



中西太平洋金枪鱼围网人工集鱼装置 (FADs) 的集鱼特性

肖俞辰¹, 周成^{1,2,3*}, 万荣^{1,2,3*}, 张同征⁴,
王禹程¹, 谢程兰⁵, 张禹⁶

(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省部共建教育部重点实验室, 上海 201306;

4. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;

5. 中国水产有限公司, 北京 100160;

6. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室, 上海 200090)

摘要: 为了解鱼类在人工集鱼装置 (FADs) 周围的集群特性, 基于 2021 年我国金枪鱼围网船在中西太平洋的回声探测浮标数据, 对 FADs 投放后鱼类首次到达 FADs 的时间以及聚集的动态过程进行了探究。利用 U 检验和 H 检验分析了鱼类首次到达 FADs 时间的差异性, 利用广义加性混合模型 (GAMMs) 分析了金枪鱼类聚集生物量随 FADs 海上漂流时间和漂流速度的变化情况, 结果显示: ①鱼类首次到达 FADs 的时间为 (8.9±9.0) d, 其中金枪鱼类为 (3.8±4.2) d, 非金枪鱼类为 (16.0±8.9) d; ②金枪鱼类在不同水下长度 FADs 下的首次到达时间存在显著差异, 而非金枪鱼类无显著差异; ③金枪鱼类在 FADs 周围的聚集生物量随 FADs 海上漂流时间呈现动态变化, 约在其投放后第 25 天到达峰值, 随后逐渐下降; ④金枪鱼类聚集生物量随着 FADs 漂流速度的增加而逐渐降低; ⑤随机效应表明, 水下长度为 80 m 的 FADs 下金枪鱼类聚集生物量一般最高, 其次是 60 m, 90 m 最低。研究表明, FADs 投放后金枪鱼类往往先于非金枪鱼类到达, 其首次到达时间与 FADs 的水下长度有关; 具有较浅水下长度和缓慢漂流速度的 FADs 类型更易于吸引金枪鱼类在其周围聚集, 同时, FADs 投放后金枪鱼类逐渐聚集, 生物量约在 1 个月时达到峰值, 这可能反映了 FADs 投放后的最佳捕捞时机。本研究有助于进一步理解随附鱼群在 FADs 周围的行为模式, 为设计开发高效生态友好型 FADs、优化投网策略及制定针对随附鱼群的养护管理措施等提供科学依据。

关键词: 金枪鱼; 围网; 人工集鱼装置; 随附鱼群; 广义加性混合模型 (GAMMs)

中图分类号: S 972.63+5

文献标志码: A

热带金枪鱼类鲣 (*Katsuwonus pelamis*)、黄鳍金枪鱼 (*Thunnus albacares*) 和大眼金枪鱼 (*T. ob-*

esus) 等具有随附海洋漂流物的行为特性, 渔民利用这种行为特性制作并投放漂流型人工集鱼装置

收稿日期: 2022-01-28 修回日期: 2022-02-27

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; 上海市科学技术委员会科研计划项目 (18391900800)

第一作者: 肖俞辰 (照片), 从事金枪鱼围网渔业研究, E-mail: erwins1996@163.com

通信作者: 周成, 从事金枪鱼围网渔业研究, E-mail: c-zhou@shou.edu.cn;

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



(drifting fish aggregating devices, DFADs, 或简称 FADs) 对金枪鱼类进行大规模诱集围捕^[1-4]。由于随附在 FADs 周围的鱼群 (简称 FADs 随附鱼群) 聚集稳定以致捕捞成功率较高^[5-6], 使得该捕捞方式自 20 世纪 80 年代后逐渐在金枪鱼围网渔业中推广应用^[7-8], 目前其渔获量已占金枪鱼围网总渔获量的 50% 以上^[9-10]。然而, 大规模投放 FADs 造成的海洋垃圾污染、海洋动物缠绕、严重的副渔获物兼捕、幽灵捕捞^[11-14] 等显性负面影响, 以及降低目标鱼种单位补充量产量、扰乱中上层生态系统平衡、改变目标鱼种自然行为习性等^[15-21] 隐性负面影响, 在近 20 年间逐渐引起全球范围内的广泛关注。

了解 FADs 周围鱼群的随附机制和聚集过程, 对于提高渔业选择性、缓解副渔获物捕获以及制定养护管理措施等方面十分重要。目前, 解释 FADs 吸引金枪鱼类的假说主要有“躲避捕食者”假说、“饵料供给”假说、“空间参考点”假说、“休息点”假说、“流木指示物”假说和“集合点”假说^[2] 等。其中, “集合点”假说具有较强的信服力, 该假说认为漂浮物提高了孤立个体或小鱼群与其他鱼群相遇的几率, 通过群体行为来降低被捕食的风险, 并提高掠食的效率^[22-23]。尽管如此, 关于不同中上层鱼类的聚集过程差异、FADs 的结构特性对鱼类聚集影响等研究仍较为缺乏, 先前的研究主要通过渔民访谈和问卷调查等方式从渔民生态知识 (local ecological knowledge) 的角度进行理解, 并得出了如较长的水下结构可以减缓 FADs 在海洋中的漂流速度进而有利于金枪鱼类的随附聚集^[24-31]、FADs 漂浮结构产生的水下阴影可以为中上层鱼类提供隐蔽场所^[27-28, 31-32]、附着在 FADs 上的海洋藻类或贝类生物能够通过气味传播的方式吸引鱼群^[11, 15, 31, 33] 等认知性结论。

