人工鱼礁研究现状及未来展望

李　东[1, 2, 3], 侯西勇[1, 3], 唐　诚[1, 3], 张　华[1, 3]

(1. 中国科学院 烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院 海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003)

摘要: 人工鱼礁是建设海洋牧场的重要技术手段, 鱼礁投放后有助于改善沿海渔业生态环境、保护增殖渔业资源。近几十年, 随着人工鱼礁建设事业规模的不断壮大, 各国专家学者对人工鱼礁进行了多方面研究。作者在前人研究的基础上, 从鱼礁材料、结构设计、流场效应和数值模拟、鱼礁监测技术、管理体制、生态效益调查评估、经济价值评价等多个角度, 对人工鱼礁的研究现状进行详细论述, 最后从物理稳定性、监测管理、价值评估等 3 个方面提出人工鱼礁未来研究与发展的方向, 以期为中国大规模人工鱼礁建设的可持续发展提供一定的理论依据。

关键词: 人工鱼礁; 流场效应; 监测管理; 价值评估; 可持续发展

中图分类号: S953.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2019)04-0081-07

DOI: 10.11759/hykx20180720003

受环境污染、生境退化、过度捕捞和全球气候变化等因素的影响, 全球海洋渔业资源衰退明显。渔业专家和海洋生态学家普遍认为, 建设海洋牧场是海洋渔业的重要出路[1]。海洋牧场是基于海洋生态学原理和现代海洋工程技术、充分利用自然生产力、在特定海域科学培育和管理渔业资源而形成的人工渔场[2]。投放人工鱼礁是海洋牧场建设过程中采用的一种重要技术手段。合理的人工鱼礁建设有利于调整海洋产业结构、修复和改善海洋生态环境、增殖和优化渔业资源、促进海洋经济持续健康发展[3-5]。国内外学者围绕人工鱼礁已开展大量研究工作, 其关注点包括建造材料、造型设计、流场模拟、监测技术、管理体制、生态效应、经济价值等诸多方面。作者从人工鱼礁物理稳定性、监测管理技术、生态经济价值评估等 3 个方面对前人的研究进行梳理, 总结人工鱼礁的研究进展及未来发展方向, 以期为中国人工鱼礁建设事业的可持续发展提供一定的理论依据。

1　人工鱼礁物理稳定性

1.1　礁体材料及结构设计

人工鱼礁物理稳定性与礁体材料及其结构造型密切相关。构建人工鱼礁的材料可以分为天然材料、废弃物材料、建筑材料等 3 大类别。天然材料取材方便、制作方便、价格便宜且污染性低, 主要包含木质材料、贝壳、岩石等[6]。废弃物材料作为人工鱼礁是对废弃物的二次利用, 主要包含废旧船舰、废弃海洋平台及粉煤灰等。建筑材料主要指混凝土和钢材, 可充分利用钢筋混凝土的可塑性, 做成的礁体耐波性、稳定性较好。此外, 塑料、金属、混合材料等也可以作为构建人工鱼礁的材料, 用于实际建设。人工鱼礁材料的选择应综合考虑其功能性、兼容性、耐久性、稳定性、可获得性等要素, 以便获得最大的经济生态效益。

人工鱼礁结构外形主要有四方型、三角型、梯型、圆筒、十字型、人字型、箱型、星型、异型等[6]。鱼礁的结构设计需根据投放海域情况和礁体功能来确定。除自身结构刚度满足耐久性要求外, 鱼礁的稳定性和抗冲刷等需根据环境载荷工况特定计算确定。为确保礁体投放后不发生整体下沉, 也不至因波

收稿日期: 2018-07-20; 修回日期: 2018-11-26

基金项目: 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所)开放基金(2018KFJJ05); 中国科学院烟台海岸带研究所自主部署项目(YICY755011031); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19060205)

[Foundation: Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, YICCAS, No. 2018KFJJ05; Self-deployment Project of Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, No. YICY755011031; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA19060205]

作者简介: 李东(1985-), 男, 山东聊城人, 博士后, 主要从事近海生境演变研究, E-mail: dli@yic.ac.cn; 侯西勇, 通信作者, 电话: 0535-2109196, E-mail: xyhou@yic.ac.cn

