



· 综述 ·

回声探测浮标在金枪鱼围网渔业中的应用

周成^{1,2,3,4}, 肖宇¹, 万荣^{1,2,3,4*}, 许柳雄^{1,2,3,4}, 王禹程¹,
谢程兰⁵, 肖俞辰¹

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学, 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306;

4. 上海海洋大学, 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306;

5. 中国水产有限公司, 北京 100160)

摘要: 回声探测浮标能够远程为金枪鱼围网渔业持续地提供漂流人工集鱼装置 (DFADs) 的精确地理定位以及金枪鱼集群生物量的估计, 有效减少围网船队搜索鱼群所产生的“碳足迹”和船队运营成本, 从而提高船队的成功捕获率。除了在商业中的应用外, 回声探测浮标有潜力作为观察远洋生物多样性的科学平台, 为科学研究提供描述远洋鱼类活动模式的数据来源。本文介绍了 DFADs 的定义、类型和结构、生态影响及相关管理措施, 以及回声探测浮标的发展沿革、种类和数据结构, 并重点从金枪鱼随附鱼群生物量评估、鱼群随附行为和 DFADs 生态影响评估方面回顾了回声探测浮标在金枪鱼围网渔业中的应用。本文展望了回声探测浮标今后在技术上支持降低非目标物种和目标物种幼鱼死亡率的发展趋势, 并从渔业资源可持续管理和海洋生物多样性保护方面讨论了利用浮标观测数据结合渔业数据进行资源评估, 以及探究气候变化和人类活动对海洋生态系统影响的巨大潜力。

关键词: 金枪鱼; 回声探测浮标; 漂流人工集鱼装置; 围网; 生物量评估; 生态影响

中图分类号: S 973.1

文献标志码: A

金枪鱼围网渔业是通过围网网具捕捞栖息于表层和混合层的金枪鱼随附鱼群和自由鱼群的一种捕捞作业方式, 其主要捕捞对象为鲣 (*Katsuwonus pelami*)、黄鳍金枪鱼 (*Thunnus albacores*) 和大眼金枪鱼 (*T. Obesus*)。随着围网捕捞技术的发展和人工集鱼装置 (fish aggregating devices, FADs) 的应用, 金枪鱼围网渔业产量在整个金枪鱼渔业中的产量占比逐渐增长达到 50% 以上^[1-2]。漂流人工集鱼装置 (drifting fish aggregating devices,

DFADs) 是源于金枪鱼偏好在自然漂流物体附近聚集的行为特征发展而来, 在 20 世纪 80 年代, 日本围网船队首先在中西太平洋赤道海域利用金枪鱼的这种行为特性, 采用围网技术捕捞随附于自然漂流物的金枪鱼鱼群^[3-4]。20 世纪 90 年代以来, 世界各国围网作业船队开始大量制作并投放 DFADs, 使金枪鱼围网渔业捕捞效率得到了极大的提升。目前, DFADs 每年在中西太平洋海域实际部署的数量达上万个, 基于 DFADs 的金枪鱼围

收稿日期: 2022-04-01 修回日期: 2022-05-13

资助项目: 国家重点研发计划 (2019YFD0901502, 2020YFD0901202); 上海海洋大学科技发展专项 (A2-2006-22-200208)

第一作者: 周成 (照片), 从事金枪鱼围网渔业研究, E-mail: c-zhou@shou.edu.cn

通信作者: 万荣, 从事渔具理论与设计研究, E-mail: rwan@shou.edu.cn



网捕捞产量已达到金枪鱼围网渔业总产量的 54%^[5]。

近十多年来, 部署投放的 DFADs 基本均配备了回声探测浮标 (echo-sounder buoys)。围网作业船通过参考回声探测浮标的鱼探数据, 能够优化捕捞决策, 进一步提升捕捞效率^[6-7]。与此同时, 部署在 DFADs 上的回声探测浮标不仅在捕捞作业中发挥了重大作用, 在远洋鱼类的观测研究中也极具价值。回声探测浮标提供的声学探测数据能够成为科学分析的数据来源, 有助于提高对于 DFADs 随附鱼群随附行为的认识, 同时, 该数据也具有开发独立于渔业数据金枪鱼种群评估丰度指数的潜力^[8]。此外, DFADs 数量的急剧增加造成了一系列的海洋生态环境问题, 回声探测浮标能为评估 DFADs 的生态环境影响提供大数据支持, 相关数据可用于分析 DFADs 搁浅事件对海洋栖息地的影响^[9]、DFADs 实际部署数量估计、DFADs 导致的金枪鱼幼鱼高死亡率和非目标物种的兼捕问题等。

本文通过检索 Web of Science、Wiley、ScienceDirect、Springer 和 Google Scholar 等数据库中的期刊论文, 以及 4 个金枪鱼区域性渔业管理组织 (tuna Regional Fisheries Management Organizations, tRFMOs) 发布的信息报告和工作报告中有关金枪鱼围网渔业应用回声探测浮标的研究, 归纳、总结和评述了自 2008 年至今该领域的发展趋势, 为相关研究者把握研究前沿与方向提供参考。因此, 本文首先介绍 DFADs 的定义、结构类型和对海洋生态环境的影响, 以及部署在 DFADs 上的回声探测浮标的发展沿革、类型和浮标数据结构, 重点从 DFADs 金枪鱼鱼群生物量评估、鱼群随附行为

以及 DFADs 生态影响评估三个方面阐述回声探测浮标的应用研究进展, 并展望回声探测浮标的技术发展趋势和在渔业资源可持续管理和海洋生物多样性保护方面的潜在应用价值。

1 漂流人工集鱼装置

1.1 人工集鱼装置的定义

联合国粮食与农业组织 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 对于 FADs 的定义为“通过吸引并聚集鱼类, 以促进捕捞的任何方法、物体或结构, 并能够将某些集群性的鱼类聚集于此装置之下”^[10]。按照该定义, FADs 主要分为漂流人工集鱼装置和锚定式人工集鱼装置 (anchored fish aggregation devices, AFADs)。其中, DFADs 是渔民利用热带金枪鱼易随附于自然漂流物体的行为特征, 制作并投放用以聚集金枪鱼随附鱼群并提高其捕获量的漂浮物体。2015 年由皮尤慈善信托基金会 (Pew Charitable Trusts) 基于公开科学研究、行业专家以及船东报告发布的数据显示, 全球范围内金枪鱼渔船每年可能部署超过 10 万枚 DFADs^[11], 这些 DFADs 广泛分布在太平洋、印度洋和大西洋的热带海域^[10](图 1-a)。

1.2 DFADs 发展历史

DFADs 的部署及使用主要是源于金枪鱼偏好在漂流物体 (如原木、人造漂浮物、电缆线轴、板条箱、木托盘、废弃的货物等) 附近聚集的习性发展而来^[11]。20 世纪 80 年代, 日本渔民首先在中西太平洋赤道海域利用围网技术捕捞与自然漂流物相关的金枪鱼随附鱼群^[12]。90 年代初, 漂流人工

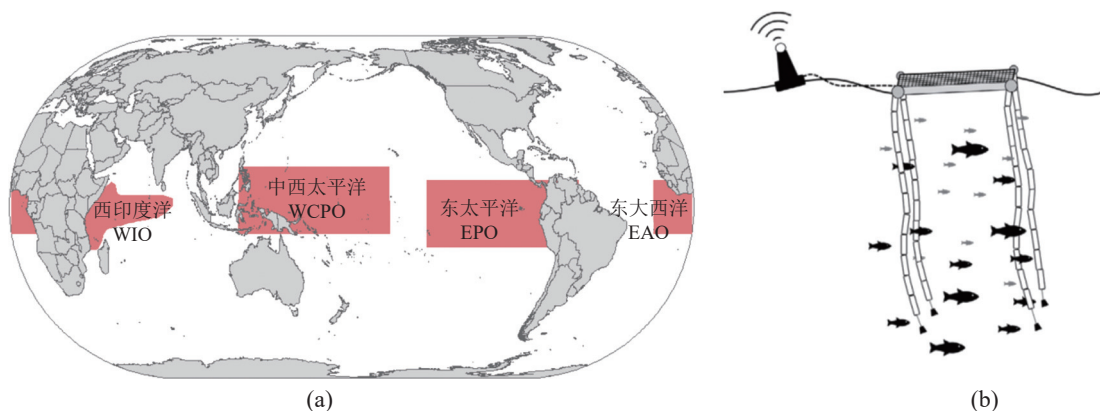


图 1 漂流人工集鱼装置主要分布海域 (a) 及结构示意图 (b)

Fig. 1 Distribution sea area of drifting fish aggregating devices (a) and schematic diagram of structure (b)

WIO. Western Indian Ocean, WCPO. Western and Central Pacific Ocean, EPO. Eastern Pacific Ocean, EAO. East Atlantic Ocean.