21 世纪初回声探测浮标的引入, 使作业船只实现了对 FADs 实时位置、海况以及聚集生物量及其深度分布等信息的获取, 因而极大地降低了船只搜寻鱼群的时间并提高了捕捞效率^[34-37], 同时, 由于结合回声探测浮标的 FADs 提供了不依赖于渔业生产的数据^[38-40], 从而为金枪鱼围网渔业的科学研究开拓出新的路径, 其中在 FADs 随附鱼群行为特性研究中显示出了巨大潜力^[41-42]。Orue 等^[43] 利用浮标数据, 发现印度洋海域金枪鱼类首次到达 FADs 的时间要早于非金枪鱼类, 同时金枪鱼类的聚集速度随着 FADs 水下长度的增

加而提高。Schaerfer 等^[44] 发现东太平洋海域非金枪鱼类首次到达 FADs 的时间早于金枪鱼类, 而 FADs 水下长度对大眼金枪鱼的捕捞率影响不大。但是, 目前基于浮标数据的研究主要集中于印度洋和东太平洋海域, 而在中西太平洋海域较为缺乏。本研究基于 2021 年我国中西太平洋金枪鱼围网船 FADs 回声探测浮标数据, 开展了 FADs 周围鱼群的聚集特性的研究, 包括不同鱼类首次到达 FADs 的时间差异、不同水下长度 FADs 下鱼类首次到达时间差异、金枪鱼聚集生物量随 FADs 海上漂流天数和漂流速度的关系, 并比较了不同水下长度 FADs 下金枪鱼聚集生物量, 有助于研究 FADs 随附鱼群的行为模式, 从而为设计开发高效生态友好型 FADs 以及制定针对 FADs 随附鱼群的养护管理措施等提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 海上试验

为探究鱼类首次到达 FADs 下的时间以及聚集的动态过程, 本课题组于 2021 年 2—11 月在中西太平洋海域作业的金枪鱼围网船上开展了 FADs 海上投放实验。如图 1 所示, 实验投放的 FADs 主要由漂浮结构、水下结构和回声探测浮标组成。其中, 漂浮结构由 6~8 个浮球串联成一排而构成; 水下结构使用聚乙烯有结节网片 (网目尺寸 60 mm, 网线股数 120, 网线直径 3 mm) 连结于漂浮结构下方, 水下结构配纲后的横向缩结长度为 2.5 m, 纵向缩结高度 (为方便起见, 下文统称 FADs 水下长度) 为 60~90 m (FADs 投放至海中后, 其水下结构在海流的作用下发生短缩, 实际的工作深度浅于该缩结高度)。实验中的 FADs 均配备了西班牙 Satlink 公司生产的回声探测浮标 (以下简称“Satlink 浮标”) 用于定位和数据收集。

实验共投放 75 枚 FADs, 根据 FADs 水下结

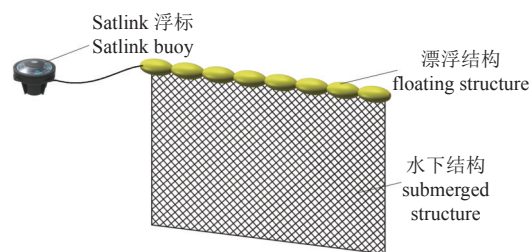


图 1 海上实验投放的 FADs 结构示意图

Fig. 1 Sketch map of FADs structure in the sea trial

构的网衣长度分为 60、80 和 90 m 三种类型, 分别被称为 FADs-60、FADs-80 和 FADs-90, 投放数量各为 15、35 和 25 枚 (表 1)。其中, FADs-60 在 3—4 月投放, FADs-80 在 3—4 月、6—7 月投放, FADs-90 在 2—5 月投放。FADs 投放点及漂流轨迹如图 2 所示, 其中绝大部分 FADs 集中于 170°35'~179°40'E, 0°42'~1°60'N 海域进行投放, 由于投放时不同时间和海域的洋流差异, 60 m 深度的 FADs 自投放后主要向东漂流, 80 m 的向东、西漂流各异, 90 m 的主要向西漂流。

表 1 海上实验投放的 FADs 水下深度、类别及投放时间和数量

Tab. 1 Submerged length, type, time and number of deployment of FADs in the sea trial

FADs水下长度/m length	类别 type	投放时间/月 time of deployment	投放数量/枚 number of deployment
60	FADs-60	3—4	15
80	FADs-80	3—4、6—7	35
90	FADs-90	2—5	25

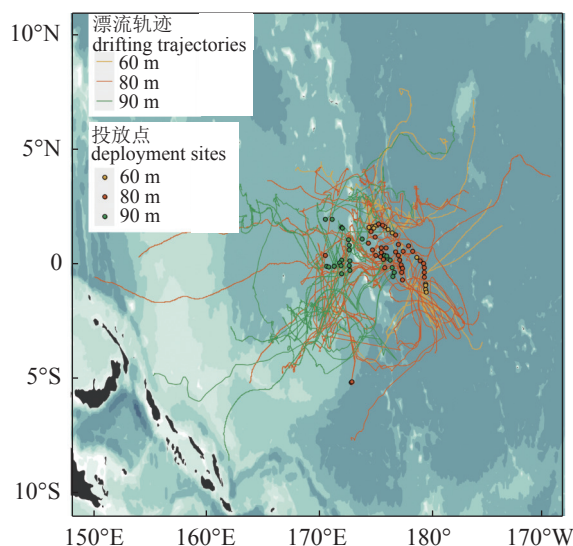


图 2 海上实验中不同类型 FADs 投放点及 60 d 内的漂流轨迹

Fig. 2 Deployment sites and drifting trajectories in 60 days of FADs of different types in the sea trial

1.2 数据来源

FADs 日志数据 实验期间记录的 FADs 日志数据主要包括 FADs 的投放时间、投放经纬度、浮标 ID、水下长度等信息和 FADs 的状态变更情况 (如发生投网捕捞、丢失、更换浮标等) 及

