

# 海洋牧场建设技术研究进展

王栋梁<sup>1,2</sup>, 余景<sup>1\*</sup>, 陈丕茂<sup>1</sup>

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东省渔业生态环境重点开放实验室, 农业农村部南海渔业资源环境科学观测实验站, 广东省海洋休闲渔业工程技术研究中心, 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; 2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

**摘要** 海洋牧场是养护渔业资源、修复生态环境、实现海洋渔业资源与近海生态系统和谐发展的重要途径。综述了国内外海洋牧场生物资源评估技术、生物增殖技术、物种驯化控制技术、人工鱼礁水动力特性技术、人工鱼礁结构及工程材料开发技术、海洋牧场监测技术 6 项技术的定义、方法及其应用效果, 从研究基础、科技水平和支撑发展 3 个层面分析了我国海洋牧场面临的问题, 并展望了我国海洋牧场技术的发展趋势和研究方向。

**关键词** 海洋牧场; 技术; 进展

中图分类号 F326.4 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)06-0007-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.06.003



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Progress of Technologies in Marine Ranching Construction

WANG Dong-liang<sup>1,2</sup>, YU Jing<sup>1</sup>, CHEN Pi-mao<sup>1</sup> (1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Engineering Technology Research Center of Marine Recreational Fishery, Key Laboratory of Marine Ranching Technology, CAFS, Guangzhou, Guangdong 510300; 2. College of marine science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306)

**Abstract** Marine ranching is an important way to conserve fishery resources, restore the ecological environment, and achieve the harmonious development of marine fishery resources and offshore ecosystems. This paper summarized the definition, methods and application effects of marine ranching, including marine ranching biological resources assessment technology, biological proliferation technology, target species domestication control technology, artificial reef hydrodynamic characteristics technology, artificial reef structure and engineering materials development technology, marine ranching monitoring technology. Problems faced by China's marine ranching from three aspects, such as research basis, technology level and supporting development were analyzed. The development trend and research direction of marine ranching technology in China was prospected also.

**Key words** Marine ranching; Technologies; Progress

海洋牧场是指基于海洋生态系统生物与环境相互作用的原理, 在特定海域内, 通过建设人工鱼礁、海藻场、海草床等工程, 构建或修复海洋生物繁殖、生长、索饵和避敌所需的场所, 并结合增殖放流、生物驯化控制、休闲渔业开发、资源环境监测和巡查管护等措施, 实现海域生态环境改善、渔业资源自然增殖及持续健康开发利用的复合型渔业模式<sup>[1]</sup>。海洋牧场建设的目的是恢复并提高海域生物多样性和渔业资源量、以确保渔业资源持续稳定增长, 以及在持续高效利用海洋资源的同时保护海洋生态系统、实现海洋渔业持续健康发展。经过多年发展, 我国海洋牧场已建设形成一定规模, 在增殖和恢复渔业资源、修复和改善海洋生态环境、促进渔民转产增收等方面取得了显著效果。但由于起步较晚, 我国海洋牧场发展总体仍处于初级阶段, 存在研究基础薄弱、科技水平落后、支撑发展不足等问题。因此, 海洋牧场关键技术的研究已成为我国“蓝色粮仓”建设亟待解决的重要问题。笔者在综述国内外海洋牧场建设技术研究进展的基础

上, 分析和总结了海洋牧场建设中 6 项技术的研究方法, 阐述了这 6 项技术的优点和不足, 为我国海洋牧场的科学建设提供參考。

## 1 海洋牧场建设关键技术和方法

**1.1 海洋牧场生物资源评估技术** 海洋牧场生物资源的监测和评估是基于电子和声学原理, 评估海洋牧场生物资源状况的技术。其中, 探鱼仪可以获取海洋牧场部分生物的游泳速度、运动方向、生物种群厚度和密度中心等渔业资源信息<sup>[2-3]</sup>。刘思双<sup>[4]</sup>设计了一种多波束双频探鱼仪, 并在湖泊中完成了试验。张小辉<sup>[5]</sup>、张淑娟<sup>[6]</sup>对多波束探鱼仪信号的采集处理以及显控平台进行了研究, 为了提高显控软件的可靠性, 将 VxWorks 嵌入式系统应用于多波束探鱼仪显控平台的开发<sup>[7]</sup>。李更<sup>[8]</sup>对多波束探鱼仪的多通道发射机、多通道接收机、电源系统以及数字信号处理平台的逻辑设计方案进行了研究。为了使探鱼仪更加便携, 服务休闲娱乐的需求, 李云红等<sup>[9]</sup>利用 Wi-Fi 技术将手机 APP 与硬件结合, 设计了一款便携式探鱼系统, 该探鱼系统能够根据回波信号判别目标, 并清晰地显示在手机应用程序界面上。但由于探鱼仪获得的数据是在复杂的海洋环境下采集的, 未知和不确定的因素会对数据造成较大影响, 相对于探鱼仪的发展, 目前我国在探鱼仪数据预处理方面的研究较少<sup>[10]</sup>。