集鱼装置的设计形式已经比较统一, 主要结构由方形竹筏(约 1.5 m×1.5 m)组成, 筏体上面安装有无线电浮标, 筏体下面悬挂着不同结构的网片, 通常采用旧围网以增加水下的阴影面积, 并起到“引诱剂”的作用^[13-14](图 1-b)。90 年代中期后, DFADs 已成为围网船队捕获热带金枪鱼的重要手段, 随之而来的是各国的围网船队开始大规模部署 DFADs^[15-16]。

尽管当前不同国家和地区金枪鱼捕捞船舶制作投放的 DFADs 的材料大多不尽相同, 但总体而言, 目前流行的 DFADs 结构主要包括以下三个部分: 漂浮于水面的筏体、沉于水中的水下结构以及用于定位和传送信息的回声探测浮标^[10]。近年来, 由于 DFADs 大规模投放对海洋生态环境产生的负面影响, tRFMOs 通过了关于更改 DFADs 的结构以减小其对海洋生态环境影响的管理措施。因此, 自 2010 年以后, 依据 tRFMOs 对 DFADs 提出的设计规定和建议, 从以下两个方面重新划分 DFADs 的结构类型。根据水下结构的设计样式, DFADs 可分为非(低)缠绕型 DFADs [non (low)-entangling DFADs] 和缠绕型 DFADs (entangling DFADs), 其中, 非(低)缠绕型 DFADs 要求避免在筏体和水中结构中使用网片材料, 如使用网片材料, 网片的网目尺寸必须小于 7 cm, 或网片材料需紧紧捆绑成卷状, 该设计旨在降低鲨鱼、海龟等其他海洋物种被 DFADs 水下结构缠绕的风险^[17]。根据水下结构制作材料的不同, DFADs 又可分为可生物降解型 DFADs (biodegradable DFADs) 和非生物降解型 DFADs (non-biodegradable DFADs), 可生物降解型 DFADs 须由天然或可生物降解材料制成, 使用可降解材料的 DFADs 在 5~12 个月后逐渐开始降解, 其降解的产物不会对海洋生态环境产生负面影响^[18], 非生物降解型 DFADs 则使用不可降解材料制作 DFADs, 在海洋中被丢弃后需要数百年的时间才能降解^[17]。

1.3 DFADs 对海洋生态环境的影响及相关养护管理措施

当前, 投放使用的 DFADs 基本上都配备了回声探测浮标, 通过向围网作业渔船提供关于 DFADs 的精确位置以及 DFADs 下金枪鱼聚集情况与生物量信息, 能够有效缩短鱼群搜索时间, 优化捕捞策略^[19], 这些技术发展进一步提高了围网作业的捕捞效率^[20], 有效减少围网船队在海洋

中的“碳足迹”^[21]。

虽然 DFADs 的部署及使用能提高捕捞效率和降低作业渔船的燃料消耗, 但是大量投放的 DFADs 被认为对海洋生态系统产生一系列负面影响, 主要包括: ①大量兼捕海洋中上层物种, 可能扰乱中上层生态系统的平衡^[22]; ②增加了目标物种幼鱼的死亡率, 导致目标物种单位补充量产量降低^[23-24]; ③ DFADs 作为“生态陷阱”可能会影响金枪鱼的集群、摄食和洄游等行为特征, 影响其生长速率, 并威胁种群的健康发展^[25]; ④ DFADs 的丢失或遗弃可成为“幽灵网具”, 造成其他海洋生物的“幽灵捕捞 (ghost fishing)”^[26-27]; ⑤ DFADs 搁浅会对海洋底层生态系统造成破坏^[28]; ⑥ DFADs 材料的人工合成物可成为海洋垃圾, 其积累可造成污染^[26]。

目前, 全球 4 个主要的金枪鱼区域性渔业管理组织已逐步开始对 DFADs 的部署及使用提出相应的限制性管理措施^[29-31]。例如, 在印度洋海域, 印度洋金枪鱼委员会 (IOTC) 从 2011 年开始实施禁渔期措施, 规定在 0°~10°N、40°~60°E 海域禁止围网船队作业, 其时长为 1 个月^[32], IOTC 同时颁布了管辖区域内重建印度洋黄鳍金枪鱼种群的临时计划的第 16-01 号决议, 规定每艘渔船每次部署使用的 FAD 不超过 450 个^[33]。在大西洋海域, 大西洋金枪鱼养护国际委员会 (ICCTA) 颁布了关于热带金枪鱼养护和管理方案的第 15-01 号决议, 规定每艘渔船在任何时候部署使用的 DFADs 不超过 500 个^[34]。在中西太平洋海域, 2009 年中西太平洋渔业委员会 (WCPFC) 通过的大眼金枪鱼及黄鳍金枪鱼的养护与管理措施 CMM 2008-01 号决议首次提出, 在 DFADs 禁渔期, 禁止所有与 DFAD 相关的捕捞和部署活动^[35]。为降低鲨鱼、海龟等其他海洋生物被缠绕的风险, WCPFC 通过 CMM 2021-01 号决议, 提出在公约区部署或漂流到公约区的任何 DFADs 禁止使用网状结构的网衣, DFADs 水下结构只可使用非缠绕材料。为减少人工合成海洋垃圾的数量, WCPFC 鼓励在船队制作 DFADs 时逐步开始使用非塑料和生物可降解材料^[36]。在东太平洋海域, 自 2014 年以来美洲间热带金枪鱼委员会 (IATTC) 对金枪鱼的养护管理措施不断完善, 如通过了在公约海域实施 2~3 个月的禁渔期, 禁止 DFADs 捕捞作业活动, 同时规定每艘渔船在作业后应真实记载的 DFAD 数量, 并记录 DFAD 投放的位置和时间信息^[37]。

2 回声探测浮标

2.1 回声探测浮标发展沿革

从 20 世纪 80 年代末到 90 年代初, 带有无线电浮标的 DFADs 的引入开始逐渐提高了捕捞随附鱼群围网船队的单位捕捞努力量渔获量^[38], 部分捕捞金枪鱼自由鱼群的船队开始逐步转向捕捞 DFADs 下的随附鱼群。

进入 21 世纪后, 金枪鱼围网船队对 DFADs 日益增加的依赖性推动了浮标技术的发展。回声探测仪 (echo-sounder) 作为回声探测技术的主要探测工具, 开始逐步被引入金枪鱼围网渔业, 其工作原理是通过对声波发射后收到的目标回声的间隔时间、信号强弱和信号结构进行分析, 进而得到目标鱼群所处的深度、数量及分布情况等^[39]。如图 2, 第一代回声探测浮标于 2000 年被首次引入印度洋海域的金枪鱼围网船队, 至 2010 年, 性能更优的第二代回声探测浮标开始被三大洋热带海域的金枪鱼围网船队广泛使用^[40]。自 2012 年以来, 以多频回声探测浮标为代表的第三代回声探测浮标逐步推广使用, 从技术上为金枪鱼围网渔业探索选择性捕捞试验奠定了基础^[40]。

2.2 回声探测浮标类型

各国围网船队使用的回声探测浮标来源于不同的制造商, 当前回声探测浮标的主流制造商包括 Zunibal、Satlink 和 Marine Instruments 等。这些回声探测浮标主要在工作频率、采样深度和采样

频率等性能参数上有所差异 (表 1), 例如, 工作频率为 38~200 kHz, 记录生物量的最大深度范围为 115~150 m。

Zunibal 公司两种型号回声探测浮标的工作模式均可设置为科学模式和每日总结模式, 其区别在于水层分辨率的不同, 分别为 1.6 和 6 m/层。Satlink 回声探测浮标的鱼探测量模式主要包括警示模式和日出模式^[41], 在警示模式工作时, 浮标会以每 15 分钟 1 次的频率进行探测, 在浮标下生物量出现较快增长时会触发鱼群激增警示, 并立刻回传该次探测结果; 在日出模式工作时, 浮标将会在日出前后 1 h 内进行探测作业, 若探测结果大于 1 t 便会立即回传探测结果。Marine Instruments 公司不同型号浮标的主要区别在于工作频率、返回数据频率和波束角的不同, 以 M3I 回声探测浮标为例, 在默认模式下, M3I 浮标每隔 5 分钟进行 1 次探鱼活动, 并会选择较高生物量样本信息通过卫星通信进行传输^[42]。Marine Instruments 回声探测浮标的探测深度能达到 150 m, 在 3 种品牌中其探测深度范围最大。

2.3 回声探测浮标数据

DFADs 上部署的回声探测浮标每天传输的大量声学数据和定位数据能够作为渔业领域科学分析的信息来源^[43], 近年来越来越多的研究将其用于分析金枪鱼随附鱼群在 DFADs 下的聚集动态、DAFDs 相关鱼群生物量评估和 DFADs 的投放对