其对应的时间。其中 FADs 投放数据用于浮标数据的检索, 状态变更情况的数据用于浮标数据时间段的筛选。

浮标管理系统 Satlink 浮标能够实时收集 FADs 经纬度位置、漂流速度、周围聚集生物量等数据, 并通过卫星连接传输至浮标管理系统中。其中, 聚集生物量数据为基于目标强度和鱼体重量的经验算法, 将鱼探换能器采集的原始声波反向散射量转换为以吨为单位的生物量。浮标鱼探装置的水平探测距离为 83.71 m, 垂直探测深度为 115 m (为避免近场效应干扰, 存在表层 3 m 内的消隐区域), 其中, 垂直方向分为层均 11.2 m 的 10 个探测水层, 因而所探测的总生物量值等于每个水层分别探测的生物量值之和。

1.3 数据处理

鱼类首次到达 FADs 时间 本研究将鱼类首次到达 FADs 的时间定义为自 FADs 投放后, 浮标数据首次显示鱼类非零生物量所对应的时间, 计算公式:

$$T = T_2 - T_1 \quad (1)$$

式中, T 、 T_1 和 T_2 分别为鱼类首次到达 FADs 的时间 (d)、FADs 投放时间 (d) 和浮标数据库中首次显示非零生物量的时间 (d)。

基于先前关于 FADs 周围鱼类标记放流^[45]、视觉调查^[46]的实验结果, 以及金枪鱼与非金枪鱼类栖息水层之间的深度界限等相关研究结果^[43-44], 本研究以 25 m 水深作为划分金枪鱼和非金枪鱼类之间栖息水层的深度边界, 即水深 25 m 之内 (浮标生物量数据前 2 层) 被认定为非金枪鱼栖息水层, 而大于 25 m (浮标生物量数据第 3 层至第 10 层) 则被认定为金枪鱼类栖息水层, 尽管它们之间会有某种程度的重叠分布。

金枪鱼类聚集动态 本研究选取 FADs 投放 60 d 内未发生投网捕捞、丢失、更换浮标等情况的 FADs 数据, 分析 FADs 投放后 60 d 内其聚集生物量的变化情况及其与海上漂流时间、FADs 类型和漂流速度等要素之间的关系。其中, Satlink 浮标在每天日出前 1 h、日出和日出后 1 h 分别回报一次鱼探生物量, 本研究选用其中最高的生物量作为每日聚集生物量, 同时将一天内 0~3 kn 范围内的所有漂流速度的均值作为每日漂流速度进行统计。

1.4 数据分析

首次到达 FADs 时间的显著性分析 本研

究利用 Mann-Whitney^[47] 和 Kruskal-Wallis^[48] 独立性检验 (以下简称 U 检验和 H 检验) 对不同类型 FADs 下金枪鱼和非金枪鱼类首次到达 FADs 的时间以及水下长度对其潜在影响进行显著性分析, 检验过程通过 SPSS 25.0 软件完成。

鱼类聚集过程的 GAMMs 模型分析 为了拟合 FADs 的聚集生物量与海上漂流时间的非线性关系, 同时考虑到不同水下长度类型 FADs 对于生物集群效应的异质特点所导致的数据非独立性, 本研究采用具有高斯误差分布的广义加性混合效应模型 (generalized additive mixed model, GAMMs)^[49] 模拟鱼群的聚集动态过程以及其他协变量的非线性效应。基于 FADs 漂流速度的潜在影响, 本研究构建了漂流速度与漂流时间之间交互影响作为固定效应, 用于表示 FADs 空间变化行为的变系数模型, 其中, FADs 水下深度作为随机效应变量, 仅对截距项产生作用。模型的构建、检验和可视化通过 R (version 4.1.10) 中的 *gamm4*、*sjPlot* 包实现。GAMMs 模型结构:

$$\text{Biomass} \sim s(\text{days at sea/speed}, k=4, \text{by} = \text{speed/days at sea}) + \text{random} \sim (1 | \text{depth}) \quad (2)$$

式中, Biomass 为金枪鱼生物量; s 为构建的平滑函数; 模型采用薄板回归样条曲线进行回归, days at sea 表示 FADs 在海上漂流的时间, 单位为 d; speed 代表对应时间的漂流速度; k 为最大平滑自由度, 考虑到 FADs 对生物的稳定聚集过程, 本研究设置为 4 以避免模型过拟合; *random* 项设置了 FADs 水下长度 (类别变量, 分别为 60、80 和 90 m) 作为随机效应。

2 结果

2.1 鱼类首次到达 FADs 的时间

鱼类首次到达 FADs 的时间为 (8.9±9.0) d, 金枪鱼类到达 FADs 的时间为 (3.8±4.2) d, 非金枪鱼类到达 FADs 的时间为 (16.0±8.9) d, 且金枪鱼类首次到达 FADs 的时间要明显早于非金枪鱼类 (图 3)。U 检验显示, 金枪鱼类和非金枪鱼类在首次到达 FADs 的时间上存在显著差异 ($U=5565, P<0.05$)。

