

浮鱼礁发展现状及其在南海海洋牧场中的应用展望

冯博轩^{1,2,3}, 许强^{1,2,3}, 孙春阳^{1,2,3}, 高菲^{1,2,3}, 王爱民^{1,2}, 朱宇鹏⁴

(1 海南大学南海海洋资源利用国家重点实验室, 海南 海口 570228;

2 海南大学海洋学院, 海南 海口 570228;

3 海南省热带水生生物技术重点实验室, 海南 海口 570228;

4 三沙国海信通科技发展有限公司, 海南 海口 570100)

摘要:发展现代化热带海洋牧场是养护南海渔业资源、保护海洋生态环境等方面的重要手段,对中国南海渔业资源养护与科学利用具有深远意义。人工鱼礁是海洋牧场生境营造的重要手段之一,由于南海水深较深,常规鱼礁难以发挥作用,而浮鱼礁可以利用中上层的水体空间,是营造深水渔场的最佳设施。本研究综述了浮鱼礁的类型、功能和应用场景,对国内外的相关研究以及现状进行总结,并对浮鱼礁未来在南海海洋牧场信息化监测、休闲渔业、中上层鱼类资源养护和构建大洋性海洋牧场等方面进行了展望。

关键词:浮鱼礁; 锚定型浮鱼礁; 资源养护; 热带海洋牧场; 南海

中图分类号:S937.3

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2023)03-0001-010

过度捕捞和海洋污染使海洋环境急剧恶化,渔场遭到破坏,渔业资源枯竭和渔业海域荒漠化的问题愈发严重,海洋渔场亟需得到保护和修复^[1]。如何有效保护和恢复渔业资源、增加资源补充量是沿海国家当前亟需解决的问题。在此背景下,基于海洋生态系统原理,在特定海域,通过投放人工鱼礁、增殖放流等措施,构建或修复海洋生物繁殖、生长、索饵和避敌所需的场所,以系统化达到增殖、养护渔业资源,改善海域生态环境的目的,实现渔业资源可持续利用的海洋牧场渔业模式应运而生^[2]。

人工鱼礁(Artificial Reef)是海洋牧场建设中的一个关键环节。人工鱼礁可以改变海洋中鱼类的生存环境,减少传统掠夺式的拖网作业,具有增殖和聚集鱼类的效果^[3],同时还可作为游钓和潜水等休闲渔业提供良好支撑^[4]。传统意义上的人工鱼礁主要由钢筋混凝土或钢材等材料制成,投放于海底诱集底层鱼类,以用来修复海洋生态环境。沉式鱼礁的应用特点是要求投放区域水深为100 m以浅(10~60 m为优)^[5],海底宽阔平坦,泥沙淤积少,底质坚硬^[6-7]。目前南海海域(广东、

广西、海南)近岸规划的海洋牧场区水深一般在50 m以浅。随着经济社会发展,如果将海洋牧场的区域扩大到水深60 m乃至100 m,沉式鱼礁受限于水深的要求,在这些海域将无法得到充分应用,海洋牧场的建设区域也会因此受到限制。浮鱼礁则可以突破海域水深的限制,扩大人工渔场、海洋牧场等建设应用的区域。

本研究阐述了浮鱼礁的发展现状,综合介绍了当前国内外主流的浮鱼礁类型、结构特点及功能特征,总结了目前浮鱼礁的改良方向,并阐明了浮鱼礁应用存在的潜在生态风险,最后分析了浮鱼礁在中国南海热带海洋牧场区域应用的可行性及前景。

1 浮鱼礁的分类与特点

浮鱼礁根据是否固定海底可分为两类:漂浮型和锚定型(图1)^[8-9]。两者在水动力特征、生物诱集效果等方面有很大的不同。漂浮型鱼礁设施受水流运动的影响更明显,进而对幼虫的附着和食物获取产生影响^[10]。Perkol-Finkel等^[11]通过两年的调查研究发现,漂浮型和锚定型设施上所附着的苔

收稿日期:2022-10-06

基金项目:国家重点研发计划(2019YFD0901304);海南省重点研发专项课题(ZDYF2021XDNY130、ZDYF2022GXJS012);海南省自然科学基金(2019RC070)