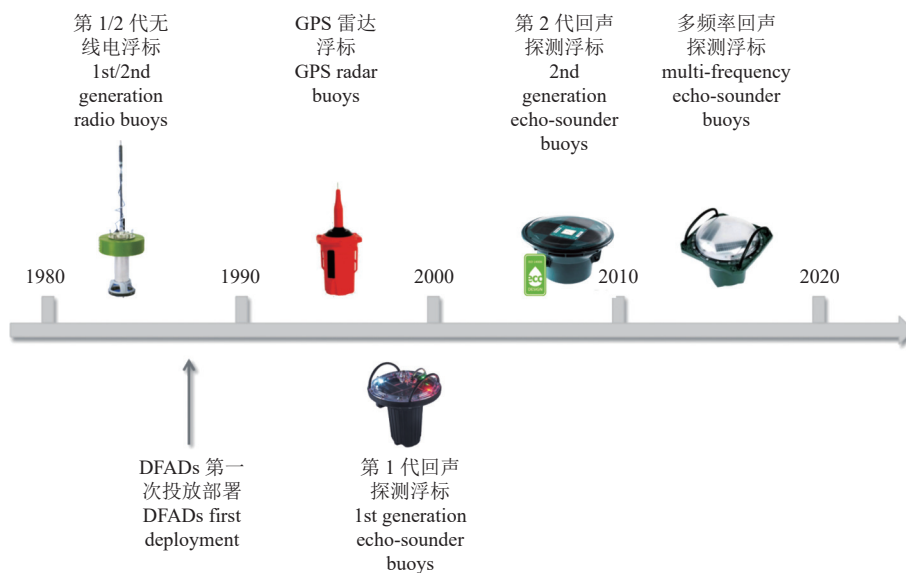


图 2 1980—2020 年金枪鱼围网渔业浮标技术发展沿革

Fig. 2 Timeline of technology Development of tuna purse seine fishing buoy from 1980 to 2020

表 1 Zunibal、Satlink 和 Marine Instruments 回声探测浮标的主要参数

Tab. 1 Main parameters of Zunibal, Satlink, Marine Instruments echo-sounder buoys

项目 items	Zunibal	Zunibal	Satlink	Satlink	Satlink	Marine instruments	Marine instruments
回声探测浮标型号 buoy model	Tuna 8 Explorer	Tuna 8 Xtreme	ISL	SLX+	ISD+	M4I	M3I+
频率/kHz frequency	120	120	190.5	200	38/200	50/120/200	50/200
波束角/(°) beam angle	22	22	32	32	32	35	42/8
功率/W power	200	200	120	200	200	500	500
识别盲区/m identify blind area	3	3	3	3	3	3	3
深度范围/m depth range	120	120	115	115	115	150	150
探测水层数 detection depth layers	75	67	10	10	10	50	50
每层分辨率/m resolution per layer	1.6	1.8	11.2	11.2	0.05	3	3
采样频率 ping rate (echo- sounder sampling frequency)	1 min	20 s	15 min	15 min	15 min	5 min	1 min
生物量估算 biomass estimates	生物量以t为单位		根据鳀密度得出的生物量(t)		根据鳀、大 眼金枪鱼、 黄鳍金枪鱼 密度得出的 生物量(t)	每层评分为0~7的整数	

金枪鱼类生态学和生物学方面的影响, 同时, 在金枪鱼远洋渔业的养护和管理措施的制定等方面也具有极大参考价值^[44]。

Satlink、Zunibal 和 Marine Instruments 3 个品牌的回声探测浮标数据均由声学数据集和定位数据集构成^[45-46](表 2)。每个制造商对回声探测浮标原始声学数据的处理方式不同, 进而导致最终的生物量数据的呈现方式有所不同。Satlink 和 Zunibal 品牌提供了以 t 为单位的生物量估计, 而 Marine Instruments 品牌提供了 DFADs 下原始声学数据转化为对应生物量大小的声学评分数据^[47], 每个水层对应 0~7 的整数声学评分, 用以表示监测范围内声学信号的强度, 数值越大则表示 DFAD 随附鱼群生物量越高。不同浮标制造商提供的生物量数据格式差别较大, 因此导致不同品牌间的数据集成运用变得比较复杂^[48]。对不同品牌之间浮标数据进行交叉相互校正, 提升各品牌浮标声学数据的准确性, 能够有希望将数据应用于更多领域的科学研究^[6]。

3 回声探测浮标在金枪鱼围网渔业中的应用

回声探测浮标不仅在金枪鱼围网捕捞作业中

作为助渔设备发挥重要作用^[49-50], 而且作为观察远洋生物多样性的科学平台, 能够为科学研究提供具有重要价值的信息。近年来, 在金枪鱼围网渔业中基于回声探测浮标的相关应用研究主要集中在 DFADs 金枪鱼鱼群生物量评估、鱼群随附行为研究以及 DFADs 生态影响评估三个方面。

3.1 DFADs 金枪鱼随附鱼群生物量评估

回声探测浮标的广泛使用, 有助于渔民实时快速地追踪 DFADs 的漂流位置, 并监测回声探测浮标提供的 DFADs 金枪鱼随附鱼群生物量信息, 进而能较大幅度其提高捕捞效率^[4, 51-53]。配有回声探测浮标的 DFADs 除了作为一种高效的捕捞工具之外, 其获得的声学数据也能为大洋中上层物种种群的研究提供前所未有的有效科学数据的支撑^[53-54], 并为金枪鱼种群评估提供一个独立于渔业数据的新丰度指数^[55]。

高度洄游鱼类种群评估模型中使用的丰度指数主要基于对渔业的单位捕捞努力量渔获量 (CPUE) 进行分析得到的^[56]。然而, 由于金枪鱼大尺度的迁徙洄游特性, 在种群评估中则很少使用独立于渔业数据的丰度指数。金枪鱼围网渔业的 CPUE 通常使用捕捞时间、鱼群搜索时间和渔获

表 2 回声探测浮标数据集结构 (以 Satlink 浮标数据为例)

Tab. 2 Data set structure of echo-sounder buoys (take Satlink buoy data as an example)

浮标数据集 buoy data set	浮标数据内容 buoy data set content
浮标定位数据集 buoy location data set	日期 date
	当天浮标最后一次报位的日期
	时间 time
	每小时报位时间(以格林尼治时间为标准)
	浮标代码 buoy code
	每个浮标的唯一识别号
	经纬度 latitude and longitude
	数据传输时浮标所在的经纬度
	漂流速度 drift velocity
	根据当天最后一个位置与前一天最后一个位置之间的距离/时间计算得出的速度
浮标声学数据集 buoy acoustic data set	浮标代码 buoy code
	每个浮标的唯一识别号
	所属船只 owner name
	浮标所属围网船名称
	储存时间 stored time
	回声测深仪记录的日期(dd/mm/yyyy)和小时(h:mm)
	经纬度 latitude and longitude
	传输数据时所在的经纬度
	浮标电量 battery capacity
	浮标传输数据时电量
	温度 temperature
	海表面温度
	速度 speed
	浮标漂流速度 (以kn为单位)
	漂流方向 drifting direction
	以(°)为单位的方位角
	水层1~水层10生物量数据 layer1-layer10 buoy acoustic data
	以t为单位的生物量, 通过深度层回声集成程序并基于鲹目标强度对生物量数据进行校准
	生物量数据合计 total biomass
	各层生物量之和

量作为单位捕捞努力量进行标准化, 而未考虑捕捞技术的发展和捕捞策略的变化^[57-58]。随着 DFADs 的广泛使用和回声探测浮标技术的更新, 使得在 CPUE 的标准化过程中单位捕捞努力量较难衡量。有研究提出了基于独立于渔业数据的金枪鱼丰度指数, 该指数将有助于改善金枪鱼种群资源评估的可靠性, 其中基于回声探测浮标数据的数据的金枪鱼丰度指数是当前研究的重点^[57-61]。

回声探测浮标声学数据最初主要是应用于金枪鱼围网渔业捕捞活动而非科学目的^[60]。虽然通过回声探测浮标在 DFADs 上收集的大量生物量数据在渔业捕捞作业和相关科学研究中具有重要价值, 但在相关的研究中直接利用回声探测浮标的原始数据却有待商榷^[62], 主要原因是回声探测浮标的生物量估计值会受到浮标硬件和软件的特性、海洋环境因素的影响, 所提供的信息在可靠性上有局限。同时, 由于制造商的不同, 回声探测浮标对数据的处理方法以及数据的类型和格式上又

有所区别^[15, 61]。对回声探测浮标探测的 DFADs 随附鱼群生物量的准确性进行评估, 并对现行用于估计相关生物量的算法进行改进, 是推进制定独立于渔业的金枪鱼丰度指数的关键^[42]。

如表 3 所示, 在回声探测浮标生物量估计的相关研究中, 应用的回声探测浮标生物量数据以 Satlink 和 Marine Instruments 这两个浮标制造商的数据为主, 这些研究主要对回声探测浮标声学生物量的准确性进行评估, 以及生物量数据进行校正分析^[43, 63-64], 探索建立独立于渔业数据的金枪鱼丰度指数, 用以评估金枪鱼的种群资源。