利用水声学技术来监测渔业资源十分高效, 不但对资源没有破坏性, 而且摆脱了光学法中光波传播距离短的缺点。

**基金项目** 国家重点研发计划(2018YFD0900901); 广东省自然科学基金(2018A030313120); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2018HY-ZD0104, 2016HY-ZD01); 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所)开放课题(LTO1806)。

**作者简介** 王栋梁(1995—), 男, 河南焦作人, 硕士研究生, 研究方向: 海洋渔业遥感。\* 通信作者, 副研究员, 博士, 从事海洋牧场生态变动研究。

**收稿日期** 2019-08-28; **修回日期** 2019-09-30

汤勇等<sup>[11]</sup>针对一般大陆架水域、海洋牧场和淡水湖泊等生境,研究鱼类和浮游动物的水声学识别和监测技术。在我国南海,研究者借助生物学拖网采样技术,利用 Echoview 软件对声学数据进行分析处理,结合渔业资源拖网数据,对生物资源量进行评估<sup>[12]</sup>。此外,基于声学影像分析和渔业资源调查结果,对海洋牧场渔业资源进行评估的方法,验证了声学方法在海洋牧场渔业资源评估中的效果<sup>[13]</sup>。由于起步较晚,我国对于鱼群的遮蔽效应、可能存在的回避行为以及利用声学回波来识别区分鱼类的研究还不够,相应的鱼类声学数据库的构建还有待进一步研究。

**1.2 海洋牧场生物增殖技术** 海洋牧场生物增殖技术是指使用放流、底播、移植等人工方式向海洋牧场投放资源关键种亲体、种苗等水生生物以增加其资源量,解决海洋牧场自然种群补充不足等问题<sup>[14]</sup>。

日本放流规模达百万尾以上的种类有近 30 种,不仅有洄游范围小、固着性大的岩礁性物种,也包括大范围洄游鱼类。2005 年确定了所恢复的鱼种数量为 76 种<sup>[15]</sup>。杂色蛤和虾夷扇贝是目前日本放流最多的品种。洄游鱼类的放流数量达到 50 亿尾以上,其中真鲷放流量每年达 1 700 万余尾。日本是世界上对鲑鳟开展增殖放流最早的国家之一,所捕捞的鲑鱼几乎来自增殖放流。三疣梭子蟹在以濑户内海为中心的海域放流,也取得明显效果。在开展高度洄游性鱼类的增殖放流工作中,日本已形成了一套完善的运作机制<sup>[1,16-17]</sup>。韩国的增殖对象以定居性的鲆鲽鱼、黑鲷、条石鲷、石斑鱼、平鲆等和鲍鱼、文蛤、扇贝以及梭子蟹等为主,以洄游性鱼类为辅<sup>[18]</sup>。韩国先后建立了 19 个国家级和地区级育苗场,繁育了 50 多种种苗<sup>[19]</sup>,放流鱼类 9.56 亿尾,放流数量最多的品种为对虾、牙鲆和许氏平鲆,投入放流金额最多的品种为鲍鱼、牙鲆、许氏平鲆。近年来海参、黑鲷、三疣梭子蟹等经济价值较高的品种也越来越多,品种更加多样化,每年约有 40 种,以海水类为主<sup>[20-21]</sup>。虽然进行了大量的放流工作,但韩国对于放流种苗的质量鉴定尚未形成统一的标准,对于不同种苗的投放数量也有待进一步研究。

国内主要研究了真鲷、许氏平鲆、牙鲆、鲍鱼、海胆、刺参等在不同结构、材料鱼礁表面的附着效果与周围的聚集效果<sup>[22-24]</sup>,从生物学角度为人工鱼礁的结构选型提供依据。在此基础上,逐渐形成了适宜的增殖种类筛选流程<sup>[25]</sup>,并建立了生态系统水平的增殖种类生态容量评估技术<sup>[26]</sup>。构建了融合增殖群体数量动态、生态适合度和生态风险于一体的增殖效果量化评估指标体系,建立了以调查实测和模型模拟为核心的增殖功效评估方法<sup>[27-29]</sup>,研发了基于回捕强度和回捕规格的增殖资源高效利用方式<sup>[28]</sup>。针对海洋牧场牧化品种增殖放流技术研发了适宜性品种筛选技术<sup>[25]</sup>、最适放流规格和数量技术<sup>[30]</sup>、鱼虾苗种中间培育技术<sup>[31-32]</sup>、标志放流技术<sup>[33]</sup>,目前我国已建立起南海生态增殖型、东海聚鱼增殖型和黄海海珍品增殖型海洋牧场配套技术模式,并建立了海洋牧场立体最佳增殖技术模式,有力推动了我国海洋牧场的建设<sup>[34]</sup>。