作者简介:冯博轩(1997—),男,硕士研究生,研究方向:渔业资源养护与利用。E-mail:wzfbxwz@yeah.net

通信作者:许强(1980—),男,博士,教授,研究方向:渔业资源养护与利用。E-mail:xuqianghnu@hainanu.edu.cn

鲎虫、双壳类、藤壶和海绵等主要生物类群存在明显的差异,并且该差异化随着时间的推移而增大。

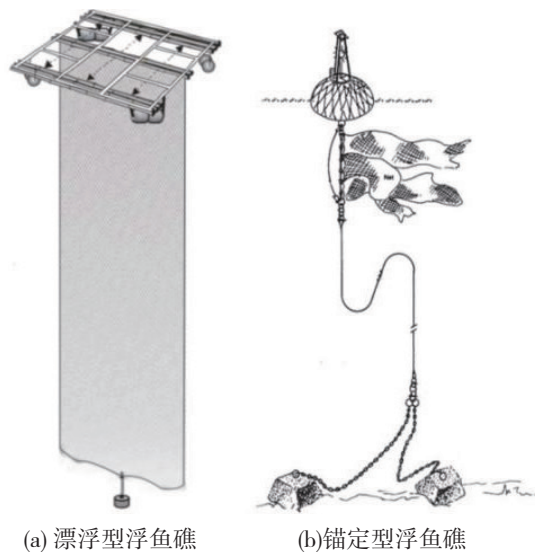


图1 两种常见的浮鱼礁

Fig. 1 Two common floating reefs

漂浮型浮鱼礁又分为天然漂浮鱼礁和人造漂浮鱼礁两种。最常见的天然漂浮鱼礁是沿海地区漂流的原木和树枝,也包括绳索、油桶、渔标等人类来源的漂浮碎片。人造漂浮鱼礁中的鱼类聚集装置(Fish Aggregation Devices)是人类专门为捕鱼目的而建造和部署的。竹筏是鱼类聚集装置的常用原材料之一,通常在其周围固定围网、软木塞等配件增加强度和提供浮力^[12],自然垂下的网片既能作为随水流漂泊的非固定锚,又能为各种大洋性鱼类提供藏身栖息之所^[13]。鱼类聚集装置由专业的渔业捕捞船只进行投放,通过中上层鱼类具有向海面漂浮物附近聚集的趋向性行为对诱集大洋性鱼类进行捕捞^[14]。同时,装置内需装配可发射特定频率无线电的定位浮标以确保投放船只跟踪捕捞,其对定位浮标性能要求高,需要具有较好的船队和经济基础。当前全球大部分鱼类聚集装置主要应用于金枪鱼围网捕捞等捕捞作业^[15]。中国金枪鱼围网船队长期以来也偏向于使用鱼类聚集装置捕获金枪鱼,其捕获的产量占到总渔获量的一半以上^[16]。鱼类聚集装置在渔业捕捞中得到了广泛使用,但在促进鱼类等海洋生物产卵、孵化、培育保护水生生物,暂时停留洄游性鱼类的产卵、保育、滞留等方面存在局限性。

锚定型浮鱼礁主要由锚块、锚绳和浮体组成,可以固定在海底(图1b)^[17],相比于漂浮型浮鱼

礁,不易丢失,方便管理和研究工作的开展。锚定型浮鱼礁不仅可用于帮助渔民小规模捕鱼,还可用于生态养护、增殖聚鱼、修复海域环境^[18]。锚定型浮鱼礁可以个性化定制改造,如可安装位置定位、声呐等功能,实现信息化监测管理,节省人力。此外,锚定型浮鱼礁可以不受海域限制,可改造设置在大水深海域,如深海浮鱼礁,应用更加广泛^[19]。

2 国外锚定型浮鱼礁的发展现状

2.1 锚定型浮鱼礁在东南亚、南亚的发展

锚定型浮鱼礁在菲律宾、印度尼西亚、马尔代夫等国家得到广泛使用。例如,菲律宾最常见的锚定型浮鱼礁被称为“Payao”,最开始只是简单的竹捆,由底部安装的一条绑缚着椰子树叶的绳子固定在海底,后来演变成结构良好的双层竹筏,将灌满混凝土的桶沉放海底作为“Payao”的锚碇系统^[20]。印度尼西亚将其传统的锚定型浮鱼礁称为“Rumpon”,与“Payao”相似,“Rumpon”同样是由竹筏、椰叶等材料构成,投放在水中以吸引中上层小型鱼类^[21],但是这些由原始材料构造而成的鱼礁,使用寿命普遍只有两个月甚至更短^[22]。马尔代夫是印度洋上使用锚定型浮鱼礁数量最多的国家之一。马尔代夫拥有世界上最大的锚定型浮鱼礁矩阵。与菲律宾等国家通过椰叶、竹筏等天然材料固定而成的浮鱼礁不同,马尔代夫所使用的浮鱼礁其漂浮部分采用纤维增强塑料(FRP)等现代材料,同时使用化学纤维网片,一方面作为藻类等生物的附着基,另一方面用来增大鱼类的吸引范围,这种浮鱼礁平均寿命两年有余^[23]。

2.2 锚定型浮鱼礁在日本的发展

相比于东南亚和南亚国家,日本在锚定型浮鱼礁领域的开发与利用处于世界领先地位,许多学者从不同的角度提出了浮鱼礁不同的分类方法。目前较为常用的是日本学者熊本修太的分类方法,他根据锚定型浮鱼礁主体所处的水层位置分成3类^[24]:始终浮在海面上的表层型浮鱼礁(图2左);低流速时浮于海面、流速大时浮体可没入水下的表中层型浮鱼礁(图2中);始终定位于海面下方特定深度的中层型浮鱼礁(图2右)。

