

基于3D打印与生态美学融合的人工鱼礁创新设计与实践研究

韩一奇¹, 杨慧宇², 刘家杰³

¹云南大学昌新国际艺术学院, 云南 昆明

²云南大学历史与档案学院, 云南 昆明

³云南大学材料与能源学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年10月20日; 录用日期: 2025年12月1日; 发布日期: 2025年12月10日

摘要

针对传统人工鱼礁在生态兼容性、结构功能及美学价值方面的固有局限, 本研究立足于跨学科融合视角, 提出了“礁艺源生”——一个基于3D打印技术的人工鱼礁艺术化设计体系。项目以“科技重塑生态, 艺术对话海洋”为设计理念, 深度融合了参数化仿生设计、生态材料科学与海洋工程学。通过系统性研发水泥基梯度孔隙透水混凝土材料, 并优化其3D打印工艺路径, 成功实现了复杂内部腔体与外部仿生曲面的无模化精准建造。结构设计上, 创新性地提出了“嵌套式分选结构”与“流体仿形曲面”两种模型, 前者通过孔径的数学梯度变化模拟自然礁石微生境异质性, 有效规避种内捕食; 后者经计算流体动力学模拟优化, 显著降低了水流涡激振动。本研究超越了将人工鱼礁视为单纯工程设施的传统范式, 将其重新定义为“可生长的海洋生态艺术品”, 旨在通过技术革新与美学赋能为海洋牧场的低碳化、智能化及可持续发展提供兼具学术前沿性与实践可行性的创新解决方案。初步实验与模型验证表明, 该设计体系在提升生物附着效率、优化局域流场及增强视觉融合度方面展现出显著潜力。

关键词

人工鱼礁, 3D打印, 生态美学, 艺术化设计, 海洋生态修复

Innovative Design and Practical Research on Artificial Reefs Based on the Integration of 3D Printing and Ecological Aesthetics

Yiqi Han¹, Huiyu Yang², Jiajie Liu³

¹Changxin International College of Art, Yunnan University, Kunming Yunnan

²School of History and Archives, Yunnan University, Kunming Yunnan

³School of Materials and Energy, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: October 20, 2025; accepted: December 1, 2025; published: December 10, 2025

Abstract

In view of the inherent limitations of traditional artificial reefs in terms of ecological compatibility, structural function and aesthetic value, this study, from the perspective of interdisciplinary integration, proposes “Jiao Yi Yuan Sheng”—an artistic design system for artificial reefs based on 3D printing technology. The project takes “Technology Reshaping Ecology, art Engaging in Dialogue with the Ocean” as its core concept, deeply integrating parametric bionic design, ecological materials science and Marine engineering. Through systematic research and development of cement-based gradient pore permeable concrete materials and optimization of its 3D printing process path, the precise and mold-free construction of complex internal cavities and external bionic surfaces has been successfully achieved. In terms of structural design, two models, namely “nested sorting structure” and “fluid profiling surface”, were innovatively proposed. The former simulates the heterogeneity of the natural reef microhabitat through the mathematical gradient change of pore size, effectively avoiding intraspecific prefabrication. The latter, after being optimized through computational fluid dynamics simulation, significantly reduces the vortex-induced vibration of water flow. This research goes beyond the traditional paradigm of regarding artificial reefs as mere engineering facilities and redefines them as “growable Marine ecological artworks”, aiming to provide innovative solutions that are both academic at the forefront and practical feasible for the low-carbonization, intelligence and sustainable development of Marine ranches through technological innovation and aesthetic empowerment. Preliminary experiments and model verification indicate that this design system demonstrates significant potential in enhancing the efficiency of biological attachment, optimizing the local flow field, and improving visual integration.