回声探测浮标提供的声学生物量数据集对于研究 DFADs 下金枪鱼集群动态以及热带金枪鱼种群数量评估有着重大的参考价值^[42]。通过应用随机森林模型, Baidai 等^[63]基于 Marine Instruments 浮标生物量数据与金枪鱼围网实际渔捞数据进行建模, 分析结果表明, 通过浮标生物量数据识别大西洋和印度洋 DFADs 下金枪鱼集群存在的二分

表 3 回声探测浮标生物量估计值评估的相关研究

Tab. 3 Relevant research on the estimation of biomass estimates for echo-sounder buoys

文献/年份 reference/year	浮标数据来源 data sources	海域 sea area	时间范围 time range	研究方法 research method	结论 conclusion
[42] 2017	Marine Instruments	大西洋 印度洋	2014—2017年	随机森林模型	识别金枪鱼集群存在: 大西洋的准确率为84%, 印度洋的准确率为87%
[63] 2020	Marine Instruments	大西洋 印度洋	2013—2018年	随机森林模型	识别金枪鱼集群存在: 大西洋的准确率为75%, 印度洋的准确率为85%。识别金枪鱼集群大小: 大西洋的准确率为48%, 印度洋的准确率为47%
[55] 2021	Satlink	中西太平洋	2016—2018年	随机森林模型	识别鳀集群存在: 中西太平洋的准确率97%
[64] 2016	Satlink	大西洋		广义可加模型	修正后的声学数据生物量准确性得到了提升, 其标准偏差(SD)从33.9降低至13.74
[65] 2019	Satlink	大西洋 印度洋	2012—2015年	广义可加模型、广义线性模型、2阶多项式和3阶多项式	修正后的声学数据生物量准确性, 在大西洋海域有所提升, 在印度洋海域提升效果较差

类模型准确率分别为 75% 和 85%，而识别 DFADs 下金枪鱼集群生物量大小的三分类模型准确率仅有 48% 和 47%。Escalle 等^[55] 则在此前研究的基础上额外考虑了船舶监测系统 (vessel monitoring systems, VMS) 数据，通过数据建模识别 DFADs 下是否存在鳀随附鱼群，并与已经过聚类分析的 Satlink 浮标生物量数据进行匹配，发现通过浮标生物量数据识别 DFADs 下 81~115 m 鳀随附鱼群存在的准确率为 97%。

Lopez 等^[64] 和 Orúe 等^[65] 主要基于现有的关于金枪鱼和非金枪鱼物种在 DFADs 下的垂直分布以及混合物种目标强度 (target strength, TS) 和权重的知识，使用广义线性和多项式回归等模型对浮标声学生物量数据进行修正。前者结果表明，在大西洋海域，经过修正的浮标生物量数据准确性相比未经修正的数据得到了提升，未经修正的浮标生物量数据的最大误差为 -69~101 t，经过模型处理后的最大误差为 -30.12~24.80 t。Orúe 等^[65] 虽然在大西洋海域得到与前者一致的结论，但该研究却发现，在印度洋不同海域，浮标生物量数据准确性提升效果有所不同，对于塞舌尔西北部和莫桑比克海峡的数据提升较为明显，而索马里海域的提升相对较小，其中的原因可能是印度洋海域季风环流气候对海洋环境影响强烈，导致海域时空变异性较大，进而修正后的浮标生物量数据准确性不如预期。

回声探测浮标声学生物量数据之所以需进行准确性的评估并进行校正，主要原因是其数据的准确性会受到各种因素的影响。一方面，金枪鱼在昼夜间会进行小尺度的水平或垂直运动^[66-67]，同时海洋环境因素的变化也会对海洋中上层物种

的垂直运动产生影响^[68]，进而导致回声探测浮标无法探测到整个随附鱼群。另一方面，DFADs 下随附的非目标物种会影响回声探测浮标对金枪鱼随附鱼群生物量的估计。因此，浮标生物量数据应用于金枪鱼种群资源评估或金枪鱼渔业管理保护的相关研究时，需要建立更广泛的浮标声学数据库，以增加对 DFADs 下生物量积累动态和回声探测仪声学样本的理解，同时需要构建应用于回声探测浮标校准的程序或协议，为回声探测浮标的应用开发提供技术和理论支持。

3.2 DFADs 金枪鱼随附鱼群随附行为研究

目前对于金枪鱼鱼群产生 DFADs 随附行为的原因及聚集动态了解甚少，提高对金枪鱼与 DFADs 之间聚集动态行为的认识已成为一个关键研究^[69]，主要关注领域包括金枪鱼在 DFADs 上捕获率的变化，以及 DFADs 对金枪鱼生物学和生态学的影响和其他相关生物的影响。通过这些研究，可以为金枪鱼围网渔业的管理养护措施提供科学依据，以支持区域渔业管理组织制订渔业资源可持续养护的决策。

金枪鱼偏好随附于固定结构物体、漂流物体和海洋生物等，随附行为产生的机制相对较复杂，其集群、摄食和迁徙洄游等活动特征都会涉及或依赖于随附行为。为了解 DFADs 下金枪鱼随附鱼群的随附行为特征、聚集动态和目标强度，大多数研究使用标志放流法^[70-72]、船载回声探测技术^[73]和水下目视调查法^[74]等。虽然上述方法都可作为在不同时间和空间尺度上 DFADs 附近金枪鱼聚集动态的有力研究工具，并且对了解 DFADs 的聚集机制、金枪鱼集群定殖过程以及验证“生态陷阱”假说提供了支撑^[75]，但大部分研究都是基于个体

的行为或较低的样本量, 而大规模调查 DFADs 相关的金枪鱼集群的随附行为则需要结合新的方法和相应更充足的数据源。

回声探测浮标的广泛使用, 其不同海域覆盖的范围广、传输数据量丰富的特点对于分析 DFADs 下金枪鱼的随附行为提供了有力的帮助^[64]。运用回声探测浮标数据对 DFADs 下聚集动态的相关研究主要包括金枪鱼随附 DFADs 的快速性和持久性两个方面。

随附的快速性 金枪鱼随附的快速性主要是通过金枪鱼在新部署 DFADs 下的定殖时间 (colonization time) 来衡量。新部署 DFADs 从投放到首次产生作业或打捞收回之间的时间被定义为 DFAD 的浸泡时间 (soak time), 定殖时间为整个浸泡时间的第一阶段, 表示为 DFADs 从投放开始到回声探测浮标探测到金枪鱼聚集的时间段^[76](图 3)。Orue 等^[77] 利用西班牙船队 2012—2015 年在西印度洋新部署的 962 个 DFADs 采集的浮标数据进行分析, 发现金枪鱼鱼群在 DFADs 下的定殖时间为 (13.5±8.4) d, 比非金枪鱼鱼群定殖时间早 [首次到达 DFADs 时间为 (21.7±15.1) d], 同时, 该研究发现 DFADs 水下结构深度与鱼群的定殖时间之间存在显著的相关性, 金枪鱼对于较深的物体有较快的定殖速度。Baidai 等^[76] 通过对在大西洋和印度洋新部署的 DFADs 采集的浮标数据进行分析, 发现在大西洋海域金枪鱼鱼群平均定殖时间为 13.17 d, 而在印度洋海域为 20.22 d。

随附的持久性 金枪鱼随附的持久性主要是通过研究金枪鱼鱼群在 DFADs 下的连续停留时

间 (continuous residence time, CRT) 来确定, 该时间也可反映金枪鱼随附鱼群对 DFADs 的忠实度。连续停留时间定义为金枪鱼个体在 DFADs 下每日尺度 (>24 h) 上连续聚集的时间跨度^[77] 或回声探测浮标下连续探测到金枪鱼集群聚集过程的时间跨度^[78] (图 3)。

评估金枪鱼随附持久性最新的研究方法主要是利用回声探测浮标数据观察金枪鱼随附群的连续停留时间, 其相关研究结果如表 4 所示。Baidai 等^[79] 在东大西洋和西印度洋热带海域通过对新部署的 DFADs 回声探测浮标数据进行分析发现, 在两个海域中金枪鱼随附鱼群在 DFADs 下连续停留的时间分别为 6 和 9 d, 在同一个 DFADs 下观测到最大的连续停留时间长达 109 d。而 Navarro-García 等^[80] 对西班牙围网船队在大西洋、印度洋和太平洋新部署的 DFADs 回声探测浮标数据进行分析, 发现金枪鱼在 DFADs 下连续停留时间为 3~9 d, 且金枪鱼随附鱼群在 DFADs 下聚集和离散过程的时间近乎对称。

有研究利用金枪鱼个体进行标志放流 (tag-stocking), 通过观察金枪鱼在 DFADs 下的停留时间来评估金枪鱼随附持久性^[81]。在东大西洋海域, Tolotti 等^[82] 通过声波遥测法, 观测到鲣与黄鳍金枪鱼的平均停留时间分别为 9.19 和 19.15 d。在西印度洋海域, Govinden 等^[83] 观测到鲣、大眼金枪鱼和黄鳍金枪鱼的停留时间为 4~10 d。在东太平洋海域, Matsumoto 等^[84-85] 在 2014 和 2016 年的 2 次声波遥测调查中发现, 鲣持续停留的时间不超过 7 d (表 4)。基于标志放流的方法对金枪鱼个体