依据放置海域和作业形态的不同,这3种类型的浮鱼礁可以分开使用,也可以组合使用。3种浮鱼礁的功能、材质如表1所示。

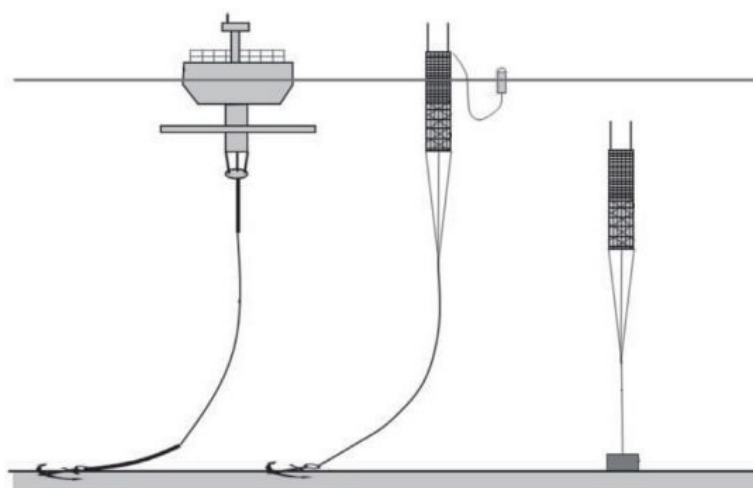


图2 日本3种常用浮鱼礁的形态结构

Fig. 2 The morphological structure of three common floating reefs in Japan

表1 3种常见浮鱼礁的特点

Tab. 1 Characteristics of three common floating reefs

项目	表层型浮鱼礁	表中层型浮鱼礁	中层型浮鱼礁
投放位置	漂浮于海面之上	静水时浮于表层,台风等大风浪天气沉入海中	长期位于海平面下方
浮体材质	钢或纤维增强复合材料(FRP)混合制作	通常为FRP纤维材料框架,框架中填充耐压浮球	一般有两种,第一种与表中层浮鱼礁相似,采用FRP纤维材料框架,框架中填充耐压浮球;第二种在设计时将化纤绳索、FRP和耐压型浮球结合在一起
锚绳材质	钢丝或化纤绳索	化纤绳索	化纤绳索
锚材质	钢锚或混凝土块	钢锚或方形混凝土	方形混凝土
是否设置标记	设置标识灯、雷达反射器等设备	设置标识灯、雷达反射器等设备	不设置标识灯,设置雷达反射器等设备
功能	搭载各种监测仪器	主要搭载水温计、水流计等仪器	主要搭载流出警报发射器等仪器

除了上述分类方法外,日本学者若林良和^[25]基于制造价格、使用用途、设置位置和功能将锚定型浮鱼礁分为“传统型”“简易型”和“尖端型”3类。

“传统型”浮鱼礁是3种类型中最为原始的一种。使用时先将10 cm左右粗的毛竹剪成合适的长度,再用铁丝将几根或十几根裁剪好的毛竹固定成捆,通过下方的锚绳连接锚碇(图3)^[26]即可完成制作。该类型浮鱼礁的结构简单、制作方便、造价低廉,通常用于集鱼、捕鱼,并不具备收集海况信息的功能,一般放置在沿岸海域的表层。

“简易型”浮鱼礁的造价与结构介于“尖端型”和“传统型”之间,是由高强度纤维骨架和耐压浮球组成的桶形结构(图4)^[27],外层通常会加装网衣与人工海藻。

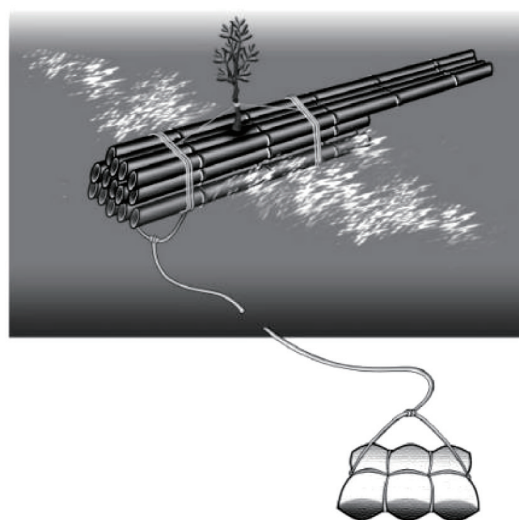


图3 传统型浮鱼礁

Fig. 3 Traditional floating reef

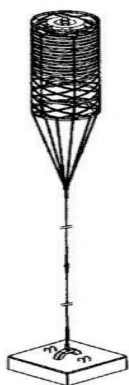


图4 简易型浮鱼礁

Fig. 4 Simple floating reef

“简易型”浮鱼礁是一种兼具捕鱼和休闲渔业的复合型浮鱼礁,功能上更加接近尖端型,可以在浮体中间固定一定的监测仪器。该类型的浮鱼礁主要放置在沿岸和近海区域的表层和中层,是一种表中层或是中层浮鱼礁。

“尖端型”浮鱼礁类似大型浮标,浮体下部设有供生物附着和鱼类栖息的平台结构(图2左,图5^[27])。

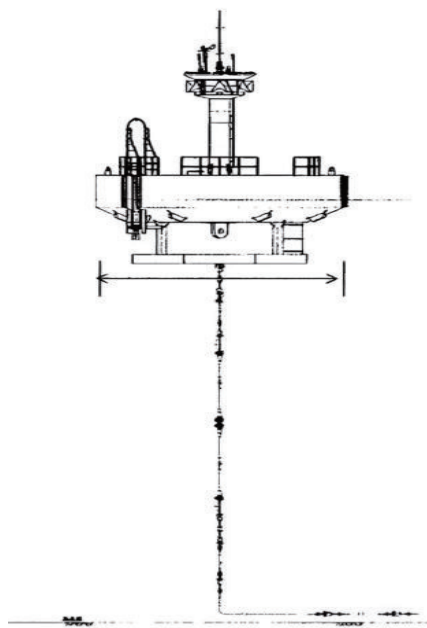


图5 尖端型浮鱼礁

Fig. 5 High-end floating reef

这种礁体的成本最高,但对于上层鱼类具有显著的诱集效果,除了用于捕鱼作业外,还可以发展垂钓等休闲渔业。该类型浮鱼礁的浮体内部通常加装有多种监测仪器,可以同步收集水温、潮流

等海况信息,拥有极大的功能拓展空间。这一类型的浮鱼礁普遍放置在近海海域的表层,是一种表层浮鱼礁。

3 浮鱼礁常见功能简述

3.1 监控自身位置

浮鱼礁的主体通常会搭载位置监控装置,可以在浮鱼礁发生非正常移动的时候发出警报。其原理是通过位置监控装置设置一定的范围,如果浮鱼礁超出设定的区域,位置监控装置就会通过卫星和无线信号向相关部门发送信息,从而及时有效地处理事故。另外,浮鱼礁所搭载的气象、水文等监测设备同样可以将数据发送到相关部门。中层型浮鱼礁配有流出警报发射器,其作用是当浮鱼礁由于锚绳断裂等原因浮出海面时,通过卫星或无线信号向管理平台发送信息。