2.2 FADs 水下深度对鱼类首次到达时间的影响

3 种不同类型的 FADs 鱼类首次到达时间中, FADs-60 金枪鱼类首次到达时间为 (1.8±2.3) d, 非

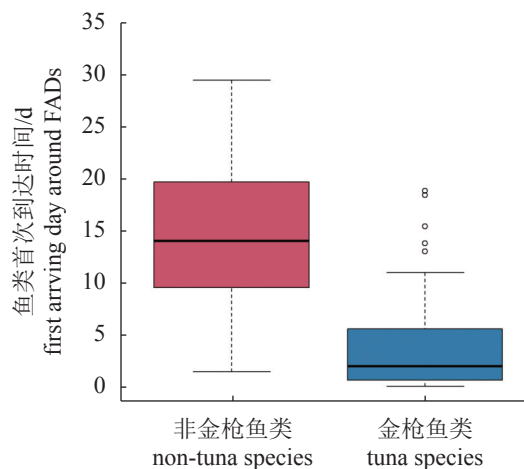


图 3 金枪鱼和非金枪鱼类首次到达 FADs 的时间

Fig. 3 Boxplot of first arriving day of tuna and non-tuna species around FADs

金枪鱼类首次到达时间为 (16.3±8.3) d; FADs-80 金枪鱼类首次到达时间为 (5.9±5.1) d, 非金枪鱼类首次到达时间为 (14.8±8.3) d; FADs-90 金枪鱼类首次到达时间为 (2.2±2.4) d, 非金枪鱼类首次到达时间为 (13.3±8.7) d (表 2)。

表 2 不同类型 FADs 鱼类首次到达时间的比较

Tab. 2 Comparison on the first arriving day of fish species of FADs of different types

FADs 类型 type	首次到达时间及时间范围/d the first arriving day and time range	
	金枪鱼类 tuna species	非金枪鱼类 non-tuna species
FADs-60	1.8±2.3	16.3±8.3
	0.3~7.0	7.0~26.0
FADs-80	5.9±5.1	14.8±8.3
	0.5~18.8	5.0~29.4
FADs-90	2.2±2.4	13.3±8.7
	0.3~9.6	1.5~25.3

FADs 水下长度对金枪鱼类首次到达时间影响较明显 (图 4)。H 检验表明, 不同水下类型 FADs 下的金枪鱼类的首次到达时间具有显著差异 ($H=19.482, P<0.05$), 成对比较表明, FADs-60 和 FADs-80 ($H=-26.936, P<0.05$)、FADs-90 和 FADs-80 ($H=19.005, P<0.05$) 两组的对比中差异明显, FADs-60 和 FADs-90 深度 FADs 下金枪鱼类的首次到达时间要明显早于 FADs-80。但是, FADs 的水下深度对非金枪鱼类首次到达时间的影响并不明显 (图 5), Kruskal-Wallis H 检验表明, 不同水下深度的 FADs 在非金枪鱼类首次到达时间上无显著差异 ($H=0.963, P>0.05$)。

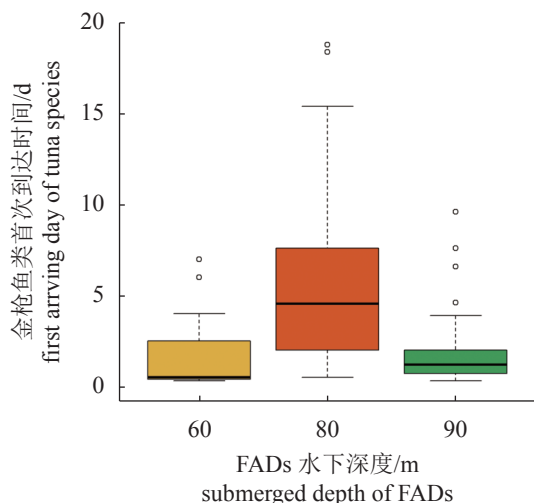


图4 不同类型 FADs 下金枪鱼类首次到达时间的箱型图

Fig. 4 Boxplot of first arriving day of tuna species in FADs of different types

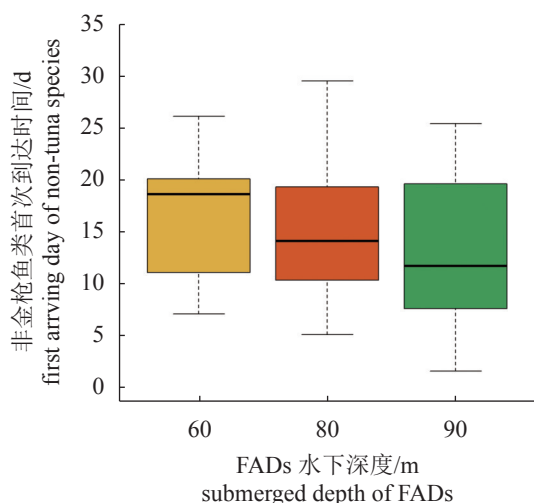


图5 不同类型 FADs 下非金枪鱼类首次到达时间的箱型图

Fig. 5 Boxplot of first arriving day of non-tuna species in FADs of different types

2.3 金枪鱼类在 FADs 周围聚集动态

金枪鱼类聚集生物量随 FADs 海上漂流天数的变化 以海上漂流时间为固定效应的 GAMMs 模型结果表明, FADs 海上漂流时间对金枪鱼类聚集生物量的变化具有显著影响, 截距的估计值为 5.438, 标准差为 0.7347, t 值为 7.402, $P < 0.001$; 平滑项 s (days at sea) 的有效自由度为 3.889, F 值为 7.778, $P < 0.001$ 。自投放之日起, 金枪鱼类在 FADs 周围的聚集生物量不断上升, 在约第 25 天达到峰值, 随后开始逐渐下降, 约至

第 50 天趋于稳定 (图 6-a)。

金枪鱼类聚集生物量随 FADs 不同漂流速度的变化 以 FADs 漂流速度为固定效应的 GAMMs 模型结果表明, FADs 漂流速度对金枪鱼类聚集生物量变化的影响较为显著, 截距的估计值为 4.111, 标准差为 0.7163, t 值为 5.739, $P < 0.001$; 平滑项 s (speed) 的有效自由度为 2.734, F 值为 4.597, $P < 0.001$ 。随 FADs 漂流速度的增大, 金枪鱼类聚集生物量呈现逐渐下降的趋势 (图 6-c), 且在 FADs 漂流速度缓慢的状态下往往具有较高的金枪鱼类聚集生物量。