Keywords

Artificial Fish Reef, 3D Printing, Ecological Aesthetics, Artistic Design, Marine Ecological Restoration

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海洋生态系统是地球生命支持系统的关键组成部分，它的兴衰直接影响到全世界的物种多样性、气候平衡以及人类社会的安康。遗憾的是，最近数十年间，由于过度捕鱼、沿海地带开发活动、污染问题和全球性的气温变化等因素，全球珊瑚礁区、海草群落这样的重要海域栖息地正在以史无前例的速度遭到破坏，导致渔业资源大幅度减少，生态系统所提供的服务功能也大大减弱。面对如此严酷的情势，海洋牧场的建立被看作是一种新的基于生态学原理的海洋生物资源管理模式，被认为是海洋生态环境恢复同蓝色经济共同发展的有效手段。中国政府在《关于做好2023年全面推进乡村振兴重点工作的意见》里特别指出要推进现代农业设施建设，倡导海洋牧场朝着低碳化、智能化的方向发展，给科学技术的进步指出了明确的目标。

人工鱼礁是海洋牧场的核心构筑物，本质上是人工置入水下的结构物，以此来改变局部的水流和光照条件，给海洋生物提供觅食、繁殖、成长以及避难的地方，从而实现修复生态环境、增加资源量和改善渔业结构的目的[1]。我国关于人工鱼礁的历史可以追溯到明朝时期的“投竹篱为礁”，显示了古代的

海洋智慧。虽然现代意义的人工鱼礁建设起步较早，但是长期以来受到设计理念、材料技术以及成本效益等因素的制约。目前常见的人工鱼礁多是以钢筋混凝土预制件、废旧船只、轮胎等为主，设计与制作大多拘泥于工业化标准模式，造成了一些生态及美学上的问题：其一，几何形态单一，孔隙结构均质，难以复现天然礁石复杂的微生境多样性，对特定生物群落(尤其是幼体、小型鱼类及附着生物)的吸引力与庇护能力有限；其二，粗犷的几何外观与柔美、多变的自然海底景观形成强烈视觉冲突，部分礁体甚至因形态突兀而被诟病为“海洋垃圾”，缺乏人文关怀与美学价值；其三，传统“设计模具浇筑测试”的生产模式周期长、成本高、灵活性差，且严重依赖模具，极大地限制了复杂、优化结构的实现，难以满足不同海域的定制化生态需求。

为了克服前面提到的局限性，全世界都在对人工鱼礁的新材料、新结构以及新技术进行研究。日本把“枯山水”的美学思想运用到鱼礁的设计之中，美国着重发展以沉船为主的景观礁体，而欧洲则是出现了“海洋雕塑公园”这样的艺术创作。但是这些尝试或是过分强调了视觉效果，或是仅是对已有物体的改造，尚未在生态功能、工程效能与艺术表达三者之间建立起系统性的、基于科学设计方法论的内在联系。

增材制造(即3D打印)技术的发展给此问题的解答带来了革新的手段。其“分层制造、逐层叠加”的原理，使得无需模具即可实现几乎任意复杂形状物体的自由成型，这为制造具有精细内部通道、复杂曲面和梯度孔隙结构的人工鱼礁带来了前所未有的可能。并且，艺术学、设计学同生态学、材料工程学之间的交叉融合，促成了“生态美学”这一新学科的诞生，主张在进行生态修复的时候，不仅要达到功能上的复原，还要追求人类与大自然的协调共处，在生态修复中体现美的价值。

本文的研究项目“礁艺源生”意在建立一个结合“参数化仿生设计、生态材料开发、智能化三维打印以及生态性能评价”的艺术化人造鱼礁创新系统。不但重视鱼礁对鱼类的吸引程度及生物附着的数量这些传统的生态学指标[2]，而且深入探究鱼礁的形式、材料、颜色同海洋生态系统相协调的美学原理，力求把人工鱼礁由单纯的“功能装置”提升成富有情感的、能随着生物附着而不断变化的“海洋生态活艺术品”，以此给中国的海洋牧场建设带来品质上的飞跃和新的动力。