**1.3 海洋牧场对象物种驯化控制技术** 对象物种驯化控制技术是以行为学理论为基础,利用高科技手段,建立对象生物行为驯化系统,从声、光、电、磁等与鱼礁和饵料等物理、生物手法相结合驯化对象生物,使其从发生到捕获始终受到有效的行为控制的技术<sup>[35]</sup>。研究者在黄渤海对重要恋礁性鱼类许氏平鲆的音响驯化时段进行了初步研究<sup>[36]</sup>。有学者开发了无人值守式驯化装置及水下视频监控系统,建立了黑鲷等重点牧化品种的音响驯化技术,构建了驯化效果评估方式和生态高效的驯化种苗采捕方式<sup>[37]</sup>。在南海,放流物种行为控制技术主要以音响驯化结合饵料投喂的方式,研发鱼虾“声频-饵诱”驯化控制技术,其应用效果初步显现<sup>[38-40]</sup>。同时研发了海上全自动音响驯化新设备,结合海上现场试验的方法,建立网捕、潜采、游钓等采捕技术,提高了产出效率;并开展了气泡幕拦截技术试验研究,确定了最佳拦截效果气泡幕密度<sup>[41]</sup>。音响驯化是增加海洋牧场回捕率的手段之一,目前该技术在我国的研究尚不深入,处于试验阶段。

**1.4 人工鱼礁水动力特性技术** 在波、流作用下人工鱼礁的水动力特性不仅决定着其周围的流场效应,而且影响其自身的稳定性,通过长时间的放置,这种特性对鱼礁周围的化学、生态环境将产生巨大的影响<sup>[42]</sup>,因此研究人工鱼礁的水动力特性是发展人工鱼礁的关键。

日本自 20 世纪 60 年代开始对人工鱼礁的水动力学特性进行较为系统的研究。通过水槽模型试验,定量研究了礁体模型周围流场的变化及影响范围,并从很多试验数据中总结出不同礁体模型的流体力学特性,为人工鱼礁构型优化提供了科学数据<sup>[43]</sup>。马来西亚学者研究了一种新型结构人工鱼礁(头盔人工礁体)的水动力特性,这种礁体中不同开口的特殊形状改善了单元内流速分布情况,从而增加了礁内渔业资源的生物量<sup>[44]</sup>。

在国内,针对方型礁、多棱柱型礁、圆管型礁、星体型礁、M 型礁、大型组合式生态礁等,采用粒子图像测速技术 (particle image velocimetry, PIV)<sup>[45-47]</sup>、计算机数值模拟技术<sup>[48-56]</sup>、水槽试验<sup>[57]</sup>和 风洞试验<sup>[58]</sup>等物理模型和仿真分析,研究了单体鱼礁形状、尺寸对周围流体流态的影响,为鱼礁结构优化提供科学依据。针对复杂礁群,引入通透系数,通过建立通透系数与礁体周围流场的关系,实现复杂礁体简单化,为大范围模拟礁群周围流场提供一种新思路<sup>[55]</sup>。通过分析不同礁体摆放方式和组合布局模式对流场分布的影响,为单位鱼礁的配置规模、布局方式和摆放设计提供参考。

水槽试验或风洞试验只能反映人工鱼礁周围局部的流速流向,不能对整个流场进行准确、全面的分析<sup>[59]</sup>,随着计算机技术的发展,数值模拟能够准确模拟鱼礁周围的流场<sup>[56-60]</sup>。目前,我国对于流场效应的研究方法已经逐渐从单一的风洞试验、水槽试验为主,转为以数值模拟方法为主。尤其是近几年,利用 FLUENT 软件对鱼礁周围流场进行模拟的研究发展很快,对方型礁、多棱柱型礁、圆管型礁等类型礁体进行了流场的模拟,从二维数值模拟扩展到三维数值模拟<sup>[48,51-52,55-56]</sup>,并对比分析了不同模型的模拟效果<sup>[61]</sup>。林军

等<sup>[54]</sup>研究表明,采用大涡模拟法(large eddy simulation, LES)的湍流模型模拟的涡旋运动的变化更符合实际的流动,为以后的研究提供参考。由于PIV技术避免了普通水槽试验中接触点干扰和测试点不足的缺陷,能在瞬间记录下大量空间上的速度信息,水槽试验也从普通水槽试验转为结合PIV的水槽试验或是利用计算机数值模拟的水槽试验。在持续的研究中,关于流场效应的评价体系正在不断完善,马苒洋等<sup>[49]</sup>针对不同开口比的人工鱼礁对周围流场效应的影响进行了全面评价,初步建立了基于流场效应影响的评价体系,但由于鱼礁周围生态系统的复杂性,评价体系还有待于进一步完善。

在人工鱼礁稳定性的研究方面,一般通过理论计算<sup>[62]</sup>、风洞试验<sup>[63]</sup>、数值模拟<sup>[64]</sup>等获得人工鱼礁的最大受力、抗漂移系数、抗倾覆系数等参数来进行人工鱼礁稳定性的判断。目前针对十字型礁<sup>[65]</sup>、钢制四方台型礁<sup>[66]</sup>、回字型礁<sup>[67]</sup>、方型礁<sup>[62]</sup>等,结合其投放的海域状况验证了礁体投放后的稳定性。但目前礁体稳定性的研究对于沉降作用多数只进行了定性分析,其定量的数值模拟研究还有待进一步发展。在鱼礁定位投放的研究方面,基于小振幅波和力学理论,以车叶型鱼礁为研究对象,分析了车叶型鱼礁在不同波浪、不同水深、不同海床坡度及附着生物等条件下的安全性,确定了车叶型鱼礁的安全重量和适宜投放的水深范围<sup>[68]</sup>。目前,人工鱼礁的定位投放依据的通常是对鱼礁稳定性及流场效应等的计算结果,还需要加大对投放海域的底质条件、水文条件和环境生物等的综合评估。

