriet P, di Franco A, et al. Enhancing fish underwater visual census to move forward assessment of fish assemblages: An application in three Mediterranean Marine Protected Areas[J]. PLoS ONE, 2017, 12(6): e0178511.
- [8] Edgar G J, Barrett N S, Morton A J. Biases associated with the use of underwater visual census techniques to quantify the density and size-structure of fish populations[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2004, 308(2): 269-290.
- [9] Koslow J A. The role of acoustics in ecosystem-based fishery management[J]. ICES Journal of Marine Science, 2009, 66(6): 966-973.
- [10] Barbeaux S J, Horne J K, Ianelli J N. A novel approach for estimating location and scale specific fishing exploitation rates of eastern Bering Sea walleye pollock (*Theragra chalcogramma*)[J]. Fisheries Research, 2014, 153: 69-82.
- [11] Aglen A. Random errors of acoustic fish abundance estimates in relation to the survey grid density applied[R]. Rome: FAO Fisheries Report, 1983: 293-298.
- [12] Higginbottom I, Woon S, Schneider P. Hydroacoustic Data Processing for Standard Stock Assessment Using Echoview: Technical Manual[M]. Rome: FAO/AdriaMed, 2008: 20-61.
- [13] Parkerstetter S L, Rudstam L G, Sullivan P J, et al. Standard Operating Procedures for Fisheries Acoustic Surveys in the Great Lakes[M]. Ann Arbor: Great Lakes Fishery Commission, 2009: 103-146.
- [14] de Robertis A, Higginbottom I. A post-processing technique to estimate the signal-to-noise ratio and remove echosounder background noise[J]. ICES Journal of Marine Science, 2007, 64(6): 1282-1291.
- [15] Xu L X, Wang T, Zhu G P, et al. Method for biomass estimation of Antarctic krill (*Euphausia superba*): A review[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(5): 187-195. [许柳雄,