流作用而滑移、倾覆，设计时需要验算基底承载力、滑移稳定性和倾覆稳定性，并分析礁体周围的海底冲淤情况[7]。一般而言，礁体造型设计需考虑流体力学因素及生物因素。研究表明礁体的轮廓高度、空隙结构使海底局部水动力发生变化，形成特殊的流场[8]；可根据波流动力学理论计算礁体在实际投放海域中所受到的最大作用力、抗漂移系数及抗倾覆系数等参数优化礁体结构[9]。不同的增殖和诱集对象对人工鱼礁礁体结构形式的要求不同，包括开口、表面积、形状及高度等[7]；对于以鱼礁作为栖息场的鱼种来说，鱼礁的空隙是非常重要的条件，鱼礁结构的遮蔽越强，内部缝隙越小的鱼礁对幼鱼的聚集效果越好。因此，为达到增殖目的，鱼礁结构设计需尽可能复杂多变，避免单一简单形状。

1.2 流场效应及数值模拟

鱼礁的稳定性除与所选材料、结构形状有关，在很大程度上还依赖于海流-底质-礁体系统内的相互作用[9]。人工鱼礁投放后，由于鱼礁对水流的阻碍作用导致周围的压力场发生变化，形成新的流场分布[10]。水流流经人工鱼礁，在礁体上部生成很强的局部上升流，礁体和优势流相互作用又在礁体下游形成背涡流[9, 11]。这些流动特性及其变化，将直接影响礁体周围及其内部的压力分布，进而影响礁体周围及内部泥沙、沉积物的分布状况，并对礁体稳定性产生一定影响[11, 12]。也正是由于鱼礁周围产生的上升流和背涡流促进上下层海水的交换，加快了营养物质的循环速度，才提高了海域的初级生产力、改善了海域生态环境，达到养护渔业资源的目的[13]。

人工鱼礁的流场效应一般通过物理模型试验方法与数值模拟方法进行模拟计算。物理模型试验法即在水槽、水池和风洞中的稳定流速下进行，采用模型测试手段对礁体结构本身和产生的流体力学特征进行定量分析，常用的方法有结构测试法和流场粒子图像测速法(PIV)[6]。日本、韩国对鱼礁流场及稳定性的模型实验研究较早。Kim[14]等对浅水区鱼礁的局地冲刷和下陷进行了实验室研究，认为鱼礁的形状对局地流有显著影响，底层流的扰动使鱼礁底部与底质的接触面减少，造成了鱼礁的不稳定和下陷。近年来国内学者通过模型实验法对人工鱼礁流场效应的研究也逐渐增多。刘洪生[15]通过风洞实验研究人工鱼礁流场效应，结果表明，模型迎流面和背流面分别产生上升流和背涡流，不同模型 z 方向的湍流强度均大于 x 方向。随着研究的深入，人们开始尝试利用数值模拟的方法分析人工鱼礁流场分布。Fujihara[16]等首次利用数学模型得到了鱼礁流场上升流的分布范围及特点。国内研究人员针对人工鱼礁流场的数值模拟也做了大量研究工作[11, 13, 17, 18]。姜昭阳[11]借助计算流体动力学软件 Fluent，得到人工鱼礁模型各断面压力分布、流场效应和礁体的受力情况，模拟结果与 PIV 的实测结果比较吻合。随着研究方法的不断改进，流场效应的数值模拟结果更接近水下礁体的实际状态，为礁体的设计和投放布局提供了重要的理论基础。