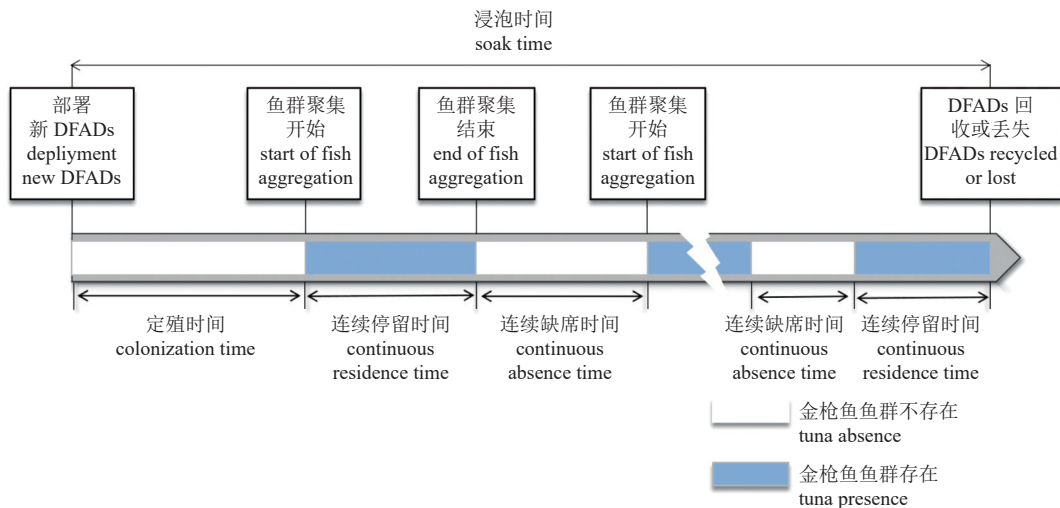


图 3 DFADs 的金枪鱼聚集动态时间线的示意图

Fig. 3 Schematic representation of the timeline of tuna aggregation dynamics at DFADs

表 4 DFADs 金枪鱼随附鱼群随附持久性相关研究结果

Tab. 4 Results of research on attachment persistence of DFADs associated tuna schools

文献/年份 reference/year	研究方法 research method	海域 sea area	连续停留时间/d continuous residence time	定殖率/% colonization rates
[76] 2020	监督学习模型 (基于回声探测浮标数据)	东大西洋 西印度洋	6 9	63 45
[81] 2021	Tun-AI机器学习模型 (基于回声探测浮标数据)	大西洋/印度洋/太平洋	3~9	
[78] 2020	监督学习模型 (基于回声探测浮标数据)	印度洋	在DFAD网格中的 停留时间: 38.98; 单个DFAD停留时间: 6	43.34
[79] 2019	监督学习模型 (基于回声探测浮标数据)	大西洋	6	62
[82] 2020	声波遥测法	东大西洋	鳀: 9.19 黄鳍金枪鱼: 19.15	
[84] 2016	声波遥测法	东太平洋	鳀: 2.3	
[85] 2014			鳀: 3.8	
[83] 2010	档案式标志法	西印度洋	鳀: 4.47 大眼金枪鱼: 3.89 黄鳍金枪鱼: 9.98	

在 DFADs 下的停留时间的观测与基于浮标数据建模得出的金枪鱼集群在 DFADs 下停留时间的研究结果较为一致,但在不同的海域其结果有所不同,主要原因可能是各海域生态环境因子的差异对金枪鱼在 DFADs 下的随附动态行为产生了影响。

定殖率 (colonization rates) 也是衡量金枪鱼随附鱼群在 DFADs 下随附持久性的重要参数,其定义为金枪鱼鱼群随附的 DFADs 的数量占 DFADs 部署总数的比值^[79]。Baidai 等^[78-79]在印度洋与大西洋海域调查分析新部署的 DFADs 中,金枪鱼集群的年度平均定殖率分别为 43.34% 和 62.00%。同时通过对大西洋海域定殖率的月份变动分析发现,定殖率月际变化主要分为 3 个时期:1—7 月,DFADs 定殖率较低,为 25%~50%;8 月开始定殖率提升至 50% 以上;11—12 月,定殖率达到当年的最高值^[79]。与大西洋海域相比,印度洋海域 DFADs 的定殖率较低,可能是该海域受复杂的季风性气候的影响,导致渔场季节性变动较大^[85-86]。研究表明,金枪鱼随附于 DFADs 的持续时间较长,证明了 DFADs 对金枪鱼有较强的聚集效果。

3.3 DFADs 生态影响评估

许多中上层鱼类与 DFADs 随附在一起,定期形成大型的、多物种的集群。基于 DFADs 的围网渔业不仅影响目标种群,还可以通过附带捕捞

非目标鱼种影响生态系统的结构、功能和多样性^[16]。这些种类繁多的兼捕物种包括海龟、海洋哺乳动物、软骨鱼类和其他硬骨鱼类等,其中一些物种(如海龟、海洋哺乳动物和软骨鱼类)由于其寿命长、生长速率缓慢和繁殖力低而特别罕见或脆弱,而硬骨鱼类虽然对过度捕捞不太敏感,但形成了一个重要的群落,其兼捕可能会改变大洋生态系统的平衡^[87]。虽然金枪鱼围网渔业的兼捕率相对低于金枪鱼延绳钓渔业,但是 DFADs 巨大的投放规模可能会导致非目标物种死亡率上升^[87]。

DFADs 搁浅事件 DFADs 大量投入使用会引起一系列的海洋生态环境问题。部署在 DFADs 上的回声探测浮标对于评估 DFADs 的海洋生态环境影响提供了大数据支持,可用于分析 DFADs 搁浅事件、DFADs 实际部署数量估计以及 DFADs 导致金枪鱼幼鱼较高死亡率及兼捕问题等。

回声探测浮标能提供大量的 DFADs 漂流 GPS 位置信息数据,为评估 DFADs 搁浅事件提供新的途径。当前关于 DFADs 搁浅事件主要通过收集整理回声探测浮标传输的位置信息数据,对 DFADs 的漂流轨迹时空动态进行分析^[88-89]。

在中西太平洋海域,金枪鱼围网渔场主要分布在太平洋岛国的专属经济区 (EEZ),专属经济区内岛屿众多、珊瑚礁广泛分布,同时在该海域

每年部署 DFADs 的数量也较多, 因此中西太平洋海域是 DFADs 发生搁浅事件风险较高的海域。Escalle 等^[90] 通过利用超过 20 000 枚 DFADs 的漂流轨迹, 揭示了中西太平洋海域发生搁浅事件的可能性, 以及发生搁浅之前的 DFADs 的部署和漂移模式, 结果表明, 5.8% 的 DFADs 漂流轨迹最终出现搁浅状态, 搁浅事件发生频率最高的海域是巴布亚新几内亚和所罗门群岛附近, 其洋流因素可能是导致该海域搁浅事件发生频率较高的原因。

在印度洋和大西洋海域, Maufroy 等^[89] 运用随机森林模型对 DFADs 漂流轨迹定位数据进行分析, 认为每年近 9.9% 的 DFADs 漂流轨迹以搁浅状态结束。Davies 等^[91] 基于拉格朗日模型模拟 2006—2014 年部署在西印度洋围网渔场的 DFAD 的轨迹, 以评估 DFAD 搁浅风险, 此方法的优势在于通过模拟 DFADs 在海洋中漂浮扩散的可能路径, 为估计海洋和搁浅事件之间连通性的总体概率分布提供有力的证据。上述研究都得出了基本一致的结论, 即 DFADs 在印度洋海域的马尔代夫群岛、塞舌尔群岛以及科摩罗群岛等附近海域发生搁浅的风险相对较高。

DFADs 部署数量 估计 DFADs 投放使用的数量是评估搁浅事件发生频率的主要研究方向之一, 但是每年实际部署和使用的 DFADs 数量却难以确定。Scutt 等^[92] 估算了 2016—2017 年在中西太平洋海域每艘船部署和活跃状态的 DFADs 数量, 发现 2016—2017 年处于活跃状态的 DFADs 分别达到 26 200~37 300 个和 38 000~48 200 个。Maufroy 等^[15] 将来自印度洋和大西洋的法国围网船队浮标漂流轨迹数据与航海日志数据相结合, 估计 2007—2013 年在两大洋主要渔场内使用的 DFADs 数量, 结果显示, 在 7 年的时间内, 部署数量增加了近 4 倍。当前 DFADs 实际部署和使用的数量呈逐年增加的趋势, 虽然无法统计其明确的数量, 但金枪鱼区域性渔业管理组织已经对其部署和使用的数量, 以及 DFADs 相关的捕捞活动采取了严格的限制措施。