- 王腾, 朱国平, 等. 南极磷虾生物量估算方法[J]. 水产学报, 2018, 42(5): 187-195.]
- [16] Guillard J, Simier M, Albaret J J, et al. Fish biomass estimates along estuaries: A comparison of vertical acoustic sampling at fixed stations and purse seine catches[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 107: 105-111.
- [17] Neilson J D, Clark D, Melvin G D, et al. The diel-vertical distribution and characteristics of pre-spawning aggregations of pollock (*Pollachius virens*) as inferred from hydroacoustic observations: the implications for survey design[J]. ICES Journal of Marine Science, 2003, 60(4): 860-871.
- [18] Su X H, Shen C C, Hong M J, et al. Application of correspondence analysis to efficiency analysis of trawl industry in Fujian Province[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2007, 14(3): 444-449. [苏新红, 沈长春, 洪明进, 等. 对应分析在福建拖网捕捞影响因素分析中的应用[J]. 中国水产科学, 2007, 14(3): 444-449.]
- [19] Guan W J, Chen X J, Gao F, et al. Environmental effects on fishing efficiency of *Scomber japonicus* for Chinese large lighting purse seine fishery in the Yellow and East China Seas[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(6): 949-958. [官文江, 陈新军, 高峰, 等. 海洋环境对东、黄海鲈鱼灯光围网捕捞效率的影响[J]. 中国水产科学, 2009, 16(6): 949-958.]
- [20] Zhang J, Sun M C, Peng Y Z, et al. Separating efficiency of separator panels rigged in beam trawls for shrimps[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15(5): 845-852. [张健, 孙满昌, 彭永章, 等. 桁拖网渔具分隔网片对虾类的分隔效率[J]. 中国水产科学, 2008, 15(5): 845-852.]
- [21] Říha M, Jůza T, Prchalová M, et al. The size selectivity of the main body of a sampling pelagic pair trawl in freshwater reservoirs during the night[J]. Fisheries Research, 2012, 127-128: 56-60.
- [22] Guo S X, Gao D K, Zhang X M, et al. Species composition and distribution patterns of ichthyoplankton within and outside artificial reefs in Qingshan Bay, Qingdao, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(6): 1984-1992. [郭书新, 高东奎, 张秀梅, 等. 青岛崂山青山湾人工鱼礁区及附近海域鱼卵仔稚鱼种类组成与数量分布[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1984-1992.]
- [23] Wang C, Lin J, Chen P M, et al. Numerical simulation on water exchange in Daya Bay[J]. South China Fisheries Science, 2008, 4(4): 8-15. [王聪, 林军, 陈丕茂, 等. 大亚湾水交换的数值模拟研究[J]. 南方水产科学, 2008, 4(4): 8-15.]
- [24] Guillard J, Albaret J J, Simier M, et al. Spatio-temporal variability of fish assemblages in the Gambia Estuary (West Africa) observed by two vertical hydroacoustic methods: Moored and mobile sampling[J]. Aquatic Living Resources, 2004, 17(1): 47-55.
- [25] Watkins J L, Reid K, Ramm D, et al. The use of fishing vessels to provide acoustic data on the distribution and abundance of Antarctic krill and other pelagic species[J]. Fisheries Research, 2016, 178: 93-100.
- [26] Linhart P, Šálek M. The assessment of biases in the acoustic discrimination of individuals[J]. PLoS ONE, 2017, 12(5): e0177206.
- [27] Scalabrin C, Marfia C, Boucher J. How much fish is hidden in the surface and bottom acoustic blind zones?[J]. ICES Journal of Marine Science, 2009, 66(6): 1355-1363.
- [28] Zeng L, Chen G B, Yu J. Acoustic assessment of fishery resources and spatial distribution in Nan'ao Island area[J]. South China Fisheries Science, 2018, 14(2): 26-35. [曾雷, 陈国宝, 于杰. 南澳岛海域渔业资源声学评估与空间分布[J]. 南方水产科学, 2018, 14(2): 26-35.]
- [29] Toresen R. Absorption of acoustic energy in dense herring schools studied by the attenuation in the bottom echo signal[J]. Fisheries Research, 1991, 10(3-4): 317-327.
- [30] Gastauer S, Fässler S M M, Couperus B, et al. Target strength and vertical distribution of smelt (*Osmerus eperlanus*) in the IJsselmeer based on stationary 200 kHz echosounder recordings[J]. Fisheries Research, 2013, 148: 100-105.
- [31] Li B, Li P J, Tang Y, et al. Acoustic survey of the fisheries resources in the main channel of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(8): 1134-1143. [李斌, 李佩杰, 汤勇, 等. 黄河小浪底水库主河道水域渔业资源声学评估[J]. 水产学报, 2015, 39(8): 1134-1143.]
- [32] Zhang M H. Studies on the methods of forecasting fishing conditions for *Acetes chinensis* near the Yellow River mouth[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1986(4): 70-76. [张孟海. 黄河口附近海区毛虾渔情预报方法的研究[J]. 海洋湖沼通报, 1986(4): 68-76.]
- [33] Zhong C J, Zeng X Q, Ren Y P, et al. Study on the fishery biology of the *Acetes chinensis* hansen caught in coastal waters of Laizhou Bay and Huanghe estuary[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2001(1): 31-36. [仲崇峻, 曾晓起, 任一平, 等. 莱州湾、黄河口水域毛虾渔业生物学特征的研究[J]. 海洋湖沼通报, 2001(1): 31-36.]
- [34] Zheng J, Wang C, Wang H, et al. Optimal design of northern maotia shrimp (*Acete chinensis*) stow net in coastal region of the East China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(12): 1894-1903. [郑基, 王陈, 王皓, 等. 东海区中国毛虾张网网具的优化设计[J]. 水产学报, 2015, 39(12): 1894-1903.]
- [35] Zeng X Y, Wu N. The relationship between seasonal distribution of *Acete chinensis* and environmental factors in Bohai Bay and Laizhou Bay[J]. Hebei Fisheries, 2016(9): 15-16, 28. [曾现英, 吴宁. 渤海湾、莱州湾毛虾季节分布与环境因子的关系[J]. 河北渔业, 2016(9): 15-16, 28.]
- [36] Zhang J, Jiang Y E, Chen Z Z, et al. Preliminary study on the nautical area scattering coefficient and distribution of mesopelagic fish species in the central-southern part of the South China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(1): 120-135. [张俊, 江艳娥, 陈作志, 等. 南海中南部中层鱼资源声学积分值及时空分布初探[J]. 中国水

产科学, 2017, 24(1): 120-135.]