**1.5 人工鱼礁结构及工程材料开发技术** 目前,日本是世界上人工鱼礁建造规模最大的国家,日本的人工鱼礁已有300多种形状,而且还在不断研发新型鱼礁。日本的人工鱼礁类型,按照鱼礁的不同功能和作用,分为资源增殖型鱼礁、环境改善型鱼礁、渔获型鱼礁、游钓型鱼礁和防波堤构造型鱼礁等;按投放水层分为底层人工鱼礁、悬浮式人工鱼礁等;按鱼礁材料不同分为混凝土鱼礁、钢材鱼礁和混合型鱼礁等<sup>[69]</sup>。为了更合理地建设人工鱼礁,日本在人工鱼礁建设上出现了新动向,开始建设贝壳礁、高层鱼礁等<sup>[70]</sup>。建筑规模从小到大,已逐渐形成了类型多样化、结构复杂化、材料现代化、建筑规范化的人工鱼礁建设体系。

意大利通过政府和民间团体共同投资,有组织、有计划、有管理地投放鱼礁,除了利用废船、废轮胎外,还利用煤灰和混凝土混合鱼礁。澳大利亚和欧洲各国主要是通过沉放退役军舰和废旧船只、废轮胎等作为鱼礁。西班牙是由政府和民间团体一起投资建设鱼礁和实施管理的欧洲国家,除投放废旧船和废轮胎外,也在禁渔区投放大型混凝土构件,目的是防止拖网渔船作业和保护渔业资源。马来西亚、泰国、菲律宾等国投入资金不多,投礁数量也不多,大部分是投放废旧船、废轮胎等作鱼礁,只有少量的钢筋混凝土鱼礁,有些甚至用竹、木、石块作鱼礁<sup>[71]</sup>。但也提出了一些新型建礁材料,如印尼政府-海洋事务和渔业部提出了一种新材料来制造人工生境,包括由聚丙烯塑料(PP)制成的人工珊瑚礁<sup>[72]</sup>。

马来西亚研究了香蕉废料颗粒(BPP)与建筑垃圾的再生骨料混凝土(RAC)作为河口生态系统的人工混凝土礁的创新用途,并已得到批准使用,显著解决了国家固体废物管理与污染中的一个问题,有助于河口生态系统的绿色可持续发展<sup>[73]</sup>。

人工鱼礁的结构是根据投放海域的波浪特征、海水水质、海水盐度等物理化学特征及投礁目的来进行设计,用于延长礁体寿命、增加礁体稳定性,提高礁体生态效益。目前,我国针对投放海域设计了星型礁、十字型礁、回字型礁、生态复合型礁、三角形礁等,并对礁体形状进行了一定的改良<sup>[74]</sup>。为了适应向更深海域建设海洋牧场的需求,王江涛<sup>[75]</sup>在浮式鱼礁的基础上,设计了一种变流鱼礁,该鱼礁区别于底层鱼礁,可以悬浮于海水中,能够将上层温度较高、溶氧多和饵料生物丰富的海水输送到下层。满足了不同地形、海域人工鱼礁的建设需求。

在礁体材料方面,通过对混凝土、金属、木材、橡胶、粉煤灰、矿渣、工程塑料及复合型材料的物理性能、化学作用、生物附着、鱼类诱集、环境效应等进行了一系列的研究,得出应用效果最好的是混凝土人工鱼礁<sup>[76-83]</sup>。通过对凝胶材料及各组分配比的优化,不仅在抗压强度、生态效应、生物附着方面有了显著提升<sup>[76,79-81]</sup>;还充分利用了各种废弃材料,如冶金渣、牡蛎壳、粉煤灰、矿粉、钢渣和炉渣等<sup>[77-78,82]</sup>,实现了低碳环保。通过模拟流动海水环境下的混凝土侵蚀试验,计算和预测了混凝土人工鱼礁的耐久性寿命<sup>[84-85]</sup>,表明钢渣复合材料混凝土人工鱼礁在自然海水中的寿命大于强度等级为C30、C35混凝土人工鱼礁的寿命,且通过适当增加保护层厚度可有效提高混凝土抗氯离子侵蚀的耐久性寿命。建礁材料逐渐向综合化、低碳化发展,有利于海洋牧场的可持续发展。

**1.6 海洋牧场监测技术** 海洋牧场监测技术是指通过设置海洋环境监测站点,使用联网和无线发射等技术手段,建立针对海水环境关键因子的自动监测和预警预报系统,及时获取海洋牧场环境变化的信息,以避免生态系统的崩溃和突发性的灾害发生<sup>[86]</sup>。