2 人工鱼礁监测管理技术

2.1 人工鱼礁监测技术

针对人工鱼礁投放后的监测与管理，传统的规划管理主要依靠 Google earth 或海图标注以及潜水员水下摄像、探摸[19]。近些年，声纳技术在海洋牧场建设中的应用逐渐增多。鱼礁选址是人工鱼礁建设首要考虑的重要环节，礁体投放后的监测分析是确保人工鱼礁成功建设的前提。根据侧扫声纳图像可以判别人工鱼礁的类别及海底底质类型[20]，还可了解礁石的冲淤程度，并对礁石体积进行估算[21]。上海海洋大学利用测深侧扫声纳系统和双频声学识别声纳，解决了投放区水下地形探测和人工鱼礁水下调查及稳定性探测的一系列问题[22]。随着声学技术的发展，多波束声纳为人工鱼礁的监测提供了更为快捷有效的手段。中科院烟台海岸带研究所利用 R2SONIC 获取鱼礁区精细的测深数据，通过提取地形变量，分析人工鱼礁引起的微地形地貌变化，为鱼礁的监测与效果评估工作提供了新的技术手段[19]。此外，高分辨率的多波束声纳还可以实现鱼礁的动态监测，为鱼礁管理者提供数据支撑[23]。伴随着声纳技术与计算机技术的发展，更先进精准的探测手段与信号处理方法将会在今后的人工鱼礁监测中发挥越来越重要的作用。

2.2 人工鱼礁管理体制

日本人工鱼礁建设效果显著，受到广大渔业从业者肯定，其成功经验值得我们借鉴。对人工鱼礁的管理方法取决于人工鱼礁的功能类型和当地渔业管理的模式。人工鱼礁建成后，要根据礁体类型，确定合适的捕捞作业方式。除限制捕捞方式外，还需要根据人工鱼礁区域的渔业资源状况进行捕捞限额管

理。国内多家科研单位对人工鱼礁的管理体制提出了可行的建设性方案。中国水产科学研究院东海水产研究所提出要划定人工鱼礁保护区、制定渔具限制措施、禁止倾倒废弃物、海图上标绘等措施，来保证人工鱼礁的生态、经济和社会效益；国家海洋信息中心提出借鉴国外人工鱼礁建设经验、实现人工鱼礁建设制度化与规范化、根据当地海域特点因地制宜等对策，来合理、高效地发展人工鱼礁事业。

为规范大规模人工鱼礁建设的可持续发展，中国沿海省市相继制定了相应的法律法规，如 2004 年的《广东省人工鱼礁管理规定》，2009 年的《河北省水产局人工鱼礁管理办法》、2014 年的《山东省人工鱼礁管理办法》等。为支持人工鱼礁建设项目管理，确保人工鱼礁项目建设质量和资金使用安全，2018 年 9 月农业农村部研究制定了《人工鱼礁建设项目管理细则》，是中国当前国家层面对人工鱼礁建设管理做出的最新规定指南。其中，建设方案中明确提出实现人工鱼礁的可视化、智能化、信息化建设，按照对人工鱼礁生态环境、生物行为和生产活动的管理需要，对拟建的海底观测平台、传输网络、岸基监测站、远程控制中心等进行技术可行的方案设计。国家和地方一系列法律文件的出台，使人工鱼礁建设有法可依，有助于人工鱼礁管理走向规范化、合理化、制度化。

3 人工鱼礁生态经济价值评估

3.1 生态效益调查评估

3.1.1 礁区渔业资源调查手段

生物量是生态系统健康程度的一个重要指标，投放人工鱼礁的主要目的是增加当地渔业资源量。由于光学法、直接捕捞法等传统调查手段的局限性，具有高效、不破坏生物资源、时空数据丰富等优点的渔业资源声学评估方法逐渐被广泛使用[24]。声学手段评估鱼礁建设效果一般采用科学鱼探仪对礁区内外水域进行声学调查，利用声学处理软件(Echoview)对数据分析处理，计算生物资源总量等，结合历史生态、生物学数据，对礁区生态效果做出综合评价[25]。欧、美、日等渔业发达国家采用声学评估技术对人工鱼礁水域生物资源量及其资源结构的调查已有诸多报道[26, 27]，包括鱼探仪、侧扫声纳以及多波束。Bolinger 等[28]应用侧扫声纳回波信号探测得到鱼礁区鱼类的生物量，与潜水调查结果保持一致。国内在该领域的研究还不多见，目前已发表的文献中，多是借鉴国外的经验做了一些探索性工作，南海水产研究所联合大连海洋大学利用 EY60 回声探测仪型对南海大亚湾及拓林湾海域人工鱼礁区水域生物资源量进行了声学评估[29, 30]。

