

基于自然共建概念的人工生态鱼礁应用与性能研究

王 栋

宁波大学 土木工程与地理环境学院 浙江 宁波 315211

摘 要：全球海洋面临资源衰退与污染问题，人工生态鱼礁成为修复海洋生态的关键。本文综述了人工鱼礁从增产设施向生态工程转型的过程，重点分析材料创新与生态效应。利用工业固废制备生态混凝土，实现低碳高性能；量化实证显示，设计优良的鱼礁能提升生物承载力，增强生态连通性。

关键词：Artificial Habitat Fish Reef; Ecological Artificial Reef; 工业固废; 生态效应; 海洋牧场

引言

全球海洋正面临前所未有的双重压力：一方面，过度捕捞导致渔业资源严重衰退，例如，长江“四大家鱼”的产卵总量已锐减至20世纪60年代的15.7%；另一方面，传统水产养殖活动自身也带来了环境污染问题，如海上渔业区的塑料垃圾占比可高达20%至75%。在此背景下，如何有效修复海洋生态系统、科学增殖渔业资源，已成为全球性的紧迫议题。

1 从海洋资源修复到自然共建 人工生态鱼礁的时代使命

以关键词“Artificial Habitat Fish Reef”和“Ecological Artificial Reef”，限定时间为1995-2025年，在web of science进行检索共搜索到相关文献350篇。通过Hicite对350篇文献的时间线进行梳理，得到如下图1

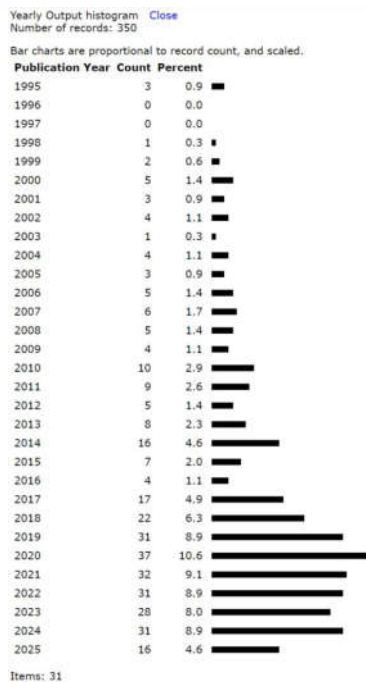


图1 Hicite对30年间涉及人工鱼礁关键词文献的时间线分析

从图1中，可以看出在该研究方向早期（1995-2005年）无人问津，中期（2005-2015年）加速突破，近年（2015-2025年）逐渐成为热点并进入深耕阶段；2020年的爆发与2020年后的稳定，暗示领域从“量的扩张”转向“质的深化”。

人工鱼礁（Artificial Reefs），作为一种通过人为构建水下结构来模拟天然礁石生态功能的技术，正从最初以“增产增收”为单一目标的渔业设施，向融合生态修复与“自然共建”（Nature-based Solutions）理念的综合性海洋工程转型。

本综述旨在系统梳理人工生态鱼礁的发展历程，聚焦于其在现代海洋牧场建设中的核心作用。本文将从材料创新和生态效应两大视角，深入剖析其在工业固废资源化利用和结构设计优化方面的关键技术与性能表现。通过整合国内外前沿研究，本文将依次剖析人工鱼礁的材料演进、生态功能量化、工程设计方法，最终展望其在构建“人海和谐”的现代化海洋牧场中的未来发展方向，为相关领域的科学研究与工程实践提供理论参考。截至2021年底，中国已批准建设153个国家级海洋牧场示范区^[1]，彰显了人工鱼礁在国家海洋战略中的重要地位。

2 材料视角：从传统混凝土到工业固废生态化与低碳化的探索

2.1 传统材料的局限性

早期人工鱼礁材料多就地取材，如木材、岩石等，虽具有天然亲和性，但耐久性差，易被海洋生物侵蚀。20世纪中期，废旧轮胎、报废汽车等废弃物被大量使用，但其潜在的生态风险逐渐暴露。其中，废轮胎的失败案例尤为深刻：20世纪70年代，美国佛罗里达州沿海投放了超过200万个废轮胎，期望构建廉价鱼礁，但这些轮胎在风暴和洋流作用下崩解，不仅未能形成稳定生境，其释放的有毒化学物质还严重破坏了珊瑚礁，导致大面积珊瑚死亡^[2]。