3.2 收集海况信息

长期连续的水温、盐度、流向、流速等海况信息对科研工作者和渔业从业者来说都是极为重要的。浮鱼礁作为一种位置固定、长期驻留在海中的大型设备,十分适合加装监测仪器收集环境因子数据。Kakuma 等^[28]收集分析了14座大型浮鱼礁的数据采集效果,研究发现,相较于卫星数据,依托于浮鱼礁平台获取的海域环境因子数据更加全面细致准确。相较于派遣调查船只获取数据,浮鱼礁监测平台可以有效地降低人力负担和节约监测经费^[29]。

3.3 助力信息化监测管理

传统的鱼类组成分析方法为拖网调查,这种方式会对鱼类资源造成一定程度的破坏。浮鱼礁作为半固定平台,可以加装多种观测仪器。Takahashi 等^[30]通过遥控潜水器和缩时摄像机对浮鱼礁毗邻区域的鱼类组成进行了分析,相比于传统的拖网调查,该方式更有利于鱼类资源的保护。

谢亚洲^[31]利用超声波生物遥测系统研究了浮鱼礁的集鱼效果,其原理是在目标物体体内植入信号发生器,发射的固定频率信号被固定在浮鱼礁上的声学信号接收器所接收并存储,通过采集SD卡中的数据,便可以得到目标物在接收机信号范围内的运动和深度等数据。目前的超声波生物遥测技术可分为主动追踪、水声定位和被动监测

3 种类型。水声定位和主动追踪方法获取的目标生物的位置信息更加准确,但是主动追踪型的调查方法需要出动调查船,其追踪范围会受到调查船只航行能力的限制和实际海况的影响,难以进行大范围、长时间的生态调查。此外,航行的船只本身也会对目标生物造成干扰。水声定位方法需要提前在调查海域固定好接收设备,并且避开航线和渔船频繁作业的海域,调查区域时常受到限制。被动监测方法的优势在于无需船只的协助,只需将接收设备固定在浮鱼礁上。这种方式可以实现长期有效观测,数据获取能力极强,并且通过增加接收设备的数量可以达到更广范围的监测调查^[32-34]。其优势还体现在数据的及时传输,极大地提高了生态调查的效率。

4 锚定型浮鱼礁的最优设计与功能性探究

4.1 中国

长期以来,中国在浮鱼礁领域的开发与研究都处于滞后阶段。2005 年,陈丕茂^[35]对由竹筏、浮桶和废弃轮胎组装成的浮鱼礁的增殖效果进行了初步研究,结果表明浮鱼礁上的藻类等附着生物生长良好,为幼鱼幼虾提供了良好的索饵、隐蔽场所,并且浮鱼礁周围的经济种类幼体比例明显高于对比区域。之后的很长一段时间国内未有学者对浮鱼礁的开发、功能性与增殖效果等开展进一步研究。

2015 年后,国内学者对于浮鱼礁的研究逐渐增加。尽管不同科研团队的研究方向有所差异,但主要聚焦在浮鱼礁的功能性研究,并大体可分为两类。第一类聚焦于浮鱼礁的整体设计。余求妹等^[36]基于现有养殖设施——浮绳式网箱,设计探讨了浮绳式网箱成为人工浮鱼礁的可能性。张丽珍等^[37]利用聚乙烯(PE)、毛竹、浮球等材料设计了现代化中上层浮鱼礁,并在上面加装了远程观察系统,研究发现改良后的浮鱼礁与底层鱼礁进行协同联动的效果良好,可以扩大鱼群的活动空间,提高对海洋的综合利用。王江涛^[4]对中上层浮鱼礁的结构功能进行了细化,分别设计并模拟了海藻鱼礁、变流鱼礁和保育鱼礁的流场和受力情况,可以更为有效地交换不同水层的海水并为鱼类提供食物。沈卫星^[38]研发了具有鱼类驯化技术与海洋浮标技术的浮鱼礁,并在宁波象山

港对标记的黑鲷进行驯化和放流试验,研究表明通过在浮鱼礁上加装水下音响对黑鲷进行驯化可以一定程度上解决放流后留鱼率不高的问题。许强等^[9]研发了适用于热带海洋牧场海域,可以与潜水等休闲渔业相结合的中层景观悬浮鱼礁,相关浮鱼礁已经投放于三亚蜈支洲热带海洋牧场实验示范区。

第二类则侧重于对浮鱼礁的结构优化。Wang 等^[39]研究了浮鱼礁上不同粗细和材质的天然纤维网衣的降解速度和断裂强度。张健等^[40-41]研究了浮鱼礁框架浮体运动轨迹、最大偏转角度以及锚绳受力特性。潘钧等^[42]通过水槽试验进一步探究了框架式浮鱼礁在添加辅助绳之后的单锚系泊条件的稳定性,并建立了新型锚泊方式下的浮鱼礁动力响应数值模型,分析了浮鱼礁摆动角度、锚绳拉力、网衣系缚点总拉力的历时变化。