DFADs 兼捕问题 当前, 回声探测浮标在 DFADs 上的广泛部署和使用, 可自动提供定位数据和鱼探生物量信息, 进而为评估 DFADs 兼捕问题提供了充分的数据支撑^[93-94]。Mannocci 等^[87] 将机器学习方法应用于回声探测浮标数据对大西洋和印度洋高兼捕量的风险区域进行了识别和预测, 结果揭示了浮标数据在减少副渔获量和提高

金枪鱼围网渔业捕捞选择性的潜力。尽管通过回声探测浮标声学数据监测目标物种和非目标物种的捕获量的研究目前处于早期阶段, 但能够为评估 DFADs 的兼捕问题和改善金枪鱼渔业资源管理提供新途径。

4 展望

当前回声探测浮标在金枪鱼围网渔业中的应用研究主要聚焦探索回声探测浮标生物量数据应用于开发独立于渔业数据的丰度指数、评估 DFADs 的兼捕风险、揭示 DFADs 下金枪鱼随附鱼群的聚集动态以及评估 DFADs 对海洋生态环境的影响等方面。然而当前部署应用的回声探测浮标多为单频浮标, 不能直接识别随附于 DFADs 的金枪鱼个体大小和种类, 因此今后的回声探测浮标的研发将侧重于使用声学新技术, 例如应用分束换能器或功能更强大的多频回声探测浮标, 帮助提升水下远距离物种识别的准确率, 进一步支持金枪鱼围网渔业进行选择性的捕捞的相关研究, 并有效降低非目标物种和目标物种幼体的死亡率。其次, 随附鱼群倾向于聚集于 DFADs 周围半径为 400~500 m 的范围内^[95], 通过增加水平换能器改善回声探测浮标受限的空间视野, 将会显著提升对随附于 DFADs 的金枪鱼鱼群的探测能力。

在远洋生态系统保护和生物多样性的研究中, 面临的主要挑战是收集大量实测数据和开发新的方法模型, 以评估气候变化和人为因素对海洋生态环境和生物栖息地的影响。金枪鱼围网船队每年在各大洋部署使用的 DFADs 数量多且覆盖范围广, 同时部署在 DFADs 上的回声探测浮标能实时记录漂流路径中海洋环境数据和海洋中上层物种活动信息。因此越来越多的研究者认为, 在未来远洋生态系统保护和生物多样性的研究中, 配备有回声探测浮标的 DFAD 将成为有力的观测工具, 然而在未来的开发过程中还需要在渔民、科学家和浮标制造商之间建立适当的合作计划, 进而为远洋生态系统和海洋生物多样性保护提供数据支持。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Clark C W, Mangel M. Aggregation and fishery dynamics: a theoretical study of schooling and the purse seine

- tuna fisheries[J]. *Fishery Bulletin*, 1979, 77(2): 317-337.
- [2] Fiorellato F, Pierre L, Geehan J. Review of the statistical data and fishery trends for tropical tunas[R]. San Sebastian: IOTC, 2019.
- [3] Itano D, Fukofuka S, Brogan D. The development, design and recent status of anchored and drifting FADs in the WCPO[R]. Majuro: Standing Committee on Tuna and Billfish, 2004.
- [4] Girard C, Benhamou S, Dagorn L. FAD: fish aggregating device or fish attracting device? A new analysis of yellowfin tuna movements around floating objects[J]. *Animal Behaviour*, 2004, 67(2): 319-326.
- [5] Williams P, Ruaia T. Overview of tuna fisheries in the western and central Pacific Ocean, including economic conditions[R]. Pohnpei State: WCPFC, 2020.
- [6] Lopez J, Moreno G, Sancristobal I, *et al.* Evolution and current state of the technology of echo-sounder buoys used by Spanish tropical tuna purse seiners in the Atlantic, Indian and Pacific Oceans[J]. *Fisheries Research*, 2014, 155: 127-137.
- [7] Moreno G, Murua J, Restrepo V. The use of echo-sounder buoys in purse seine fleets fishing with DFADs in the eastern Pacific Ocean[R]. La Jolla: IATTC, 2015.
- [8] Moreno G, Dagorn L, Capello M, *et al.* Fish aggregating devices (FADs) as scientific platforms[J]. *Fisheries Research*, 2016, 178: 122-129.
- [9] Balderson S D, Martin L E C. Environmental impacts and causation of 'beached' drifting fish aggregating devices around Seychelles Islands: a preliminary report on data collected by Island Conservation Society[R]. Portugal: IOTC, 2015.
- [10] Escalle L, Mourou J, Hamer P, *et al.* Towards non-entangling and biodegradable drifting fish aggregating devices—Baselines and transition in the world's largest tuna purse seine fishery[J]. *Marine Policy*, 2023, 149: 105500.
- [11] Gershman D, Nickson A, O'Toole A. Estimating the use of FADs around the world[R]. Washington, D.C.: The Pew Charitable Trusts, 2015.
- [12] Dempster T, Taquet M. Fish aggregation device (FAD) research: gaps in current knowledge and future directions for ecological studies[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2004, 14: 21-42.
- [13] Schaefer K M, Fuller D W. Vertical movements, behavior, and habitat of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the equatorial eastern Pacific Ocean, ascertained from archival tag data[J]. *Marine Biology*, 2010, 157: 2625-2642.
- [14] Curnick D J, Feary D A, Cavalcante G H. Risks to large marine protected areas posed by drifting fish aggregation devices[J]. *Conservation Biology*, 2021, 35(4): 1222-1232.
- [15] Maufroy A, Kaplan D M, Bez N, *et al.* Massive increase in the use of drifting Fish Aggregating Devices (dFADs) by tropical tuna purse seine fisheries in the Atlantic and Indian oceans[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2017, 74(1): 215-225.
- [16] Dagorn L, Holland K N, Restrepo V, *et al.* Is it good or bad to fish with FADs? What are the real impacts of the use of drifting FADs on pelagic marine ecosystems?[J]. *Fish and Fisheries*, 2013, 14(3): 391-415.
- [17] Pilling G M, Smith N, Moreno G, *et al.* Review of research into drifting FAD designs to reduce species of special interest bycatch entanglement and bigeye/yellowfin interactions[R]. Majuro: WCPFC, 2018.
- [18] Moreno G, Orue B, Restrepo V. Pilot project to test biodegradable ropes at FADs in real fishing conditions in the western Indian Ocean[C]/ICCAT. Collective Volume of Scientific Papers. Madrid: ICCAT, 2018: 2199-2208.
- [19] Orue B, Pennino M G, Lopez J, *et al.* Seasonal distribution of tuna and non-tuna species associated with drifting fish aggregating devices (DFADs) in the Western Indian Ocean using fishery-independent data[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 441.
- [20] Castro J J, Santiago J A, Santana-Ortega A T. A general theory on fish aggregation to floating objects: an alternative to the meeting point hypothesis[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2002, 11(3): 255-277.
- [21] Fonteneau A, Chassot E, Gaertner D. Managing tropical tuna purse seine fisheries through limiting the number of drifting fish aggregating devices in the Atlantic: Food for thought[C]/ICCAT. Collective Volume of Scientific Papers. Madrid: ICCAT, 2015: 460-475.
- [22] Hallier J P, Gaertner D. Drifting fish aggregation devices could act as an ecological trap for tropical tuna species[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 353: 255-264.