3.1.2 礁区生态价值评价方法

鱼礁生态效果的综合评价包括鱼礁投放对生态系统各组分的影响效果之和[31]。由于人工鱼礁区生态系统的复杂性，其生态价值综合评价方法也不尽相同[32]。大连海洋大学从鱼礁生态效果产生原理出发，以鱼礁的自然特征、流场效应、水质与底质、饵料生物、鱼类与大型无脊椎动物 5 方面作为评价准则，建立评价体系，对人工鱼礁的生态效果进行了评价[33]；中国海洋大学通过海上逐月采样和室内实验的方法，研究了人工贝壳礁区大型底栖动物群落的变化规律，评价了贝壳礁区的底栖生态质量[34]；中国水产科学研究院黄海水产研究所采用模糊综合评价法构建人工鱼礁生态系统健康评价模型，采用层次分析法对各项生态指标的权重进行赋值，并利用综合健康指数模型对人工鱼礁区和对照海区生态系统健康状况进行了评价[35]。尽管国内外学者对人工鱼礁生态效益做了大量研究，但大多数评估成果针对的时间跨度较小，评估标准不统一，评估结果往往不具有可比性。应用先进的调查技术、完善科学的评估方法将是人工鱼礁生态评价领域重要的研究方向。

3.2 经济效益评价

对于决策部门而言，鱼礁作为一项工程建设，最终都要定量评价鱼礁发挥的功能或收益是否达到了最初建设的目标[36]。人工鱼礁的直接经济效果主要体现在海域投礁后渔获量的增加、渔获物经济价值的提高；间接经济效益主要包括减少捕捞作业费用、提高捕捞业关联产业效益等[37]。

国外学者对鱼礁经济效果评价关注较早。Rhodes[38, 39]等分别对南卡罗莱纳州大堡礁海洋公园鱼礁的经济效益进行了分析；Islam[40]等通过比较鱼礁投放前后的渔获量，测算出人工鱼礁的直接经济效益。为定量掌握人工鱼礁项目的经济效果，日本水产厅和渔业相关协会共同开展了“渔港渔场的经济效果多样性评价方法”的研究，利用条件价值评估法测算了人工鱼礁的经济效果[37]。欧美国家也有运用条件价值评估法对人工鱼礁项目经济效果评价的研

究报道[41]。目前，国内关于人工鱼礁经济效果的研究，还处于起步阶段。浙江大学根据人工鱼礁经济价值的不同类型，结合条件价值评估法的经济原理，构建了人工鱼礁经济效果评价的应用框架[37]；上海海洋大学选取动态投资回收期、内部收益率和益本比等作为评价指标，运用模糊数学法建立了相应的模糊隶属函数，并应用熵权法确定评价指标权重，计算了经济效果评价等级[36]。国内针对人工鱼礁经济效益评价的研究与国外相比还有不少差距，多数还是定性或简单的定量分析和理论研究。

4 展望

未来人工鱼礁的研究和发展需要在以下几个方面引起注意：

(1) 物理稳定性方面

在人工鱼礁的设计中应综合考虑建造材料的性价比等因素，研发可塑性强、稳定性能好、成本低廉的礁体模型；不仅对单体鱼礁和礁群进行水动力学数值模拟计算分析，还需结合鱼类行为学等因素，确定礁高水深比、礁体配置规模等参数，进一步优化礁体设计方案，确保礁体投放后形成长久稳定的聚鱼效应。

(2) 监测与管理方面

综合应用先进的鱼礁探测技术、智能传感、地理信息、大数据、人工智能等技术，建立鱼礁区环境、生态、生物、水动力等多要素实时动态监测系统及综合的科学数据库，为鱼礁建设、监测、管理及效应评估提供先进的技术平台和高质量的数据资源。加强政府引导与协调，鼓励企业积极参与，从政策法律、技术资金上给予扶持；学习借鉴国内外先进经验，加强人员、技术、资金、管理等方面的合作，全面提升人工鱼礁建设管理的能力和水平。