4.2 日本

日本是世界上浮鱼礁开发和利用最发达的国家之一,在浮鱼礁研究和开发方面投入数十亿美元资金,并在世界上处于领先地位。1992 年,日本渔业、造船、环境评估等多个产业共同制定了锚定型浮鱼礁的相关设计和制造标准。2015 年,日本政府针对锚定型浮鱼礁制定了相关要求^[43]。同类型浮鱼礁的整体结构趋于相似。因此日本学者的研究方向更偏向于对现存浮鱼礁的结构优化。

宗景志浩等^[44]研究了波浪中浮鱼礁的运动和作用于锚绳的张力。井上悟等^[45]研究了由多个球体相互连接组成的连续球型浮鱼礁在水中受到的阻力大小。浮鱼礁受潮流的影响会发生摆动,存在与附近作业渔船相撞的风险。大竹臣哉^[46]就海洋表层波浪流速和礁体运动距离之间的关系进行了研究。日本高知县政府放置了船型浮鱼礁,该浮鱼礁不仅与以往的圆形浮鱼礁具有同等的浮力,而且受到正面的流动时,可以有效地减小流动投影面积和水流阻力,进而减轻系留索的负荷。惠吾江幡^[47]对现存的船型浮鱼礁的摆动运动情况进行了分析,发现在浮鱼礁的船尾部分安装稳定板可以有效减少摆动运动的幅度,该方法改良简易且成本较低。

4.3 马尔代夫

世界上大部分使用浮鱼礁的国家并未针对浮鱼礁作更加深入的研究,除中国和日本外,以马尔代夫为代表的国家主要聚焦于对目前已经存在的浮鱼礁进行使用效果、防丢失研究。

针对马尔代夫浮鱼礁每年遗失率超过 80% 的现状,Shainee 等^[23]尝试通过数学和计算机等途径分析深水锚定型浮鱼礁的受力,并尝试使用悬链线方程对系泊系统进行解析,但最终失败。Ebata 等^[48]通过收集大量马尔代夫当地渔民的浮鱼礁相关信息,总结了金枪鱼在浮鱼礁周围的停留时间、位置和远离因素。Govinden 等^[49]通过声学遥感方式研究了马尔代夫境内鲹鱼和黄鳍金枪鱼在锚定型浮鱼礁上停留时间和运动行为。

总体上,日本在锚定型浮鱼礁的研究最为长久深入,在浮鱼礁领域处于世界领先地位。中国在锚定型浮鱼礁的研究近几年正在稳步增长,其他国家大都未进行或是仅仅只是研究目前已有浮鱼礁的使用效果。

5 浮鱼礁的潜在生态风险

5.1 制造海洋垃圾

海洋环境复杂多变,且受气候影响可能出现极端海况,资料显示,东南亚传统浮鱼礁的使用寿命不足两个月^[22],日本最新研发的高耐久性浮鱼礁也仅有七八年的使用寿命^[46]。达到使用寿命的浮鱼礁容易脱离锚定系统,成为“幽灵”浮鱼礁^[50]。据统计,每年约有 10%~20% 的“Payao”型浮鱼礁在渔场遗失^[8]。这些脱离锚定区域的浮鱼礁成了航行船只的潜在威胁,而随海流漂泊上岸的浮鱼礁本体也会产生额外的清理费用^[51]。一些塑料和人工合成材料制作的部件会成为海洋垃圾,甚至进入海洋食物网,对珊瑚礁和公海区域造成污染^[52]。

5.2 改变生物生长速率与生物习性

浮鱼礁的投放为部分生物提供了新的栖息场所,改变了区域内鱼类的食物链和运动轨迹。有研究显示,在西印度洋投放浮鱼礁后,该区域与非投礁区域周围的鲹鱼和黄鳍金枪鱼的空腹率、食物多样性均发生了改变,进而影响了其生长速率^[53-54]。

如果浮鱼礁投放在近海区域,可能会吸引大

洋性的金枪鱼向近海游动^[55],大量浮鱼礁的集中投放可能会改变金枪鱼类大尺度的洄游模式,并最终危及种群的健康状况^[56]。这种由于栖息地改变所造成的金枪鱼行为变动已被归为“生态陷阱”假说^[54-56]。

5.3 设计不合理致使生物死亡

当前国际上投放浮鱼礁的区域涵盖了一部分海龟和鲨鱼的栖息地^[57-58]。海龟和鲨鱼同样会被漂浮的鱼礁所吸引,而浮鱼礁的制作过程中通常会使用大量的网片。这些网片可能会导致海龟等生物在浮鱼礁周围游动的过程中被缠绕,使其最终无法挣脱而死亡^[59]。有学者在收集到的遗失浮鱼礁上发现了死亡的钝吻海豚。钝吻海豚是跨洋游泳生物,其死亡可能是被浮鱼礁上的网衣缠绕而导致的^[8]。此外,有报道称与浮鱼礁结构类似的海洋可再生能源装置在安装、使用的过程中会间接影响到海洋鸟类,增加海鸟碰撞、干扰、迁移等风险^[60]。关于浮鱼礁可能会造成的影响还需要进一步的研究。

在浮鱼礁使用过程中,人们逐渐发现可能会存在一定的生态风险,如产生海洋垃圾、引起游泳生物死亡等。研发人员在浮鱼礁的设计与投放中,应当有意识地减少海洋垃圾。如在设计浮鱼礁前,对投放海域的海洋生物进行评估;在制作浮鱼礁时,不使用或选取孔径更大的网片;在制作时,选用可降解绳索和对生物附着更加友好的材料;在投放浮鱼礁时,避开重点鱼群的洄游路线等。