此后，普通硅酸盐水泥（OPC）混凝土因其稳定性、耐久性和可塑性成为主流材料。然而，传统混凝土鱼礁存在三大核心问题：

1）高碱性：新浇筑的混凝土表面pH值可高达13.0，远超海水正常的8.3左右，需要长达6个月甚至更长时间才能自然中和，严重抑制了藻类等有益生物的初期附着。

2）生物亲和性差：高碱性表面往往优先被耐碱性强

的藤壶等生物占据，阻碍了多样化生态群落的形成。

3）碳足迹高：水泥生产是主要的二氧化碳排放源之一，大规模使用混凝土鱼礁与全球“双碳”目标背道而驰。

2.2 生态混凝土的研发路径

为克服传统混凝土的缺陷，生态混凝土的研发主要循着两条技术路径展开。一是低碱度技术，通过采用硫铝酸盐水泥、复合硅酸盐水泥或大量掺加矿物掺合料（如粉煤灰、矿渣）来替代部分水泥，从而显著降低混凝土水化产物中的Ca(OH)₂含量，使初始pH值更接近海水环境，加速生物群落的定殖。二是多孔结构设计，借鉴透水混凝土和植生混凝土的理念，通过采用单一粒径的骨料或控制灰骨比，制造出具有较高孔隙率（通常为15%-25%）的结构。这种多孔介质不仅为小型海洋生物提供了丰富的栖息和庇护空间，也增大了与海水的接触面积，加速了内部碱性物质的溶出和中和过程。

3 工业固废资源化利用的关键技术与性能

将工业固废资源化利用于人工鱼礁建设，是实现生态化与低碳化目标的关键途径。我国工业固废产量巨大，如每年产生粉煤灰高达9亿吨，而综合利用率仅约75%；钢铁工业每年产生约1.1亿吨钢渣，综合利用率不足30%。这些固废的化学成分与水泥、骨料相似，为替代传统建材提供了可能。

粉煤灰基鱼礁是较早的尝试。美国和日本在20世纪80年代便已开展了吨级的投放试验。国内研究进一步证实，以75%~85%的高比例粉煤灰制备的混凝土，抗压强度可达59-67MPa，且长期海水浸泡后重金属溶出量远低于渔业水质标准，生态安全性得到保障。

钢铁渣基鱼礁是当前的研究热点。利用高炉矿渣、钢渣、脱硫石膏等固废构建的胶凝材料体系，展现出卓越性能。例如，采用“矿渣-CaO-脱硫石膏”体系，在脱硫石膏掺量为10%时，28天抗压强度可达33.43MPa，且浸泡60天后海水pH值即可恢复至8.0左右的正常水平。更有研究通过优化配比（如高炉矿渣粉、钢渣细粉、水泥熟料、脱硫石膏比例为70：10：10：10），实现了高达94.69MPa的28天抗压强度，远超普通鱼礁要求。

复合固废体系则通过多种固废的协同效应，进一步优化性能。一项研究采用“矿渣-碱渣-钢渣-粉煤灰”复合体系，并以废陶瓷为骨料制备透水混凝土，在人工海水中养护120天后，抗压强度达到39.8MPa，表现出优异的耐海水侵蚀性和后期强度增长特性。更重要的是，其生物附着效果显著优于传统水泥，120天后附着生物总量高出21.5%，且附着物以有益的孔石莼等藻类为主，而非耐碱的藤壶。此外，将牡蛎壳粉等生物废弃物作为细骨料掺入混凝土，不仅能有效缓冲pH值，还能缓慢释放硅酸盐等营养物质，促进藻类生长，实现了“以渔养渔”

4 生态效应视角：从“诱集”到“增产”生态修复功能的量化实证

4.1 生物诱集的物理与生化机理

人工鱼礁的生物诱集功能源于其对局部环境的深刻改变。首先是流场效应：礁体对水流的阻碍会在其迎流面形成局部上升流，其强度可达入流速度的120%，能将海底富含营养盐的底层水带到上层，为浮游植物的繁殖创造条件，从而提高基础生产力。在礁体后方则形成流速减缓的背涡流区，为鱼类提供了绝佳的庇护、索饵和繁殖场所。

其次是生境效应：人工鱼礁提供了天然软质海底所稀缺的硬质基底和复杂三维结构。这不仅为藻类、珊瑚、贝类等固着生物提供了附着表面，也为鱼类和无脊椎动物创造了丰富的孔隙、洞穴和阴影区，满足其在生命周期不同阶段的摄食、躲避敌害和繁殖需求^[3]。这与“Rigs-to-Reefs”（平台转鱼礁）项目中观察到的现象一致，即废弃的海上油气平台作为巨大的硬质基底，能迅速发展成为生物多样性极高的“人造绿洲”。

4.2 从“吸引”到“生产”的跨越

长期以来，“吸引vs.生产”（Attraction vs. Production）是人工鱼礁领域的核心辩题：鱼礁究竟只是将周边鱼类吸引过来，形成“虚假繁荣”，还是真正地增加了区域内的总生物量？大量现代研究通过长期、大规模的监测给出了肯定的答案：设计优良的人工鱼礁是“生产者”。