我国黄渤海区从2015年开始全面启动海洋牧场观测网项目,坚持“互联网+海洋牧场”,实现对海洋牧场的可测、可控、可视,该项目集成的海底视频观测、海洋水质监测和大型休闲管理平台,协助海洋牧场管理和生产人员调控渔业科学养殖生产,提升海洋牧场安全性、经济和生态价值展示海洋牧场的产业形象,普及海洋渔业文化知识。花俊等<sup>[87]</sup>自主研发了海洋牧场远程水质监测系统,实现了相关水质参数的长期有效地在线监测和传输。在设计系统的体系结构时,首先结合海洋牧场的环境特点、水产生物的生长发育影响因素等确定监测参数,进而确定传感器的选择,再结合其他模块完成监测点软硬件的设计,其中其他模块包括数据处理模块、网络通信模块以及电源模块,设计完成的监测点系统由配套的浮标装载,从而形成独立的监测点,最终每个监测点通过GPRS/3G远程通信方式实现数据的无线上传并由监控

软件显示、处理。还有学者针对海洋牧场环境监控需求,开发了海洋牧场环境水质、海流实时在线监测技术及装置<sup>[88]</sup>,实现了实时在线远程监测海洋牧场海域水质、海流等状况。总体上,我国海洋牧场自动化监控系统多是在特定海域进行试验,产业化应用较少。

## 2 我国海洋牧场技术面临的问题

**2.1 研究基础薄弱** 海洋牧场的建设是一个系统工程,涉及海洋物理、海洋化学、海洋地质、海洋生物及建筑工程等学科<sup>[14]</sup>。目前,我国对人工鱼礁材料选择、礁体设计及其最佳配置、鱼礁投放技术、海洋牧场效果评估和监测等方面开展了一些研究,但缺乏系统的研究,海洋牧场基础研究进度滞后于建设速度。同时,海洋牧场配套技术、环境优化技术研究的力度尚有不足,海水苗种培育、海底构造结构、海湾环境系统、鱼类和鱼群行为洄游观测等方面的研究更需加强。另外,当前我国海洋牧场建设科研投入不够,从事海洋牧场研究的机构严重不足,各大高校对海洋牧场的专业人才培养力度不够,没有建立多层次的人才培养和引进机制,海洋牧场相关人才数量及科研创新能力尚不能满足我国快速发展海洋牧场建设的需求<sup>[89]</sup>。

**2.2 科技水平落后** 我国海洋牧场技术开发水平基本上处于初期探索阶段,在高科技技术应用方面缺乏足够的研究,虽然在生物增殖以及工程材料的开发上取得了一些关键技术的突破,但生态调控、物种驯化控制等领域尚未开展深入研究,现有技术未形成体系,难以有效支撑我国大规模海洋牧场建设、管理和开发利用。此外,现有的技术多为考虑个别品种的增殖效益,对于增殖品种的可持续发展、海域水生生物多样性的保护、海域的总生态容量、海域生态系统稳定性方面则考虑较少。在具体做法上缺乏总体观念和系统的开发思维,实施上缺乏层次部署,技术上缺乏系统性、针对性研究和技术开发。

**2.3 支撑发展不足** 海洋牧场建设之前,需要对拟建设的海域充分的了解,为了避免建设海洋牧场中的盲目性、随意性、片面性,在大量的实践及试验数据的基础上,建立一套标准规范,面对不同的海域,针对其特有的环境、地形、人文特征,建立不同的技术体系,只有将技术标准化、规范化,海洋牧场的建设才能迈向现代化<sup>[90]</sup>。标准化方面,我国尚未形成统一的科学、细致、全面的建设标准。一旦缺乏标准,海洋牧场的生态效应将会被弱化,人工鱼礁的选材及增植物种的放流将片面追求经济效益,很难从根本上起到增殖和可持续发展的需求。同时,由于产学研合作层次较低,使得许多研究者对最新科研成果没有进行科研成果后期的研究和转化,加之对科技成果转化平台不够重视,使得许多科研成果无法在海洋牧场建设上得到有效的推广利用。

## 3 海洋牧场技术的发展趋势

当前海洋牧场已成为引领低碳潮流的海洋生物资源可持续发展利用的重要载体。海洋牧场建设也已成为世界发达国家发展渔业、保护资源的主攻方向之一。我国拥有众多自然条件优良、适宜建设海洋牧场的港湾,但海洋牧场的建

设是一个系统工程,需要多学科技术融合和政府、企业、渔民的参与。未来的海洋牧场技术在学习借鉴国外先进经验的同时,结合我国实际情况,需要在以下几方面加强技术研究:完善海洋牧场建设和管理的技术支撑体系;加强对海洋牧场布局、规模、礁体设计、投放施工、开发利用等进行科学实验和研究;对自然港湾进行全面调查,对适宜建设海洋牧场的海区进行初步规划,加强对原始海洋环境的保护;对海洋牧场建设的关键与共性技术难题开展联合攻关,大力推广实用技术和成功经验;建立经济、生态、社会效益评估机制,及时对海洋牧场生态环境、资源状况进行跟踪监测,全面总结、科学评估、综合分析取得的效果。