FADs 水下长度对金枪鱼类聚集生物量的随机效应 在以漂流天数为固定效应的模型中, FADs-60、80、90 产生的随机效应分别为 0.25、0.47 和 -0.72 (图 6-b); 在以漂流速度为固定效应的模型中, 三者的随机效应分别为 0.14、0.52 和 -0.66 (图 6-d)。结果表明, FADs-80 的金枪鱼类聚集生物量最高, FADs-60 次之, FADs-90 最低。

3 讨论

3.1 鱼类首次到达 FADs 的时间

本研究结果表明, 自 FADs 投放后, 金枪鱼类首次到达的时间要显著早于非金枪鱼类, 金枪鱼类通常在 FADs 投放后 1 周内便会到达, 而非金枪鱼类最早为 2 周。Orue 等^[43] 在印度洋的实验结果与本研究类似, 认为金枪鱼类的首次到达时间要早于非金枪鱼类, 其中金枪鱼类一般在 2 周到达, 非金枪鱼类一般在 3 周到达。但是, Schaefer 等^[44] 在赤道东太平洋的实验结果表明, 非金枪鱼类要先于金枪鱼类到达 FADs, 其中金枪鱼类一般约在 70 d 到达, 而非金枪鱼类仅约 18 d。其次, 金枪鱼类的首次到达时间受 FADs 水下长度的影响较为显著, 但非金枪鱼类受此影响并不显著, 其中, FADs-60 的金枪鱼类首次到达时间最短, FADs-80 的时间最长。FADs 水下长度对非金枪鱼类影响并不显著的原因可能是非金枪鱼类一般栖息于 25 m 以内较浅的水层, 而本研究 3 种 FADs 的水下长度均大大超过了非金枪鱼类的栖息水层。FADs 漂浮结构特性也可能是影响其聚集的因素之一^[50-51], 但由于金枪鱼类通常占据着较深的水层, 因此其水下结构的网衣所及深度对金枪鱼类的聚集会产生显著的影响。

鱼类在 FADs 下的聚集是一个较为复杂的物

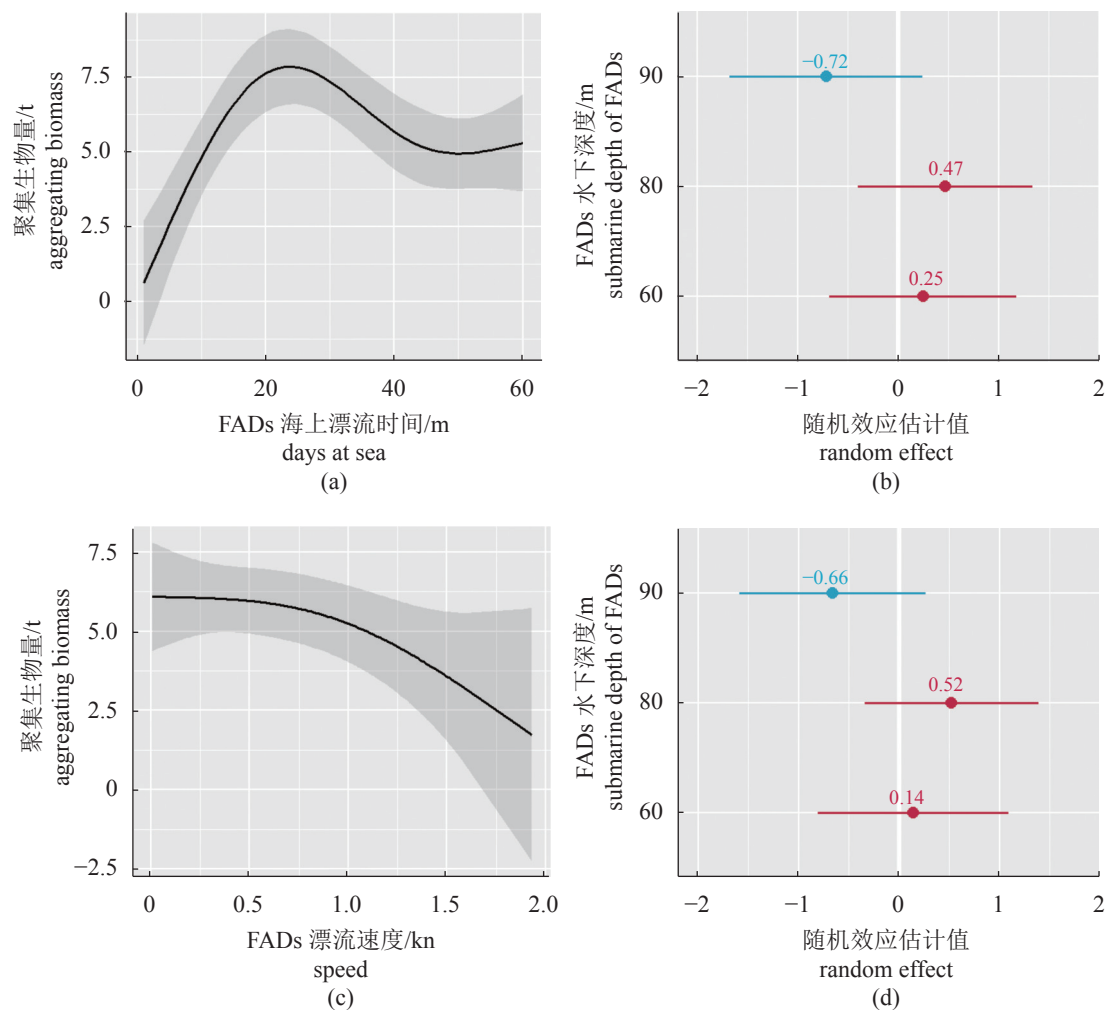


图6 金枪鱼类聚集生物量随漂流天数和漂流速度的变化及 FADs 水下深度的随机效应

Fig. 6 Variation of tuna aggregation biomass with days at sea and drifting speed and random effects of FADs submerged depth