量化证据是最好的证明。在美国特拉华湾，人工鱼礁单位面积的次级生产力（以底栖大型动物计）比周围的软质海底高出两个数量级。在葡萄牙南部Algarve进行的一项历时多年的大规模鱼礁项目（投放超过21500个模块），最终使目标鱼种双带鲷（*Diplodus vulgaris*）的区域生物承载力（K值）提升了35%，相当于净增产895吨。国内的案例同样令人瞩目，如广东江门三号人工鱼礁投放后，礁区渔业资源密度从投礁前的27.8kg/km²飙升

至1420.2kg/km², 增长超过50倍。对比不同类型的鱼礁, 废弃舰船改造的鱼礁区, 其鱼类生物量可达到天然礁区的3至5倍。

更深层次的生态效应体现在生态连通性的增强。人工结构可以充当“生态踏脚石”(stepping stones), 连接原本孤立的种群。对海上油气平台的研究发现, 这些“人造岛屿”能吸引鲸鲨从340公里外的自然栖息地前来觅食, 也为极度濒危的石斑鱼幼鱼提供了关键的庇护所, 甚至帮助深海珊瑚幼虫跨越约300公里的距离进行扩散, 极大地增强了区域种群的恢复力和基因多样性。

4.3 材料与生态效应的关联

材料的选择直接影响生态效应的类型和效率。研究表明, 采用工业固废制备的生态混凝土, 因其多孔结构和更接近海水的pH值, 其表面附着生物群落以孔石莼等大型藻类为主; 而传统高碱性水泥表面则主要被耐碱性强的藤壶占据, 后者会抑制藻类的生长。这种附着生物群落的差异, 决定了食物链的基础, 进而影响到整个鱼礁生态系统的结构和功能^[4]。

宏观对比也证实了这一点。一项涵盖全球多个案例的统计分析显示, 不同材料的鱼礁诱集效果存在显著差异。以高于天然礁区的效果比率计, 舰船类鱼礁表现最佳, 达到100%, 其次是其他类(如轮胎、混合材料等)为80.00%, 水泥类为71.43%, 而油井类则为50.00%。这表明, 结构更复杂、遮蔽空间更大的材料(如舰船), 其生态诱集功能往往更强。

5 总结与展望: 迈向智能化与多功能化的未来海洋牧场

经过数十年的发展, 现代人工生态鱼礁已远非昔日简单的“沉石造礁”, 而是演变为一个基于“自然共建”理念, 深度融合了材料科学、生态学与海洋工程学

的跨学科综合体。其核心价值在于通过科学的干预, 重塑和优化海洋生态系统, 实现渔业资源的可持续利用。

结束语

展望未来, 人工生态鱼礁的发展将呈现三大趋势: 一是材料的智能化与功能化, 研发具备碳封存功能的新材料以响应“双碳”目标, 或开发集成传感器的智能材料, 实现对礁体状态和周边水环境的实时、原位监测。二是功能的多元化与融合化, 推动人工鱼礁与海上风电基础、海洋观测网络、休闲渔业和潜水旅游等产业深度融合, 构建集能源生产、生态修复、科研监测和休闲娱乐于一体的多功能复合型海洋基础设施。三是管理的全周期与智慧化, 借助BIM(建筑信息模型)、GIS(地理信息系统)、高精度声纳探测等数字化技术, 实现从选址、设计、生产、投放到后期运维的全生命周期智能化管理, 引领海洋牧场建设迈入高效、精准、可持续的3.0时代。

参考文献

- [1]喻家珣,贾天宇,王春蕊,等.基于文献计量分析的我国海洋牧场研究进展[J].海洋湖沼通报,2023,45(06):189-197.DOI:10.13984/j.cnki.cn37-1141.2023.06.023.
- [2]张年华,田涛,沈璐,等.人工鱼礁建礁材料研究应用进展[J].大连海洋大学学报,2022,37(02):352-362.DOI:10.16535/j.cnki.dlhyxb.2021-201.
- [3]苏岳威,赵景刚,张佳康,等.低碱度生态型人工鱼礁材料的实验研究[J].矿产综合利用,2023,(01):197-203.
- [4]姜传胜,梅敬松,刘志勇.生态混凝土人工鱼礁研究进展[C].中国腐蚀与防护学会.2020第七届海洋材料与腐蚀防护大会暨2020第一届钢筋混凝土耐久性与设施服役安全大会摘要集.烟台市投资工程建设服务中心;烟台大学,2020:135.DOI:10.26914/c.cnkihy.2020.028203.