(3) 价值评估方面

深入研究人工鱼礁与水生生物及海洋生态环境之间的关系，为人工鱼礁的生物与生态效应评估提供数据支持；推进人工鱼礁综合效益的评估研究，重点研究其对海洋生态环境的影响以及提高海域生产力水平的效应，定量分析人工鱼礁材料、规模、布局、密度等因素对其生态效应的影响特征；开展渔业经济研究，对人工鱼礁的效益进行调查分析，并促进多学科之间的协同研究，共同对人工鱼礁的生态、经济价值进行科学评估。

5 结语

人工鱼礁是海洋牧场系统工程的重要组成部分，是恢复和养护沿海渔业资源、改善水域生态环境的重要举措。世界沿海国家都在不同程度地发展自己的人工鱼礁项目，取得了较好的生态、经济和社会效益。作者在前人研究的基础上，从物理、生态、经济、管理等多个角度对人工鱼礁的研究进展进行了详细论述，提出了人工鱼礁未来研究发展中应该注意的问题，能够为中国大规模人工鱼礁的合理化建设提供一定的理论依据。

参考文献：

[1] 陈应华. 大亚湾大辣甲南人工鱼礁区的生态效应分析[D]. 广州：暨南大学, 2009.
Chen Yinghua. Analysis of ecological effects of southern Dalajia Island artificial reef area in Daya Bay, Guangdong, China[D]. Guangzhou: Jinan University, 2009.

[2] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. 水产学报, 2016, 40(7): 1133-1140.
Yang Hongsheng. Construction of marine ranching in China: reviews and prospects[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(7): 1133-1140.

[3] 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.
Bai Yibing, Zhang Chenggang, Luo Xiaofeng. Research on flow field effect and stability of artificial reefs in Lusi fishing ground[J]. Yangtze River, 2018, 49(8): 25-30.

[4] Li D, Tang C, Xia C L, et al. Acoustic mapping and classification of benthic habitat using unsupervised learning in artificial reef water[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2017, 185: 11-21.

[5] Schygulla C, Peine F. Nienhagen reef: Abiotic boundary conditions at a large brackish water artificial reef in the Baltic Sea[J]. Journal of Coastal Research, 2013, 29(2): 478-486.

[6] 张永波, 王继业, 辛峻峰. 人工鱼礁工程技术进展研究[J]. 渔业现代化, 2016, 43(6): 70-75.
Zhang Yongbo, Wang Jiye, Xin Junfeng. A review of studies on artificial reef engineering technology[J]. Fishery Modernization, 2016, 43(6): 70-75.

[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, 4: 69-76.
Zhao Haitao, Zhang Yifei, Hao Chunling, et al. Sitting and designing of artificial reefs[J]. Journal of Marine Sciences, 2006, 4: 69-76.

[8] 唐衍力. 人工鱼礁水动力的实验研究与流场的数值模拟[D]. 青岛：中国海洋大学, 2013.

Tang Yanli. Hydrodynamics experiment of artificial reefs and numerical simulation of flow field[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.

[9] 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.
Lin Jun, Zhang Shouyu. Research advances on physical stability and ecological effects of artificial reef[J]. Marine Fisheries, 2006, 3: 257-262.

[10] 唐衍力, 龙翔宇, 王欣欣, 等. 中国常用人工鱼礁流场效应的比较分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 97-103.
Tang Yanli, Long Xiangyu, Wang Xinxin, et al. Comparative analysis on flow field effect of general artificial reefs in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(8): 97-103.

[11] 姜昭阳. 人工鱼礁水动力学与数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
Jiang Zhaoyang. Artificial reef hydrodynamics and numerical simulation study[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.

[12] 陈小艳, 谢琳, 王发云. 三亚湾海洋牧场人工鱼礁结构设计及稳定性分析[J]. 海洋科学, 2017, 41(10): 19-23.
Chen Xiaoyan, Xie Lin, Wang Fayun. Structure design and stability analysis of the artificial reef in marine ranching of Sanya Bay[J]. Marine Sciences, 2017, 41(10): 19-23.

[13] 郑延璇. 人工鱼礁流场效应与物理稳定性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Zheng Yanxuan. Flow field effect and physical stability of artificial reefs[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.