- [37] Jiang R, Guo B T. Meteorological factors affecting shrimp yield along the coast of Fujian Province[J]. Marine Science Bulletin, 1983, 2(1): 69-74. [江仁, 郭宝天. 福建沿海毛虾产量变动与气象因子的关系[J]. 海洋通报, 1983, 2(1):

69-74.]

- [38] Zhang M H. Reproductive characteristics of *Acetes chinensis* in Bohai and Laizhou Bay[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1992(2): 58-67. [张孟海. 渤海湾 莱州湾毛虾的生殖特性[J]. 海洋湖沼通报, 1992 (2): 58-67.]

Acoustic detection and analysis of *Acetes chinensis* in the adjacent waters of the Daya Bay Nuclear Power Plant

ZENG Lei^{1, 2, 3, 4}, CHEN Guobao^{1, 2, 3, 4}, WANG Teng^{1, 2, 4}, YANG Bingzhong^{1, 2, 4}, YU Jie^{1, 2, 3, 4}, LIAO Xiuli^{1, 2, 4}, HUANG Honghui^{1, 2, 4}

1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangzhou 510300, China;
3. Key Laboratory of Marine Ranch Technology, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;
4. Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, China

Abstract: To provide a new option for the early warning, prevention, and control of the typical disaster-causing organism *Acetes chinensis* in the adjacent waters of Daya Bay Nuclear Power Station, an acoustic method, supplemented by a trawl survey and underwater video observation methods, was used to study the dynamics, spatial distribution characteristics, and migration trend of *A. chinensis* in the survey area from January 11 to 14, 2019. As a result, *A. chinensis* accounted for more than 99% of the captures collected by trawl samples, along with only a very few jellyfish and fish. Biomass density of *A. chinensis* estimated by the traditional sweeping area method was significantly higher than that derived from acoustic assessment. They showed a linear regression relationship: $Y=2.3419X-3640.3$ (Y depicts the result estimated by the traditional sweeping area method and X depicts the result derived from the acoustic assessment). According to in situ acoustic detection, the density of *A. chinensis* resources fluctuated greatly in different periods ($0.56-170.30 \text{ m}^2/\text{n mile}^2$). This showed a general trend of first increasing and then decreasing, with the highest value during 22:30–22:40. In the vertical direction, *A. chinensis* was mainly distributed in the middle and lower waters at 5.2–7.2 m, and there was a clear downward migration trend from 22:50 to 00:10. In the horizontal direction, the biomass densities of *A. chinensis* in different transects increased gradually from the inside to the mouth of Daya Bay. Combined with dynamic regulation and the underwater video observations of *A. chinensis* resources in different time periods, it was likely that the *A. chinensis* would migrate into Daya Bay during 19:00–23:00, and then move back to the mouth of Daya Bay after 23:00. To further confirm this inference, in situ acoustic detection experiments should be conducted simultaneously in the adjacent waters of the Daya Bay Nuclear Power Plant and the mouth of Daya Bay, and the biotic and abiotic environmental factors, such as feed organisms, water temperature, salinity, and current among other factors should be considered comprehensively to further explore the driving mechanism of the horizontal migration of *A. chinensis*. In conclusion, compared with traditional investigation methods, the acoustic method has many advantages, such as scientific, efficient, and real-time monitoring. Therefore, it can better meet the practical needs of early warning, prevention, and control of cold source biosafety in the Daya Bay Nuclear Power Plant.

Key words: Daya Bay Nuclear Power Plant; *Acetes chinensis*; resources dynamic; spatial distribution; acoustic assessment

Corresponding author: HUANG Honghui. E-mail: huanghh@scsfri.ac.cn