6 浮鱼礁在南海海洋牧场应用的可行性与展望

6.1 中上层鱼类资源养护功能

南海资源养护型海洋牧场有相当一部分布局在近岸及三沙岛礁区域,海域水深跨度大,渔业资源明显分为中上层和底层两大类。常见渔获物主要由蓝圆鲹、鲈鱼、竹荚鱼和沙丁鱼等中上层鱼类以及红鳍笛鲷、金线鱼、蛇鲻、鲷鱼、石斑鱼等底层经济鱼类组成^[61],基于诱鱼器理念的浮鱼礁对中上层渔业资源的聚集作用可以为海洋生物资源的养护与增殖提供助力^[62],同时通过对结构的重新改良设计,浮鱼礁可以与沉性鱼礁结合,综合利用水体空间营造立体栖息生境,对底层鱼类和中上

层鱼类同时进行养护,提升资源养护效果,提高生物多样性和渔业资源量。

6.2 休闲潜水观光功能

南海水质清澈,珊瑚礁海域生物多样性极高,发展休闲旅游型海洋牧场条件得天独厚。在南海休闲型海洋牧场建设中,浮鱼礁可进行专门的艺术造型设计成为景观鱼礁,并与珊瑚移植、海藻栽培等相结合,构建珊瑚花园或水下森林,投放在不适宜珊瑚等生长的深水区域,在中上层形成新的潜水观光旅游区,为游客带来独特的视觉体验。浮鱼礁区对渔业资源的养护可支持多样化的海钓、海底观光、特色潜水等海洋旅游服务产品的推出,丰富海洋休闲旅游产业元素,打造南海休闲旅游型海洋牧场的独特吸引力。

6.3 信息化监测平台依托

表层浮鱼礁作为气象、水动力等监测设备的依托平台已在国外进行了应用,南海海洋牧场水文条件复杂,信息化监测与管控需求更加迫切。因此,可依托浮鱼礁作为平台搭载各类型传感器,构建海洋牧场资源环境指标剖面监测系统,通过调整中层浮鱼礁的水层深度,可以实时收集不同水深的温度、盐度、深度、溶氧、叶绿素、pH、浊度等环境参数以及礁区鱼类聚集效果的视频。大型表层浮鱼礁搭载气象站、潮位仪等设备可有效对南海多发热带气旋等灾害进行监测和预警预报,为海洋牧场的生态安全提供保障。

6.4 深海大洋性海洋牧场空间拓展

南海水深50 m以内的海域面积仅占很小一部分,在近海用海空间紧张、用海矛盾日益突出及生态保护愈加严格的现状下^[63],远离近岸的港口航运区、工业与城镇用海区,依托离岸岛礁深水海域构建深海大洋性海洋牧场将是未来的发展方向。浮鱼礁不受水深限制的特点可在深海大洋性海洋牧场构建中发挥重要作用,一方面可对金枪鱼等大洋性鱼类进行增殖养护、形成中上层渔场,提升鱼类资源量及可持续开发能力,另一方面能提升对岛礁周边海域的生物资源利用水平。

7 结语

综上所述,开发不同场景的人工浮鱼礁,实现结构多样化、材质环保化、应用组合化以及监测自动化,将是未来研究的重要方向。浮鱼礁因其独

特的渔业资源养护效果以及不受海域水深限制的特点,在南海海洋牧场建设中必将发挥重要作用。未来应加强浮鱼礁与沉性鱼礁如何结合发挥协同作用以促进上下层营养盐、初级生产力等的物质能量循环研究,同时在礁体的科学选型与定制化设计、合理布局、锚泊系统安全设计、效果评估等方面还需要进行更加系统与深入的研究。 □

参考文献

- [1] 张健. 波浪作用下人工浮鱼礁水动力特性研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019.
- [2] 农业部渔业渔政管理局. 中国海洋牧场发展战略研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [3] 林军, 章守宇. 人工鱼礁物理稳定性及其生态效应的研究进展[J]. 海洋渔业, 2006, 28(3): 257-262.
- [4] 王江涛. 柔性浮鱼礁设计及水动力学特性分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- [5] SC/T 9416—2014 人工鱼礁建设技术规范[S].
- [6] 刘国山, 佟飞, 蔡星媛, 等. 威海双岛海域人工鱼礁区大型海藻夏季群落结构变化[J]. 中国水产科学, 2014, 21(5): 1010-1019.
- [7] 赵海涛, 张亦飞, 郝春玲, 等. 人工鱼礁的投放区选址和礁体设计[J]. 海洋学研究, 2006, 24(4): 8.
- [8] CHANRACHKI I, LOOG-ON A. Preliminary report on ghost fishing phenomena by drifting FADs in eastern Indian Ocean [R]. Thailand; Southeast Asian Fisheries Development Center, 2003.
- [9] 许强, 冯博轩, 任兴月, 等. 一种景观悬浮鱼礁: CN113558000A [P]. 2021-10-29.
- [10] QIAN P, RITTSCOF D, SREEDHAR B. Macrofouling in unidirectional flow: miniature pipes as experimental models for studying the interaction of flow and surface characteristics on the attachment of barnacle, bryozoan and polychaete larvae[J]. Marine Ecology Progress Series, 2000, 207: 109-121.
- [11] PERKOL-FINKEL S, ZILMAN G, SELLA I, et al. Floating and fixed artificial habitats: Spatial and temporal patterns of benthic communities in a coral reef environment[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 77(3): 491-500.
- [12] MORENO G, DAGORN L, SANCHEZ 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.
- [13] ARMSTRONG W A, OLIVER C W. Recent Use of Fish Aggregating Devices in the Eastern Tropical Pacific Tuna Purse-Seine Fishery: 1990-1994 (Revised March 1996) [R]. California: Southwest Fisheries Science Center, 1996.
- [14] FONTENEAU A, PALLARES P, PIANET R. A worldwide review of purse seine fisheries on FADs [C]. Institute Espanol de Oceanografia. Caribbean-Martinique; Pêche thonière et dispositifs de concentration de poissons, 1999: 15-19.