理和生物过程, 该过程不仅受 FADs 自身结构的影响, 同时也会受 FADs 投放海域的鱼类资源状态、鱼类自身聚集行为特性以及海域环境与生态等多方面因素的制约^[45], 从而导致鱼类到达 FADs 的时间有可能出现显著差异, 因此未来需要获取时间跨度更长、数据量更大的样本对不同海域鱼类在 FADs 聚集过程的差异及其原因进行深入研究。其次, 由于水流流速的影响, 会造成水下结构网衣部分的实际工作深度差异, 因此未来还需开展水流流速对 FADs 水下网衣有效工作深度影响的研究, 结合鱼类栖息水层分布特征, 为 FADs 水下网衣长度优化设计提供科学依据。第三, 目前相关国际渔业组织正在大力推广生态可降解材料在 FADs 上的应用, 以便尽可能降低 FADs 水下网衣对鱼类造成的“幽灵捕捞”等, 有关该类型 FADs 鱼类聚集特性的相关海上实验仍较为缺乏。

3.2 金枪鱼类在 FADs 周围聚集动态

本研究表明, 金枪鱼类在 FADs 周围的聚集过程是一个动态变化的过程。自 FADs 投放后, FADs 周围的金枪鱼聚集生物量将呈现逐渐上升的趋势, 至第 25 天左右达到峰值, 随后开始逐渐下降, 到第 50 天左右趋于稳定。Orue 等^[43]在印度洋的实验结果也表明, 自 FADs 投放后金枪鱼聚集生物量呈稳定增长的趋势, 40 d 左右到达峰值后便保持稳定。其次, FADs 金枪鱼聚集生物量还受到其漂流速度的影响。当漂流速度较低时, FADs 金枪鱼聚集生物量保持在较高的水平; 随着漂流速度增大, FADs 周围金枪鱼聚集生物量呈现不断降低的趋势。王禹程等^[31]通过渔民问卷调查指出, 当 FADs 漂流速度在 0.5~0.9 kn 时更为适宜金枪鱼类的聚集, 漂流速度过快时可能会导致随附鱼群无法适应而离开。FADs 水下长度对金枪鱼聚集

生物量的随机效应具有差异性。其中, FADs-80 周围金枪鱼类聚集生物量最高, FADs-60 次之, FADs-90 最低。既往研究表明^[15, 33-34], 全球范围内 FADs 的水下网衣长度有逐渐增加的趋势, 其原因可能是随着网衣长度的增加, FADs 的漂流速度会降低, 而聚集生物量也会增大。但本研究中 FADs-90 的聚集生物量随机效应显著低于 FADs-60 和 FADs-80, 其原因有待进一步探讨, 未来还需基于更多的样本进行研究。

目前, 对于金枪鱼类到达 FADs 后是否会离开以及离开的原因, 尚未有相关的研究报道。Moreno 等^[52] 基于对印度洋渔民的采访指出, FADs 漂流速度的改变、海洋环境的变化或捕食者的出现都可能是金枪鱼类离开 FADs 的主要原因。Schaerfer 等^[44] 在东太平洋的研究结果表明, FADs 水下长度的不同对金枪鱼类的平均渔获量没有显著差异。因此, 未来可利用 FADs 漂流过程中采集的海洋环境信息, 结合 FADs 的漂流速度等数据, 进一步开展金枪鱼类聚集动态变化的研究, 探讨将 FADs 影响要素加入金枪鱼类栖息地评估模型的可能性, 并期待未来可通过获取更多的研究样本, 将 FADs 形态结构变量及水文变量(如 FADs 结构材料、不同水层的流速与流向、风速、浪高等)加入研究模型, 以进一步加深 FADs 鱼类集群机理的研究。

感谢中国水产有限公司对本研究的海上试验的大力支持, “协丰 788” “协丰 789” “中太 3 号” “中太 6 号” 和 “中太 7 号” 等金枪鱼围网船全体工作人员的全力配合, 汪子安、郭满和徐奕飞等同志为本研究提供的宝贵数据。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Dagorn L, Fréon P. Tropical tuna associated with floating objects: a simulation study of the meeting point hypothesis[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, 56(6): 984-993.
- [2] Fréon P, Dagorn L. Review of fish associative behaviour: toward a generalisation of the meeting point hypothesis[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2000, 10: 183-207.
- [3] Adam M S, Sibert J, Itano D, *et al.* Dynamics of bigeye (*Thunnus obesus*) and yellowfin (*T. albacares*) tuna in Hawaii's pelagic fisheries: analysis of tagging data with a bulk transfer model incorporating size-specific attrition[J]. *Fishery Bulletin*, 2003, 101(2): 215-228.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Chassot E, de Molina A D, Assan C, *et al.* Statistics of the European Union and associated flags purse seine fishing fleet targeting tropical tunas in the Indian Ocean 1981-2013[C]//Sixteenth Session of the IOTC Working Party on Tropical Tunas. Bali: 2014.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Hanich Q A, Davis R A, Holmes G, *et al.* Drifting fish aggregating devices (FADs) deploying, soaking and setting - When is a FAD 'fishing'[J]. *International Journal of Marine and Coastal Law*, 2019, 34: 1-24.
- [10] 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.
- [11] Franco J, Dagorn L, Sancristobal I, *et al.* Design of ecological FADs[C]// IOTC Secretariat, ed. Report of the Fifth Session of the IOTC Working Party on Ecosystems and Bycatch. Mombasa: IOTC, 2009, 16: 21
- [12] Matsuoka T, Nakashima T, Nagasawa N. A review of ghost fishing: scientific approaches to evaluation and solutions[J]. *Fisheries Science*, 2005, 71(4): 691-702.
- [13] Macfadyen G, Huntington T, Cappell R. Abandoned, lost or otherwise discarded fishing gear[R]. Rome: UNEP/FAO, 2009.
- [14] Moreno G, Jauharee A R, Adam M S, *et al.* Towards biodegradable FADs: evaluating the lifetime of biodegradable ropes in controlled conditions[R]. Washington, DC: International Seafood Sustainability Foundation, 2019.