[14] Kim J Q, Mizutani N, Iwata K. Experimental study on the local scour and embedment of fish reef by wave action in shallow water depth[R]. Tokyo: Proceedings, International Conference on Ecological System Enhancement Technology for Aquatic Environments Japan International Marine Science and Technology Federation, 1995, 168-173.

[15] 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.
Liu Hongsheng, Ma Xiang, Zhang Shouyu, et al. Research on model experiments of effects of artificial reefs on flow field[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(2): 229-236.

[16] Fujihara M, Kawachi T, Oohashi G. Physical-biological coupled modelling for artificially generated upwelling[J]. Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering, 1997, 189: 399-409.

[17] Jiang Z Y, Liang Z L, Zhu L X, et al. Numerical simulation of effect of guide plate on flow field of artificial reef[J]. Ocean Engineering, 2016, 116: 236-241.

[18] 王鑫. 基于流场分析的人工鱼礁设计及其相关机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
Wang Xin. A design of the artificial reef based on flow field analysis and a study on relevant principles[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[19] 李东, 唐诚, 邹涛, 等. 基于多波束声呐的人工鱼礁区地形特征分析[J]. 海洋科学, 2017, 41(5): 127-133.
Li Dong, Tang Cheng, Zou Tao, et al. Terrain character analysis of artificial reefs area based on multibeam echo sounder[J]. Marine Sciences, 2017, 41(5): 127-133.

[20] Tian W M. Side-scan sonar techniques for the characterization of physical properties of artificial benthic habitats[J]. Brazilian Journal of Oceanography, 2011, 59(spe1): 77-90.

[21] 刘永虎, 刘敏, 田涛, 等. 侧扫声纳系统在石料人工鱼礁堆体积估算中的应用[J]. 水产学报, 2017, 41(7): 1158-1167.
Liu Yonghu, Liu Min, Tian Tao, et al. The application of side scan sonar system in volume estimation of stone artificial reef[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(7): 1158-1167.

[22] 沈蔚, 张守宇, 李勇攀, 等. C3D 测深侧扫声呐系统在人工鱼礁建设中的应用[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(3): 404-409.
Shen Wei, Zhang Shouyu, Li Yongpan, et al. The application of C3D bathymetry side scan sonar system in artificial reef construction[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(3): 404-409.

[23] Tassetti A N, Malaspina S, Fabi G. Using a multibeam echosounder to monitor an artificial reef[J]. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, XL-5/W5(5): 207-213.

[24] 郭杰, 王珂, 段辛斌, 等. 航道整治透水框架群对鱼类集群影响的水声学探测[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(5): 29-35.
Guo Jie, Wang Ke, Duan Xinbin, et al. Effect of tetrapod clusters on fish assemblage in channel improvement projects[J]. Journal of Hydroecology, 2015, 36(5): 29-35.

[25] Campanella F, Taylor J C. Investigating acoustic diversity of fish aggregations in coral reef ecosystems from multifrequency fishery sonar surveys[J]. Fisheries Research, 2016, 181: 63-76.

[26] Fabi G, Sala A. An assessment of biomass and diel activity of fish at an artificial reef (Adriatic Sea) using a stationary hydroacoustic technique[J]. ICES Journal of Marine Science, 2002, 59(59): 411-420.

[27] Ajemian M J, Wetz J J, Shipleylozano B, et al. An

analysis of artificial reef fish community structure along the northwestern Gulf of Mexico shelf: potential impacts of “Rigs-to-Reefs” programs[J]. Plos One, 2015, 10(5): e0126354.

[28] Bollinger M A, Kline R J. Validating sidescan sonar as a fish survey tool over artificial reefs[J]. Journal of Coastal Research, 2017, 33(6), 1397-1407.

[29] 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.
Li Nana, Chen Guobao, Yu Jie, et al. Assessment of biomass in artificial reef area of Yangmeikeng in Daya Bay using acoustic method[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(11): 1640-1649.

[30] 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.
Zhang Jun, Chen Pimao, Fang Lichen, et al. Background acoustic estimation of fisheries resources in marine ranching area of Zhelin Bay-Nan’ao in the south China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(8): 1187-1198.