- [15] MIYAKE M P, GUILLOTREAU P, SUN C, et al. Recent developments in the tuna industry: stocks, fisheries, management, processing, trade and markets [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010.
- [16] 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.
- [17] 夏章英. 人工鱼礁工程学[M]. 北京: 海洋出版社, 2011.
- [18] ITANO D, FUKOFUKA S, BROGAN D. The development, design and recent status of anchored and drifting FADs in the WCPO [R]. Majuro: 17th Meeting of the Standing Committee on Tuna and Billfish, 2004.
- [19] 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(1): 21-42.
- [20] BARUT N C. The payao fisheries in the Philippines and some observation on the behavior of tunas around payao [C]. Inter-American Tropical Tuna Commission. San Diego: International Workshop on the Ecology and Fisheries for Tunas Associated with Floating Objects, 1992: 11-713.
- [21] YUSFIANDAYANI R. Fish aggregating devices in Indonesia: Past and present status on sustainable capture fisheries [J]. Galaxea, Journal of Coral Reef Studies, 2013, 15(S): 260-268.
- [22] YUSFIANDAYANI R, BASKORO M S, MONINTJA D. Impact of fish aggregating device on sustainable capture fisheries[J]. KnE Life Sciences, 2015(1): 224-237.
- [23] SHAINEE M, LEIRA B J. On the cause of premature FAD loss in the Maldives[J]. Fisheries Research, 2011, 109(1): 42-53.
- [24] KUMAMOTO S. Substance of fish aggregating devices [J]. Journal of Fisheries Engineering, 2013, 49(3): 199-202.
- [25] 若林良和. FADs 漁業の研究視座—「漁業者の貯金箱」としてのバヤオの分類と研究アプローチ[R]. 横浜: 神奈川大学国際常民文化研究機構年報, 2011.
- [26] 鳥取県水産試験場. Traditional floating reef [EB/OL]. [2022-08-01]. <https://www.pref.tottori.lg.jp/92539.htm>.
- [27] 中西健二, 渡慶次力. 宮崎県における浮魚礁整備の状況[J]. 日本水産工学会誌, 2013, 49(3): 211-213.
- [28] KAKUMA S, OHTA I. Ocean observations at large fish aggregating devices off the Ryukyu Islands [J]. Bulletin on Coastal Oceanography, 2006, 44(1): 39-44.
- [29] TOKESHI T, HAYASHIDA H, HIROFUMI FUKUDA H F, et al. Operational delivery system for daily mapping of oceanic conditions by fishing boats in hyuga-nada and the possibility for expansion to other sea areas [J]. Bulletin on Coastal Oceanography, 2016, 53(2): 151-157.
- [30] TAKAHASHI C, KARAA K S, MASUMI S, et al. A comparison of remotely operated vehicle (ROV) and time lapse camera techniques for investigating fish fauna around an anchored fish aggregating device (aFAD) [J]. Journal of Fisheries Engineering, 2019, 56(2): 75-83.
- [31] 谢亚洲. 超声波生物遥测系统在鲷鱼 (*Katsuwonus pelamis*) 生态调查中的应用[D]. 大连: 大连海洋大学, 2017.
- [32] WOLCOTT T G, HINES A H. Ultrasonic biotelemetry of muscle activity from free-ranging marine animals: a new method for studying foraging by blue crabs (*Callinectes sapidus*) [J]. The Biological Bulletin, 1989, 176(1): 50-56.
- [33] 山口敦子, 井上慶一, 古満啓介, 等. バイオテレメトリー手法によるアイゴとノトリスズミの行動解析[J]. 日本水産学会誌, 2006, 72(6): 1046-1056.
- [34] 横田高士, 三田村啓理, 荒井修亮, 等. 超音波バイオテレメトリーを用いた魚類の行動追跡手法-若狭湾および舞鶴湾におけるアカアマダイの研究例[J]. 海洋理工学会誌, 2004, 10(1): 29-40.
- [35] 陈丕茂. 中山海域浮式试验鱼礁效果研究[J]. 湛江海洋大学学报, 2005(3): 85-89.
- [36] 余求妹, 马家志, 安玉, 等. 浮绳式网箱人工浮鱼礁的设计优势及问题的探讨[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(19): 8194-8195, 8217.
- [37] 张丽珍, 王江涛, 胡庆松, 等. 近海中上层柔性浮鱼礁设计与应用[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(4): 613-619.
- [38] 沈卫星. 智能化浮式聚鱼装备研发与试验[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- [39] WANG Y, ZHOU C, XU L, et al. Degradability evaluation for natural material fibre used on fish aggregation devices (FADs) in tuna purse seine fishery [J]. Aquaculture and Fisheries, 2021, 6(4): 376-381.
- [40] 张健, 冯德军, 王萍, 等. 波浪作用下箱网式浮鱼礁水动力特性研究[J]. 中国水产科学, 2019, 26(5): 1014-1020.
- [41] 张健, 潘昀, 冯德军, 等. 框架式浮鱼礁波浪水动力特性数值模拟研究[J]. 渔业现代化, 2018, 45(2): 42-49.
- [42] 潘昀, 刘灿, 杨熙, 等. 波浪作用下中上层浮鱼礁动力响应数值模型建立方法[J]. 海洋工程, 2020, 38(5): 61-70.
- [43] AGENCY F. Reference book for the designing facilities in the fishing port and fishing grounds [M]. Tokyo: Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, 2015.
- [44] 宗景志浩, 小原昭, ABRAR MUHAMMAD. 中層浮体 (浮魚礁) の係留ロープの張力に関する研究[R]. 高知大学学術研究報告 (農学). 高知: 高知大学, 1980: 117-123.
- [45] INOUE S, TAKIKAWA K, FUJIMOTO M, et al. Drag force on a series of spheres [J]. Journal of Fisheries Engineering, 2012, 49(1): 21-25.
- [46] 大竹臣哉. 浮魚礁の水理機構と生物生産[J]. 日本水産工学会誌, 2013, 50(1): 33-38.
- [47] 恵吾江幡. 浮魚礁の振り回り運動に関する模型実験[J]. 日本水産工学会誌, 2016, 52(3): 171-176.
- [48] EBATA K, OGAWA S, FUWA S, et al. Model Experiment on movement of drifting fish aggregating device [J]. Journal of Fisheries Engineering, 2016, 52(3): 171-176.
- [49] GOVINDEN R, JAUHARY R, FILMALTER 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.
- [50] CILLARI T, ALLEGRA A, ANDALORO F, et al. The use of echo-sounder buoys in Mediterranean Sea; A new technological approach for a sustainable FADs fishery[J]. Ocean & Coastal Management, 2018, 152: 70-76.
- [51] MACFADYEN G, HUNTINGTON T, CAPPELL R. Abandoned, lost or otherwise discarded fishing gear[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2009: 115.
- [52] MORENO G, ORUE B, RESTREPO V. Pilot project to test biodegradable ropes at FADs in real fishing conditions in western Indian Ocean[J]. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 2018, 74(5): 2199-2208.
- [53] JAQUEMET S, POTIER M, MÉNARD F. Do drifting and anchored Fish Aggregating Devices (FADs) similarly influence tuna feeding habits? A case study from the western Indian Ocean[J]. Fisheries Research, 2011, 107(1/3): 283-290.
- [54] HALLIER J, 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.
- [55] MARSAC F, CAYRÉ P, CONAND F. Analysis of small-scale movements of yellowfin tuna around fish-aggregating devices (FADS) using sonic tags, IOTC Proceedings[C]. 6th Expert Consultation on Indian Ocean Tuna. Colombo; 6th Expert Consultation on Indian Ocean Tunas -IOTC, 1996: 25-29.
- [56] MARSAC F, FONTENEAU A, MÉNARD F. Drifting FADs used in tuna fisheries; an ecological trap, IRD, laboratoire HEA BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 1 France, 2000[C]. Caribbean-Martinique; Pêche thonière et dispositifs de concentration de poissons, 1999: 15-19.
- [57] LUSCHI P, SALE A, MENCACCI R, et al. Current transport of leatherback sea turtles (*Dermochelys coriacea*) in the ocean[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 2003, 270(S2): S129-S132.
- [58] 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.
- [59] CLERMONT S, CHAVANCE P, DELGADO DE MOLINA A, et al. EU purse seine fishery interaction with marine turtles in the Atlantic and Indian Oceans; a 15 years analyses[R]. Seychelles: The Indian Ocean Tuna Commission, 2012.
- [60] GRECIAN W J, INGER R, ATTRILL M J, et al. Potential impacts of wave-powered marine renewable energy installations on marine birds[J]. Ibis, 2010, 152(4): 683-697.
- [61] 郭金富, 李茂照, 余勉余. 广东海岛海域海洋生物和渔业资源[M]. 广州: 广东科技出版社, 1994.
- [62] FRA-SEAFDEC. The Proceedings of the Fisheries Research Agency Southeast Asian Fisheries Development Center (FRA-SEAFDEC) on Artificial Reefs for Fisheries Resource Recovery[C]. Fisheries Research Agency Southeast Asian Fisheries Development Center. Tokyo; The FRA-SEAFDEC Joint International Workshop on Artificial Reefs for Fisheries Resource Recovery, 2010: 35-50.
- [63] 陈勇. 中国现代化海洋牧场研究与建设[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(2): 147-154.