- [15] Bromhead D, Foster J, Attard R, *et al.* A review of the impact of fish aggregating devices (FADs) on tuna fisheries[R]. Canberra: Bureau of Rural Sciences, 2003.
- [16] Amande J M, Ariz J, Chassot E, *et al.* By-catch and discards of the european purse seine tuna fishery in the Indian Ocean : estimation and characteristics for the 2003-2007 period[C]// Ecosystem and by-catch working group, Bangkok: IOTC, 2008.
- [17] Amande M J, Ariz J, Chassot E, *et al.* Bycatch of the European purse seine tuna fishery in the Atlantic Ocean for the 2003–2007 period[J]. *Aquatic Living Resources*, 2010, 23(4): 353-362.
- [18] 王学昉, 许柳雄, 戴小杰, 等. 金枪鱼渔业中人工集鱼装置生态影响研究进展[J]. *中国水产科学*, 2015, 22(6): 1289-1298.
Wang X F, Xu L X, Dai X J, *et al.* Review of the ecological impact of fish aggregation devices on tuna fisheries[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(6): 1289-1298 (in Chinese).
- [19] 王学昉, 朱国平, 孙满昌, 等. 人工集鱼装置对热带金枪鱼类行为模式的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 278-284.
Wang X F, Zhu G P, Sun M C, *et al.* Impact of fish aggregation devices on tropical tuna's behavioral pattern: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 278-284 (in Chinese).
- [20] 王少琴, 许柳雄, 王学昉, 等. 人工集鱼装置对热带金枪鱼类摄食模式的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34(13): 3490-3498.
Wang S Q, Xu L X, Wang X F, *et al.* A review of impacts of fish aggregation devices (FADs) on feeding patterns for tropical tunas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13): 3490-3498 (in Chinese).
- [21] 叶圣杰, 朱国平. 人工集鱼装置对黄鳍金枪鱼生物学及其生态学影响的研究进展[J]. *大连海洋大学学报*, 2017, 32(3): 373-380.
Ye S J, Zhu G P. Effect of fish aggregation devices on biology and ecology of yellowfin tuna *Thunnus albacares*: research progress[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2017, 32(3): 373-380 (in Chinese).
- [22] Pitcher T J, Parrish J K. Functions of shoaling behaviour in teleosts[M]//Pitcher T J. The behaviour of teleost fishes. 2nd ed. London: Chapman and Hall, 1993: 363-439.
- [23] Fréon P, Misund O A. Dynamics of pelagic fish distribution and behaviour: effects on fisheries and stock assessment[M]. Oxford: Blackwell Science, 1999.
- [24] Scott M D, Bayliff W H, Lennert-Cody C, *et al.* Proceedings of the international workshop on the ecology and fisheries for tunas associated with floating objects[R]. La Jolla: Inter-American Tropical Tuna Commission, 1992.
- [25] Hall M A, Garcia M. The association of tunas with floating objects and dolphins in the Eastern Pacific Ocean. 1992. Part IV. Study of repeated sets on the same object[C]// International workshop on the ecology and fisheries of tunas associated with floating objects and dolphins, California: IATTC, 1992: 18pp.
- [26] 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.
- [27] Moreno G, Murua J, Jauharee A R, *et al.* Compendium of ISSF research activities to reduce FAD structure impacts on the ecosystem[R]. Washington, DC, USA: International Seafood Sustainability Foundation, 2020.
- [28] Moreno G, Restrepo V, Dagorn L, *et al.* Workshop on the use of biodegradable fish aggregating devices (FADs)[R]. Washington, DC: International Seafood Sustainability Foundation, 2016.
- [29] Moreno G, Murua J, Kebe P, *et al.* Design workshop on the use of biodegradable fish aggregating devices in Ghanaian purse seine and pole and line tuna fleets[R]. Washington, DC: International Seafood Sustainability Foundation, 2018.
- [30] Moreno G, Salvador J, Murua J, *et al.* A multidisciplinary approach to build new designs of biodegradable fish aggregating devices (FADs)[C]//Scientific Committee Sixteenth Regular Session, Washington, DC: WCPFC, 2020.
- [31] 王禹程, 周成, 许柳雄, 等. 我国热带金枪鱼围网人工集鱼装置特征及随附鱼群行为[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4267-4276.
Wang Y C, Zhou C, Xu L X, *et al.* Characteristics of fish aggregation devices (FADs) and associated tuna schools behavior in Chinese tuna purse seine fishery[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12): 4267-4276 (in Chinese).
- [32] Rountree R A. Association of fishes with fish aggregation devices: effects of structure size on fish abundance[J]. *Bulletin of Marine Science*, 1989, 44(2): 960-972.
- [33] Murua J, Moreno G, Hall M, *et al.* Towards global non-entangling FAD use in tropical tuna purse seine fisheries through a participatory approach[R]. Washington, DC: 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- International Seafood Sustainability Foundation, 2017.
- [34] Hall M S, Roman M. Bycatch and non-tuna catch in the tropical tuna purse seine fisheries of the world[R]. Rome: FAO, 2013.
- [35] 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.
- [36] Moreno G, Murua J, Restrepo V. The use of echo-sounder buoys in purse seine fleets fishing with DFAD in the Eastern Pacific Ocean[C]// Seventh Meeting of the Scientific and Advisory Committee, Washington, DC: IATTC, 2015.
- [37] Davies T K, Mees C C, Milner-Gulland E J. The past, present and future use of drifting fish aggregating devices (FADs) in the Indian Ocean[J]. *Marine Policy*, 2014, 45: 163-170.
- [38] Worm B, Lotze H K, Myers R A. Predator diversity hot-spots in the blue ocean[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(17): 9884-9888.
- [39] Trebilco R, Halpern B S, Flemming J M, *et al.* Mapping species richness and human impact drivers to inform global pelagic conservation prioritisation[J]. *Biological Conservation*, 2011, 144(5): 1758-1766.
- [40] Murphy H M, Jenkins G P. Observational methods used in marine spatial monitoring of fishes and associated habitats: a review[J]. *Marine & Freshwater Research*, 2010, 61(2): 236-252.
- [41] 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.
- [42] Moreno G, Dagorn L, Capello M, *et al.* Fish aggregating devices (FADs) as scientific platforms[J]. *Fisheries Research*, 2016, 178: 122-129.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] Forget F G, Capello M, Filmlalter J D, *et al.* Behaviour and vulnerability of target and non-target species at drifting fish aggregating devices (FADs) in the tropical tuna purse seine fishery determined by acoustic telemetry[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2015, 72(9): 1398-1405.
- [46] 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.
- [47] 祁海萍, 申希平. Kruskal-Wallis H检验平均秩多重比较在SPSS软件中的实现[J]. *兰州工业学院学报*, 2015, 22(2): 76-78.
- Qi H P, Shen X P. The realization of mean rank's post hoc multiple comparisons of Kruskal-Wallis H test by using SPSS software[J]. *Journal of Lanzhou Institute of Technology*, 2015, 22(2): 76-78 (in Chinese).
- [48] Ceccaroni M, Roviglione G, Garzon S, *et al.* Author's reply to: comments on the utilization of Mann-Whitney U test and Kaplan-Meier method[J]. *Journal of Gynecologic Oncology*, 2021, 32(3): e54.
- [49] Simon Wood and Fabian Scheipl. gamm4: generalized Additive Mixed Models using 'mgcv' and 'lme4'[EB/OL]. R package version 0.2-6. <https://CRAN.R-project.org/package=gamm4>, 2020.
- [50] Hall M A, Lennert-Cody C E, García M, *et al.* Characteristics of floating objects and their attractiveness for tunas[C]//International Workshop on the Ecology & Fisheries for Tunas Associated with Floating Objects. La Jolla: Inter-American Tropical Tuna Commission, 1999.
- [51] Robert M, Dagorn L, Deneubourg J L, *et al.* Size-dependent behavior of tuna in an array of fish aggregating devices (FADs)[J]. *Marine Biology*, 2012, 159(4): 907-914.
- [52] 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.