## 参考文献

- [1] 农业部渔业渔政管理局,中国水产科学研究院.中国海洋牧场发展战略研究[M].北京:中国农业出版社,2016:3.
- [2] 袁俊,韩军,山下敏实,等.基于水平鱼探仪影像的金枪鱼追踪系统[J].江苏农业科学,2012,40(11):392-395.
- [3] 张吉昌,赵宪勇,王新良,等.商用探鱼仪南极磷虾声学图像的数值化处理[J].渔业科学进展,2012,33(4):64-71.
- [4] 刘思双.基于DSPIC的双频探鱼仪系统设计[D].杭州:杭州电子科技大学,2014:62.
- [5] 张小辉.多波束探鱼仪信号采集与处理板设计与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008:10-62.
- [6] 张淑娟.多波束探鱼仪相控阵设计及信号处理平台实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009:13-69.
- [7] 田晓东.VxWorks 嵌入式操作系统在多波束探鱼仪中的应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008:6-63.
- [8] 李更.多波束探鱼仪模拟系统实现与数字逻辑设计[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011:7-57.
- [9] 李云红,王震亚,郑婷婷,等.基于智能手机的便携探鱼仪设计[J].国外电子测量技术,2017,36(9):135-138.
- [10] 吴培艳.探鱼仪数据预处理及显示技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014:1-3.
- [11] 汤勇,赵宪勇,王新良,等.不同生境环境条件下鱼类及浮游动物的水声学识别与监测[C]/2014水域生态环境修复学术研讨会论文集.北京:中国工程院,中国水产科学研究院,2016.
- [12] 李娜娜,陈国宝,于杰,等.大亚湾杨梅坑人工鱼礁水域生物资源量声学评估[J].水产学报,2011,35(11):1640-1649.
- [13] 张俊,陈丕茂,房立晨,等.南海柘林湾—南澳岛海洋牧场渔业资源本底声学评估[J].水产学报,2015,39(8):1187-1198.
- [14] 郝向举,罗刚,王云中,等.我国海洋牧场科技支撑基本情况、存在问题及对策建议[J].中国水产,2017(11):44-48.
- [15] MASUDA R, TSUKAMOTO K. Stock enhancement in Japan: Review and perspective[J]. Bulletin of marine science, 1998, 62(2): 337-358.
- [16] HAMASAKI K, KITADA S. A review of kuruma prawn *Penaeus japonicus* stock enhancement in Japan[J]. Fisheries research, 2006, 80(1): 80-90.
- [17] 李继龙,王国伟,杨文波,等.国外渔业资源增殖放流状况及其对我国的启示[J].中国渔业经济,2009,27(3):111-123.
- [18] 缪圣赐.韩国实施海洋牧场事业的长期发展计划[J].现代渔业信息,2006(11):32-32.
- [19] 焦桂英,孙丽,刘洪滨.韩国海洋渔业管理的启示[J].海洋开发与管理,2008,25(12):42-48.
- [20] 杨宝瑞,陈勇.韩国海洋牧场建设与研究[M].北京:海洋出版社,2014:17-207.
- [21] 阮雯,纪伟伟,方海,等.韩国渔业管理制度探析[J].渔业信息与战略,2015,30(1):55-60.
- [22] 房元勇,唐衍力.人工鱼礁增殖金乌贼资源研究进展[J].海洋科学,2008,32(8):87-90.
- [23] 公丕海,李娇,关长涛,等.莱州湾增殖礁附着牡蛎的固碳量试验与估算[J].应用生态学报,2014,25(10):3032-3038.
- [24] 王宏,陈丕茂,章守宇,等.人工鱼礁对渔业资源增殖的影响[J].广东农业科学,2009(8):18-21.
- [25] 王伟定,俞国平,梁君,等.东海区适宜增殖放流种类的筛选与应用[J].浙江海洋大学学报(自然科学版),2009,28(4):379-383.
- [26] 杨林林,姜亚洲,袁兴伟,等.象山港典型增殖种类生态容量评估[J].海洋渔业,2016,38(3):273-282.