- [23] Sempo G, Dagorn L, Robert M, *et al.* Impact of increasing deployment of artificial floating objects on the spatial distribution of social fish species[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2013, 50(5): 1081-1092.
- [24] Marsac F, Fonteneau A, Menard F. Drifting FADs used in tuna fisheries: an ecological trap?[C]//Pêche thonière et dispositifs de concentration de poissons. Caribbean-Martinique: IFREMER, 2000: 537-552.
- [25] Zudaire I, Santiago J, Grande M, *et al.* FAD Watch: a collaborative initiative to minimize the impact of FADs in coastal ecosystems[R]. Cape Town: IOTC, 2018.
- [26] Eddy C, Brill R, Bernal D. Rates of at-vessel mortality and post-release survival of pelagic sharks captured with tuna purse seines around drifting fish aggregating devices (FADs) in the equatorial eastern Pacific Ocean[J]. *Fisheries Research*, 2016, 174: 109-117.
- [27] Stelfox M, Hudgins J, Sweet M. A review of ghost gear entanglement amongst marine mammals, reptiles and elasmobranchs[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 111(1-2): 6-17.
- [28] Imzilen T, Lett C, Chassot E, *et al.* Spatial management can significantly reduce dFAD beachings in Indian and Atlantic Ocean tropical tuna purse seine fisheries[J]. *Biological Conservation*, 2021, 254: 108939.
- [29] Torres-Irineo E, Gaertner D, de Molina A D, *et al.* Effects of time-area closure on tropical tuna purse-seine fleet dynamics through some fishery indicators[J]. *Aquatic Living Resources*, 2011, 24(4): 337-350.
- [30] Lopez J, Ferarios J M, Santiago J, *et al.* Evaluating potential biodegradable twines for use in the tropical tuna FAD fishery[J]. *Fisheries Research*, 2019, 219: 105321.
- [31] Hernández-García V, Santana Ortega A T, Ganzedo-López U, *et al.* Analysis of impact of non-entangling FADs on incidental catches in the Indian Ocean tuna fishery. [R]. Bali: IOTC, 2014.
- [32] Franco J, Dagorn L, Sancristobal I, *et al.* Design of ecological FADs[R]. Mombasa: IOTC, 2009.
- [33] Indian Ocean Tuna Commission. Compendium of active conservation and management measures for the Indian Ocean Tuna Commission[R]. Rome: IOTC, 2018.
- [34] Báez J C, Ramos M L, Herrera M, *et al.* Monitoring of Spanish flagged purse seine fishery targeting tropical tuna in the Indian ocean: Timeline and history[J]. *Marine Policy*, 2020, 119: 104094.
- [35] Pentz B, Klenk N, Ogle S, *et al.* Can regional fisheries management organizations (RFMOs) manage resources effectively during climate change?[J]. *Marine Policy*, 2018, 92: 13-20.
- [36] Western and Central Pacific Fisheries Commission. Conservation and management measure for bigeye, yellowfin and skipjack tuna in the Western and Central Pacific Ocean: Conservation and Management Measure 2018-01[R]. Honolulu: WCPFC, 2015.
- [37] Pentz B, Klenk N. Understanding the limitations of current RFMO climate change adaptation strategies: the case of the IATTC and the Eastern Pacific Ocean[J]. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 2020, 20(1): 21-39.
- [38] Fonteneau A, Ariz J, Delgado A, *et al.* A comparison of big eye stocks and fisheries in the Atlantic, Indian and Pacific Ocean[R]. Victoria: IOTC, 2004.
- [39] 张慧杰, 危起伟, 杨德国. 回声探测仪的发展趋势及渔业应用[J]. *水利渔业*, 2008, 28(1): 9-13.
- Zhang H J, Wei Q W, Yang D G. Development trend of echosounders and their application in fisheries[J]. *Reservoir Fisheries*, 2008, 28(1): 9-13 (in Chinese).
- [40] Morgan A C. Fish aggregating devices and tuna: impacts and management options[R]. Washington, D.C.: the Pew Charitable Trusts, 2011.
- [41] Ramos M, Báez J C, Grande M, *et al.* Spanish FADs logbook: solving past issues, responding to new global requirements[R]. Madrid: WCPFC, 2017.
- [42] Baidai Y, Capello M, Billet N, *et al.* Towards the derivation of fisheries-independent abundance indices for tropical tunas: progress in the echosounders buoys data analysis[R]. Mahé: IOTC, 2017.
- [43] Boyra G, Moreno G, Sobradillo B, *et al.* Target strength of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) associated with fish aggregating devices (FADs)[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2018, 75(5): 1790-1802.
- [44] Dagorn L, Bez N, Fauvel T, *et al.* How much do fish aggregating devices (FADs) modify the floating object environment in the ocean?[J]. *Fisheries Oceanography*, 2013, 22(3): 147-153.
- [45] MacLennan D N, Simmonds E J. *Fisheries acoustics*[M]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [46] Santiago J, Uranga J, Quincoces I, *et al.* A novel index

- of abundance of juvenile yellowfin tuna in the Atlantic Ocean derived from echosounder buoys[J]. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers*, 2019, 76: 321-343.
- [47] Baidai Y, Amande M J, Gaertner D, *et al.* Recent advances on the use of supervised learning algorithms for detecting tuna aggregations under fads from echosounder buoys data[R]. Mahé: IOTC, 2018.
- [48] Moreno G, Boyra G, Sancristobal I, *et al.* Towards acoustic discrimination of tropical tuna associated with Fish Aggregating Devices[J]. *PLoS One*, 2019, 14(6): e0216353.
- [49] Miyake M P, Guillotreau P, Sun C H, *et al.* Recent developments in the tuna industry: stocks, fisheries, management, processing, trade and markets[R]. Rome: FAO, 2010.
- [50] Parker R W R, Vázquez-Rowe I, Tyedmers P H. Fuel performance and carbon footprint of the global purse seine tuna fleet[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 517-524.
- [51] Báez J C, Déniz S, Ramos M L, *et al.* Data provision for science-based FAD fishery management: Spanish FAD management plan as a case study[J]. *Sustainability*, 2022, 14(6): 3278.
- [52] Escalle L, Hare S R, Vidal T, *et al.* Quantifying drifting Fish Aggregating Device use by the world's largest tuna fishery[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2021, 78(7): 2432-2447.
- [53] Wain G, Guéry L, Kaplan D M, *et al.* Quantifying the increase in fishing efficiency due to the use of drifting FADs equipped with echosounders in tropical tuna purse seine fisheries[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2021, 78(1): 235-245.
- [54] Rodriguez-Tress P, Capello M, Forget F, *et al.* Associative behavior of yellowfin *Thunnus albacares*, skipjack *Katsuwonus pelamis*, and bigeye tuna *T. obesus* at anchored fish aggregating devices (FADs) off the coast of Mauritius[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2017, 570: 213-222.
- [55] Escalle L, Hare S, Hamer P, *et al.* Scientific committee seventeenth regular session: Project 88 final report: acoustic FAD analyses[R]. Pohnpei State: WCPFC, 2021.
- [56] Fonteneau A, Chassot E, Bodin N. Global spatio-temporal patterns in tropical tuna purse seine fisheries on drifting fish aggregating devices (DFADs): taking a historical perspective to inform current challenges[J]. *Aquatic Living Resources*, 2013, 26(1): 37-48.
- [57] Orue B, Lopez J, Moreno G, *et al.* From fisheries to scientific data: a protocol to process information from fishers' echo-sounder buoys[J]. *Fisheries Research*, 2019, 215: 38-43.
- [58] Santiago J, Lopez J, Moreno G, *et al.* Towards a tropical tuna buoy-derived abundance index (TT-BAI)[C]/ICCAT. *Collective Volume of Scientific Papers*. Madrid: ICCAT, 2016: 714-724.
- [59] Katara I, Gaertner D, Billet N, *et al.* Standardisation of skipjack tuna CPUE for the EU purse seine fleet operating in the Indian Ocean[R]. Mahé: IOTC, 2017.
- [60] 肖俞辰, 周成, 万荣, 等. 中西太平洋金枪鱼围网人工集鱼装置 (FADs) 的集鱼特性[J]. *水产学报*, 2023, 47(3): 039719.
- Xiao Y C, Zhou C, Wan R, *et al.* Aggregation characteristics of fish aggregating devices (FADs) in tuna purse seine fisheries in the Western and Central Pacific Ocean[J]. *Journal of fisheries of China*, 2023, 47(3): 039719 (in Chinese).
- [61] Brehmer P, Sancho G, Trygonis V, *et al.* Towards an autonomous pelagic observatory: experiences from monitoring fish communities around drifting FADs[J]. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 2019, 35(1): 177-189.
- [62] Capello M, Deneubourg J L, Robert M, *et al.* Population assessment of tropical tuna based on their associative behavior around floating objects[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 36415.
- [63] Baidai Y, Dagorn L, Amande M J, *et al.* Machine learning for characterizing tropical tuna aggregations under Drifting Fish Aggregating Devices (DFADs) from commercial echosounder buoys data[J]. *Fisheries Research*, 2020, 229: 105613.
- [64] Lopez J, Moreno G, Boyra G, *et al.* A model based on data from echosounder buoys to estimate biomass of fish species associated with fish aggregating devices[J]. *Fishery Bulletin*, 2016, 114(2): 166-178.
- [65] Orúe B, Lopez J, Moreno G, *et al.* Using fishers' echosounder buoys to estimate biomass of fish species associated with Drifting Fish Aggregating Devices in the Indian Ocean[J]. *Revista de Investigación Marina, AZTI*,