[31] 唐衍力, 于晴. 基于熵权模糊物元法的人工鱼礁生态效果综合评价[J]. 中国海洋大学学报, 2016, 46(1): 18-26.
Tang Yanli, Yu Qing. An integrative evaluation of ecological effect of artificial reefs with entropy-weighted fuzzy matter-element method[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(1): 18-26.

[32] 吴忠鑫. 山东俚岛人工鱼礁区生态效果初步评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Wu Zhongxin. The preliminary assessment of ecological effect of Lidao artificial reef zone, Shandong Province[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.

[33] 尹增强, 章守宇. 东海区资源保护型人工鱼礁生态效果评价体系的初步研究[J]. 海洋渔业, 2012, 34(1): 23-31.
Yin Zengqiang, Zhang Shouyu. The ecological effect evaluation system of protective artificial reef in East China Sea[J]. Marine Fisheries, 2012, 34(1): 23-31.

[34] 刘国山. 威海双岛人工鱼礁区大型底栖动物与海藻群落演替特征及其生态作用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Liu Guoshan. The succession and ecological functions of macrobenthos and macroalgae in the artificial reef zone of Shuangdao Bay, Weihai[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.

[35] 李娇, 张艳, 袁伟, 等. 基于模糊综合评价法的人工鱼礁生态系统健康研究[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(5): 10-19.
Li Jiao, Zhang Yan, Yuan Wei, et al. Research on artificial reef ecosystem health assessment based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(5): 10-19.

[36] 尹增强, 章守宇. 浙江省嵊泗人工鱼礁工程游憩价值的评估[J]. 海洋科学, 2011, 35(7): 55-60.
Yin Zengqiang, Zhang Shouyu. Evaluation of the recreational value of Shengsi artificial reef project in Zhejiang Province[J]. Marine Sciences, 2011, 35(7): 55-60.

[37] 姜书, 赵鹏. 条件价值评估法在人工鱼礁经济效果评价中的应用[J]. 中国海洋大学学报, 2016, 1: 24-29.
Jiang Shu, Zhao Peng. The application of contingent valuation method on economic benefit evaluation of artificial reefs[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 1: 24-29.

[38] Rhodes R J, Bell J M, Liao D. Survey of recreational fishing use of South Carolina’s marine artificial reefs by private boat anglers[R]. Project No. F-50 Final Report, Charleston: Office of Fisheries Management, South Carolina Wildlife and Marine Resources Department, 1994.

[39] Sutton S G, Bushnell S L. Socio-economic aspects of artificial reefs: considerations for the great barrier reef marine park[J]. Ocean & Coastal Management, 2007, 50(10): 829-846.

[40] Islam G M N, Noh K M, Sidique S F, et al. Economic impact of artificial reefs: A case study of small scale fishers in Terengganu, Peninsular Malaysia[J]. Fisheries Research, 2014, 151(3): 122-129.

[41] Pickering H, Whitmarsh D, Jensen A. Artificial reefs as a tool to aid rehabilitation of coastal ecosystems: investigating the potential[J]. Marine Pollution Bulletin, 1999, 37(8-12): 505-514.

A review on the progress of artificial reef research

LI Dong[1, 2, 3], HOU Xi-yong[1, 3], TANG Cheng[1, 3], ZHANG Hua[1, 3]
(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Received: Jul., 20, 2018
Key words: artificial reef; flow field effect; monitoring and management; value assessment; sustainable development

Abstract: Artificial reef (AR) construction is an important technique for building marine pastures, which plays a pivotal role in improving the coastal fishery ecological environment and protecting fishery resources. In recent decades, with the increasing construction of ARs, experts and scholars worldwide have conducted several studies on AR. Based on such previous studies, this paper discusses the progress of AR research in detail in terms of the aspects such as reef material, structure design, flow field effect and numerical simulation, monitoring technology, management system, investigation and evaluation of ecological benefits, and economy assessment. Finally, this paper proposes the direction of future AR research from the viewpoints of physical stability, monitoring and management, and value assessment. This review could provide some theoretical basis for the sustainable development of large-scale AR construction in our country.

(本文编辑: 谭雪静)