- [27] 陈丕茂.渔业资源增殖放流效果评估方法的研究[J].南方水产科学, 2006, 2(1): 1-4.
- [28] 姜亚洲, 林楠, 刘尊雷, 等.象山港黄姑鱼增殖放流效果评估及增殖群体利用方式优化[J].中国水产科学, 2016, 23(3): 641-647.
- [29] 李陆斌.我国水生生物资源增殖放流的初步研究[D].上海: 上海海洋大学, 2011: 32-41.
- [30] 陈丕茂.南海北部放流物种选择和主要种类最适放流数量估算[J].中国渔业经济, 2009, 27(2): 39-50.
- [31] 常杰, 牛化欣, 李树国.细鳞鱼苗种中间培育技术[J].水产科技情报, 2013, 40(5): 278-280.
- [32] 张锡佳, 王云中, 王四杰, 等.中国对虾放流增殖苗种中间培育技术[J].齐鲁渔业, 2006(11): 20-21.
- [33] 陈锦淘, 戴小杰.鱼类标志放流技术的研究现状[J].上海水产大学学报, 2005(4): 4451-4456.
- [34] 陈丕茂.海洋牧场配套技术模式与示范[C]//水域生态环境修复学术研讨会论文集.[出版地不详]: [出版者不详], 2014.
- [35] 杨金龙, 吴晓郁, 石国峰, 等.海洋牧场技术的研究现状和发展趋势[J].中国渔业经济, 2004(5): 48-50.
- [36] 田方, 黄六一, 刘群, 等.许氏平鲉幼鱼优势音响驯化时段的初步研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(10): 47-50.
- [37] 陈德慧.基于海洋牧场的黑鲷音响驯化技术研究[D].上海: 上海海洋大学, 2011: 9-52.
- [38] 袁华荣, 陈丕茂, 周艳波, 等.海洋牧场音响驯化技术应用研究[C]//现代海洋(淡水)牧场国际学术研讨会论文集摘要集.大连: 中国水产学会海洋牧场研究会, 2017.
- [39] 袁华荣, 陈丕茂, 贾晓平, 等.200Hz 方波连续音对真鲷幼鱼驯化反应的研究[J].渔业现代化, 2012, 39(1): 27-33.
- [40] 袁华荣, 陈丕茂, 贾晓平, 等.利用 500Hz 方波连续音驯化南海真鲷幼鱼的效果[J].南方水产科学, 2012, 8(1): 36-42.
- [41] 袁华荣.南海北部三种典型放流鱼类幼鱼驯化技术初步研究[D].上海: 上海海洋大学, 2012: 10-68.
- [42] 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(3): 257-262.
- [43] 佐藤藤, 影山方郎.人工鱼礁[M].东京: 恒星社厚生阁, 1984: 17-26, 38-42.
- [44] YAAKOB O B, AHMED Y M, JALAL M R, et al. Hydrodynamic design of new type of artificial reefs[J]. Applied mechanics & materials, 2016, 819: 406-419.
- [45] 付东伟, 陈勇, 陈衍顺, 等.方形人工鱼礁单体流场效应的 PIV 试验研究[J].大连海洋大学学报, 2014, 29(1): 82-85.
- [46] 刘彦, 赵云鹏, 崔勇, 等.正体人工鱼礁流场效应试验研究[J].海洋工程, 2012, 30(4): 103-108.
- [47] 关长涛, 刘彦, 赵云鹏, 等.复合 M 型人工鱼礁粒子图像测速二维流场试验研究[J].渔业现代化, 2010, 37(1): 15-19.
- [48] 吴伟, 姜少杰, 袁俊, 等.带叶轮的人工鱼礁流场效应的数值模拟研究[J].科技创新与应用, 2016(32): 16-18.
- [49] 马政洋, 张瑞瑾, 廖彦彬, 等.开口比变化对人工鱼礁流场效应影响的评价[J].安徽农业科学, 2018, 46(5): 105-108.
- [50] 黄远东, 付登枫, 何文荣.人工鱼礁开口比对流场效应影响的三维数值模拟研究[J].水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 39-43.
- [51] 肖荣, 杨红.镂空型人工鱼礁流场效应的数值模拟研究[J].上海海洋大学学报, 2015, 24(6): 934-942.
- [52] 黄远东, 龙催, 邓济通.三柱型人工鱼礁绕流流场的 CFD 分析[J].水资源与水工程学报, 2013, 24(1): 1-4.
- [53] 白一冰, 张成刚, 罗小峰.吕泗渔场人工鱼礁群流场效应及稳定性研究[J].人民长江, 2018, 49(8): 25-30.
- [54] 林军, 章守宇, 叶灵娜.基于流场数值仿真的人工鱼礁组合优化研究[J].水产学报, 2013, 37(7): 1023-1031.
- [55] 李珺, 林军, 章守宇.方形人工鱼礁通透性及其对礁体周围流场影响的数值实验[J].上海海洋大学学报, 2010, 19(6): 836-840.
- [56] 郑延璇, 梁振林, 关长涛, 等.三种叠放形式的圆管型人工鱼礁流场效应数值模拟与 PIV 试验研究[J].海洋与湖沼, 2014, 45(1): 11-19.
- [57] 张硕, 孙满昌, 陈勇.不同高度混凝土模型礁背涡流特性的定量研究[J].大连水产学院学报, 2008(4): 278-282.
- [58] 刘洪生, 马翔, 章守宇, 等.人工鱼礁流场效应的模型实验[J].水产学报, 2009, 33(2): 229-236.
- [59] 刘洪生, 马翔, 章守宇, 等.人工鱼礁流场风洞实验与数值模拟对比验证[J].中国水产科学, 2009, 16(3): 365-371.