- 2019, 26: 1-13.
- [66] Govinden R, Jauhary R, Filmlalter J, *et al.* Movement behaviour of skipjack (*Katsuwonus pelamis*) and yellowfin (*Thunnus albacares*) tuna at anchored fish aggregating devices (FADs) in the Maldives, investigated by acoustic telemetry[J]. *Aquatic Living Resources*, 2013, 26(1): 69-77.
- [67] Weng J S, Hung M K, Lai C C, *et al.* Fine-scale vertical and horizontal movements of juvenile yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) associated with a subsurface fish aggregating device (FAD) off southwestern Taiwan[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2013, 29(5): 990-1000.
- [68] Schaefer K M, Fuller D W. Simultaneous behavior of skipjack (*Katsuwonus pelamis*), bigeye (*Thunnus obesus*), and yellowfin (*T. albacares*) tunas, within large multi-species aggregations associated with drifting fish aggregating devices (FADs) in the equatorial eastern Pacific Ocean[J]. *Marine Biology*, 2013, 160(11): 3005-3014.
- [69] Bromhead D, Foster J, Attard R, *et al.* A review of the impact of fish aggregating devices (fads) on tuna fisheries: final report to the fisheries resources research fund [R]. Canberra: Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, Australia, 2003.
- [70] Block B A, Teo S L H, Walli A, *et al.* Electronic tagging and population structure of Atlantic bluefin tuna[J]. *Nature*, 2005, 434(7037): 1121-1127.
- [71] Matsumoto T, Saito H, Miyabe N. Swimming behavior of adult bigeye tuna using pop-up tags in the central Atlantic Ocean[J]. ICCAT Collective Volume of Scientific Papers, 2005, 57(1): 151-170.
- [72] Schaefer K M, Fuller D W, Block B A. Vertical movements and habitat utilization of skipjack (*Katsuwonus pelamis*), yellowfin (*Thunnus albacares*), and bigeye (*Thunnus obesus*) tunas in the equatorial eastern Pacific Ocean, ascertained through archival tag data[M]//Nielsen J L, Arrizabalaga H, Fragoso N, *et al.* Tagging and tracking of marine animals with electronic devices. Dordrecht: Springer, 2009: 121-144.
- [73] Josse E, Bertrand A. *In situ* acoustic target strength measurements of tuna associated with a fish aggregating device[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2000, 57(4): 911-918.
- [74] Boyra G, Moreno G, Orue B, *et al.* *In situ* target strength of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) associated with fish aggregating devices[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2019, 76(7): 2446-2458.
- [75] Taquet M, Sancho G, Dagorn L, *et al.* Characterizing fish communities associated with drifting fish aggregating devices (FADs) in the Western Indian Ocean using underwater visual surveys[J]. *Aquatic Living Resources*, 2007, 20(4): 331-341.
- [76] Baidai Y, Dagorn L, Amandè M J, *et al.* Tuna aggregation dynamics at Drifting Fish Aggregating Devices: a view through the eyes of commercial echosounder buoys[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2020, 77(7-8): 2960-2970.
- [77] Orue B, Lopez J, Moreno G, *et al.* Aggregation process of drifting fish aggregating devices (DFADs) in the Western Indian Ocean: who arrives first, tuna or non-tuna species?[J]. *PLoS One*, 2019, 14(1): e0210435.
- [78] Baidai Y, Dagorn L, Amande M J, *et al.* Aggregation processes of tuna under Drifting Fish Aggregating Devices (DFADS) assessed through fisher's echosounder buoy in the Indian Ocean[R]. San Sebastian: IOTC, 2019.
- [79] Baidai Y, Dagorn L, Amande M J, *et al.* Mapping tuna occurrence under drifting fish aggregating devices from fisher's echosounder buoys in Atlantic Ocean[J]. Collective Volume of Scientific Papers ICCAT, 2020, 76: 777-784.
- [80] Navarro-García M, Precioso D, Gavira-O'Neill K, *et al.* How do tuna schools associate to dFADs? A study using echo-sounder buoys to identify global patterns[J]. *BioRxiv*, 2022: 07. 07049.
- [81] Capello M, Robert M, Soria M, *et al.* A methodological framework to estimate the site fidelity of tagged animals using passive acoustic telemetry[J]. *PLoS One*, 2015, 10(8): e0134002.
- [82] Tolotti M T, Forget F, Capello M, *et al.* Association dynamics of tuna and purse seine bycatch species with drifting fish aggregating devices (FADs) in the tropical eastern Atlantic Ocean[J]. *Fisheries Research*, 2020, 226: 105521.
- [83] Govinden R, Dagorn L, Filmlalter J, *et al.* Behaviour of tuna associated with drifting fish aggregating devices (FADs) in the Mozambique Channel[R]. Victoria: IOTC, 2010.

- [84] Matsumoto T, Satoh K, Semba Y, *et al.* Comparison of the behavior of skipjack (*Katsuwonus pelamis*), yellowfin (*Thunnus albacares*) and bigeye (*T. obesus*) tuna associated with drifting FADs in the equatorial central Pacific Ocean[J]. *Fisheries Oceanography*, 2016, 25(6): 565-581.
- [85] Matsumoto T, Satoh K, Toyonaga M. Behavior of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) associated with a drifting FAD monitored with ultrasonic transmitters in the equatorial central Pacific Ocean[J]. *Fisheries Research*, 2014, 157: 78-85.
- [86] Davies T K, Mees C C, Milner-Gulland E J. Modelling the spatial behaviour of a tropical tuna purse seine fleet[J]. *PLoS One*, 2014, 9(12): e114037.
- [87] Mannocci L, Baidai Y, Forget F, *et al.* Machine learning to detect bycatch risk: novel application to echosounder buoys data in tuna purse seine fisheries[J]. *Biological Conservation*, 2021, 255: 109004.
- [88] Kaplan D M, Chassot E, Amandé J M, *et al.* Spatial management of Indian Ocean tropical tuna fisheries: potential and perspectives[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2014, 71(7): 1728-1749.
- [89] Maufroy A, Chassot E, Joo R, *et al.* Large-scale examination of spatio-temporal patterns of drifting fish aggregating devices (dFADs) from tropical tuna fisheries of the Indian and Atlantic Oceans[J]. *PLoS One*, 2015, 10(5): e0128023.
- [90] Escalle L, Phillips J S, Brownjohn M, *et al.* Environmental versus operational drivers of drifting FAD beaching in the Western and Central Pacific Ocean[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 14005.
- [91] Davies T, Curnick D, Barde J, *et al.* Potential environmental impacts caused by beaching of drifting fish aggregating devices and identification of management solutions and uncertainties[R]. Madrid: IOTC, 2019.
- [92] Scutt Phillips J, Escalle L, Pilling G, *et al.* Regional connectivity and spatial densities of drifting fish aggregating devices, simulated from fishing events in the Western and Central Pacific Ocean[J]. *Environmental Research Communications*, 2019, 1(5): 055001.
- [93] Schaefer K M, Fuller D W, Chaloupka M. Performance evaluation of a shallow prototype versus a standard depth traditional design drifting fish-aggregating device in the equatorial eastern Pacific tuna purse-seine fishery[J]. *Fisheries Research*, 2021, 233: 105763.
- [94] Lennert-Cody C E, Roberts J J, Stephenson R J. Effects of gear characteristics on the presence of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the catches of the purse-seine fishery of the eastern Pacific Ocean[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2008, 65(6): 970-978.
- [95] Moreno G, Dagorn L, Sancho G, *et al.* Fish behaviour from fishers' knowledge: the case study of tropical tuna around drifting fish aggregating devices (DFADs)[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2007, 64(11): 1517-1528.

Research progress in application of echo-sounder buoys in tuna purse seine fishery

ZHOU Cheng^{1,2,3,4}, XIAO Yu¹, WAN Rong^{1,2,3,4*}, XU Liuxiong^{1,2,3,4}, WANG Yucheng¹,
XIE Chenglan⁵, XIAO Yuchen¹

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Ocean Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. Key Laboratory of Exploitation of Ocean Fisheries Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

5. China National Fisheries Co., Ltd., Beijing 100160, China)

Abstract: Echo-sounder buoys can provide accurate geographic positioning of drifting fish aggregating devices (DFADs) and estimates of tuna stock biomass for tuna purse seine fisheries remotely and on a continuous basis, effectively reducing the "carbon footprint" of the purse seine fleet in searching for fish and fleet operating costs, thereby increasing the success of the fleet currently, DFADs-based tuna purse seine catches account for 54% of the total tuna purse seine fishery catch. In addition to its commercial application, the echosounder buoy has the potential to serve as a scientific platform for observing pelagic biodiversity, providing data to describe pelagic fish activity patterns for scientific research, helping to improve understanding of the accompanying behavior of DFADs, as well as the potential to develop an abundance index for tuna stock assessment independent of fisheries data. This paper firstly introduces the definition, types and structures, ecological impact and related management measures of DFADs, as well as the evolution, categories and data structure of echo-sounder buoys. The application of echo-sounder buoys in tuna purse seine fishery was reviewed from the aspects of: biomass assessment, fish association behavior and ecological impact posed by DFADs. Among them, tuna floating objects associated schools are analyzed and discussed in terms of the rapidity and persistence of tuna aggregation of DFADs, while the colonization time is the main indicator of the rapidity of tuna aggregation, and the continuous residence time and colonization rate are the key indicators of the persistence of tuna aggregation. The ecological impact assessment of DFADs mainly discusses the impact of DFADs stranding events, the number of DFADs deployment and DFADs bycatch on the marine ecological environment. This paper prospects the echo-sounder buoys on technical support in the future to reduce the target species and species, the development trend of the juvenile mortality from fishery resources and the sustainable management and marine biodiversity protection discussed combining fishery resources assessment data buoy observation data and to explore the climate change and human activities on the marine ecological influence the huge potential of the ecological system.

Key words: tuna; echo-sounder buoys; drifting fish aggregating devices; purse seine; biomass estimation; ecological impact

Corresponding author: WAN Rong. E-mail: rwan@shou.edu.cn

Funding projects: National Key R & D Program of China (2019YFD0901502, 2020YFD0901202); Special Fund for Science and Technology Development of Shanghai Ocean University (A2-2006-22-200208)