Aggregation characteristics of fish aggregating devices (FADs) in tuna purse seine fisheries in the Western and Central Pacific Ocean

XIAO Yuchen¹, ZHOU Cheng^{1,2,3*}, WAN Rong^{1,2,3*}, ZHANG Tongzheng⁴,
WANG Yucheng¹, XIE Chenglan⁵, ZHANG Yu⁶

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

2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

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

4. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

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

6. Key Laboratory of East China Sea & Oceanic Fishery Resources Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

Abstract: Fish aggregating devices (FADs) have been used for large-scale aggregation of tuna species for more than 30 years. In order to understand the aggregation characteristics of the fish around FADs, this study explored the day of first arrival day and the dynamic aggregation process of fish after the deployment of FADs based on the echo-sounder buoy data of Chinese tuna purse seine vessels in the Western and Central Pacific Ocean in 2021. The U and H tests were used to analyze the difference of fish first arriving day around FADs, and the generalized additive mixed models (GAMMs) was used to analyze the variation of tuna biomass with the change of days at sea and drifting speed of FADs in the study. The results showed as follows: ① The first arriving day of fish was (8.9 ± 9.0) days, including (3.8 ± 4.2) days for tuna species and (16.0 ± 8.9) days for non-tuna species; ② There was a significant difference on the first arriving day of tuna species around different submerged depth of FADs ($P < 0.05$), but no significant difference was found in non-tuna species ($P > 0.05$); ③ The aggregation biomass of tuna species around FADs varied dynamically with the drifting days of FADs, and reached the peak at around the 25th day after deployment, then gradually decreased; ④ The aggregation biomass of tuna decreased with the increase of drifting speed of FADs; ⑤ The random effect showed that the aggregation biomass of tuna around FADs of 80 m was generally the highest, followed by FADs of 60 m, while the FADs of 90 m was the lowest. This study showed that tuna species usually arrived earlier than non-tuna species after FADs were deployed, and the day of first arrival day of tuna species was related to the underwater length of FADs. FADs with shallower submerged length and slower drifting speed were more likely to attract tuna to aggregate around them. Meanwhile, tuna species gradually aggregated after FADs were deployed, and the biomass reached peak at around one month, which might reflect the optimal fishing time after the deployment of FADs. This study was conducive to further understanding the behavior pattern of floating objects associated schools, and provides scientific basis for the design of efficient and eco-friendly FADs, optimization of setting strategies and formulating of conservation and management measures for floating object associated schools.

Key words: tuna; purse seine; fish aggregation devices; floating objects associated schools; generalized additive mixed models (GAMMs)

Corresponding authors: ZHOU Cheng. E-mail: c-zhou@shou.edu.cn;

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; Scientific Research Program of Shanghai Science and Technology Commission (18391900800)