Development status of floating reef and its application prospect in marine ranching in the South China Sea

FENG Boxuan^{1,2,3}, XU Qiang^{1,2,3}, SUN Chunyang^{1,2,3}, GAO Fei^{1,2,3}, WANG Aimin^{1,2}, ZHU Yupeng⁴

(1 *State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in South China Sea, College of Marine Sciences,*

Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China;

2 The Ocean College of Hainan University, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China;

3 Hainan Provincial Key Laboratory of Tropical Aquatic Biotechnology,

Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China;

4 Sansha Guohaixintong Technology Development Co., Ltd., Haikou 570100, Hainan, China)

Abstract: The development of modern tropical marine ranching is an important means to conserve fishery resources and protect the marine ecological environment in the South China Sea, which has far-reaching significance for the conservation and scientific utilization of fishery resources in the South China Sea. Artificial reefs are one of the important tools to create marine ranching habitats. However, due to the deep water in the South China Sea, conventional reefs are difficult to play a role, whereas floating reefs can make use of the water space in the middle and upper layers, and are the best facilities to create deep water fishing grounds. This study reviews the types, functions, and application scenarios of floating fish reefs, summarizes relevant research and current status both domestically and internationally, and looks forward to the future of floating fish reefs in the South China Sea, including their role in information-based monitoring of ocean ranching, recreational fishing, conservation of upper-middle level fishery resources, and the construction of offshore ocean ranching.

Key words: floating reefs; anchored floating reefs; resource conservation; tropical marine ranching; the South China Sea