- [60] 崔勇, 关长涛, 万荣, 等.布设间距对人工鱼礁流场效应影响的数值模拟[J].海洋湖沼通报, 2011(2): 59-65.
- [61] 吴建, 刘德飞, 拾兵.可实现  $k-\epsilon$  模型在人工鱼礁流场分析中的模拟研究[J].中国水运, 2013, 13(1): 99-100.
- [62] 陶峰, 唐振朝, 陈丕茂, 等.方型对角中连式礁体与方型对角板隔式礁体的稳定性[J].中国水产科学, 2009, 16(5): 773-780.
- [63] 刘健, 许柳雄, 张硕, 等.人工鱼礁礁体模型阻力系数的实验研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, 41(10): 35-39.
- [64] 高潮, 毛鸿飞, 余报楚.基于 Fluent 对人工鱼礁稳定性的研究[J].山西建筑, 2012, 38(10): 257-259.
- [65] 吴子岳, 孙满昌, 汤威.十字型人工鱼礁礁体的水动力计算[J].海洋水产研究, 2003(4): 32-35.
- [66] 钟木求, 孙满昌, 章守宇, 等.钢制四方台型人工鱼礁礁体设计及稳定性研究[J].海洋渔业, 2006(3): 234-240.
- [67] 许柳雄, 刘健, 张硕, 等.回字型人工鱼礁礁体设计及其稳定性计算[J].武汉理工大学学报, 2010, 32(12): 79-83.
- [68] 唐振朝, 陈丕茂, 贾晓平.大亚湾不同波浪、水深与坡度条件下车叶型人工鱼礁的安全重量[J].水产学报, 2011, 35(11): 1650-1657.
- [69] 马丽.人工鱼礁建设过程管理及礁区管理的初步研究[D].青岛: 中国海洋大学, 2010: 12-13.
- [70] 于沛民, 张秀梅.日本美国人工鱼礁建设对我国的启示[J].渔业现代化, 2006(2): 6-7.
- [71] 刘同渝.国内外人工鱼礁建设状况[J].渔业现代化, 2003(2): 36-37.
- [72] KERTORAHARDJO S, P, VINCENT H, DUTA P H. Structure analysis on artificial reefs[J]. Applied mechanics and materials, 2018, 874: 27-34.
- [73] MAT JUSOH S, GHAZALI C M R, MAT AMIN K A, et al. Innovative uses of recycle waste materials as an artificial concrete reef for estuarine ecosystem[J]. Materials science and engineering, 2018, 374: 1-6.
- [74] 郑延璇, 梁振林, 关长涛, 等.等边三角形人工鱼礁礁体结构设计及其稳定性[J].渔业科学进展, 2014, 35(3): 117-125.
- [75] 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: 7-17.
- [76] 于淼, 倪文, 刘佳, 等.低碱度生态型人工鱼礁胶凝材料的初步研究[J].混凝土与水泥制品, 2011(11): 63-67.
- [77] 李琳琳, 苏兴文, 李晓阳, 等.鞍钢钢渣渣渣制备人工鱼礁混凝土复合胶凝材料[J].硅酸盐通报, 2012, 31(1): 117-122.
- [78] 李霞, 赵敏, 陈海燕, 等.多种废弃材料在混凝土人工鱼礁中的研究[J].混凝土, 2016(7): 149-152.
- [79] 张静文, 倪文.利用花岗岩石渣粉制备人工鱼礁材料的试验研究[J].矿物学报, 2012, 32(S1): 205-206.
- [80] 陈勇, 田涛, 倪文, 等.凝土胶凝材料作为人工鱼礁材料的可行性研究 I——凝土供试体的抗压强度、浸泡海水的 pH 及其与水泥供试体的比较[J].大连海洋大学学报, 2012, 27(3): 269-273.
- [81] 陈勇, 田涛, 赵子仪, 等.凝土胶凝材料作为人工鱼礁材料的可行性研究 II——供试体附着生物种类与生物量[J].大连海洋大学学报, 2012, 27(4): 344-349.
- [82] 王中杰, 倪文, 高木杰, 等.人工鱼礁用钢渣混凝土胶凝材料的水化特性[J].金属矿山, 2012(6): 156-159.
- [83] 李颖, 倪文, 陈德平, 等.冶金渣制备高强度人工鱼礁结构材料的试验研究[J].材料科学与工艺, 2013, 21(1): 73-78.
- [84] 王宏, 戴媛媛, 高燕, 等.人工鱼礁在自然海水条件下的腐蚀寿命研究[J].海洋湖沼通报, 2018(2): 118-124.
- [85] 陈海燕, 陈丕茂, 唐振朝, 等.海水环境下钢筋混凝土人工鱼礁的耐久性寿命预测[J].中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(9): 59-63.
- [86] 王宏, 戴媛媛, 高燕, 等.天津市海洋牧场建设的初步探讨[J].海洋湖沼通报, 2018(3): 162-168.
- [87] 花俊, 胡庆松, 李俊, 等.海洋牧场远程水质监测系统设计和实验[J].上海海洋大学学报, 2014, 23(4): 588-593.
- [88] 邢旭峰, 王刚, 李明智, 等.海洋牧场环境信息综合监测系统的设计与实现[J].大连海洋大学学报, 2017, 32(1): 105-110.
- [89] 郎舒妍, 曾晓光, 赵羽羽.强化创新驱动 发展海洋牧场[J].船舶物资与市场, 2017(4): 43-45.
- [90] 刘长成, 刘聪聪.推进海洋牧场建设的一些看法和建议[J].中国水产, 2018(3): 38-39.