2. 当前国内外的研究状况及理论结构

2.1. 人工鱼礁功能的发展及其美学上的缺失

人工鱼礁的生态作用主要是依靠它所引起的“流场效应”、“生物场效应”及“底质效应”。水流经过鱼礁时形成的上升流、背涡流等复杂的水流形态，能够输送营养盐，聚积浮游生物，进而招引鱼类。鱼礁表面是藻类、贝类、珊瑚虫等生物附着的基础，逐渐发展成一个复杂的生态系统[3]。但是以往的研究和应用大都集中在它的物理性能以及直接的生态效益上，比如鱼礁的稳固性、吸引鱼类的种类与数目、渔业产量的提高等方面，忽略了它作为一种人造景观的艺术价值。这种重功能轻审美的观念使得人工鱼礁在视觉效果上同海洋自然景观产生隔阂，影响了它作为公共空间一部分的文化意义和社会吸引力。

2.2. 3D打印技术于生态工程的应用前沿

三维打印技术已经在建筑、医疗等行业得到了广泛的应用，这就为它在生态工程项目中，尤其是在人工鱼礁制作上的运用奠定了基础。国际上有研究机构已经试用了沙土材料、地质聚合物来打印礁石组件。其优势显而易见：(1)无模自由成型：彻底摆脱模具限制，可实现拓扑优化结构、分形结构等传统方法难以企及的复杂构型；(2)数字化与定制化：基于特定海域的海洋学数据，通过参数化设计生成最优礁体形态，实现“一区一策”的精准生态修复；(3)材料高效利用：打印过程按需给料，减少了材料浪费，符合绿色制造理念；(4)集成化制造：可将管道、传感器预留孔等功能性结构一体化打印成型。然而，当

前的研究多集中于工艺可行性验证，对于打印材料本身的生态友好性(如 pH 值、表面理化性质)、结构与生态功能的定量关系，以及将艺术设计语言系统融入打印模型的研究尚显不足[4]。

2.3. 生态美学理论于海洋修复的指导作用

生态美学源于对环境美学与生态伦理学的交叉研究，它主张欣赏和创造符合生态规律、体现生命共生之美的人工环境。于海洋生态修复领域中，生态美学强调人工介入手段譬如人工鱼礁不仅要具备“效”(即生态效能)，而且要兼具“味”(文化的深意)以及“形”(视觉上的协调)。这意味着礁体设计需要遵循“形式追随生态”的原则，其形态应源于对自然生态系统(如珊瑚、海绵、海藻)形态与功能的深刻理解与抽象提炼，其色彩与质感应努力与周边环境融为一体，甚至能够随着时间推移，在生物附着与自然作用下呈现出动态的、生命参与创造的“第二自然”之美[5]。这一点给本课题把艺术性的构想同生态的功能性放在同等重要的位置上给予了充分的理论依据。

综上所述，突破现有人工鱼礁发展瓶颈的关键在于实现设计艺术学、材料科学与海洋生态工程学的深度交叉。本文所提项目即以此为中心，尝试构建起相关的理论与实践框架。

3. 研究内容、所采用的方法以及技术路径

3.1. 生态美学设计的参数化驱动

本文的创新点是把参数化设计平台作为沟通生态要求、工程技术限制及艺术造型之间的媒介。

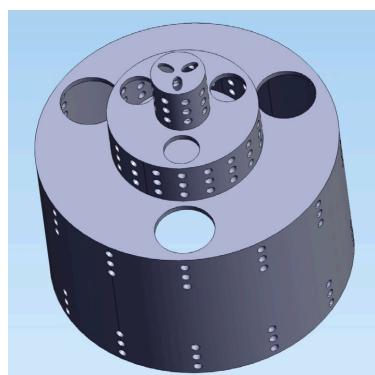


Figure 1. Nested sorting structure reef
图 1. 嵌套式分选结构鱼礁

在嵌套式分选结构设计方面，如图 1，针对水域生态中存在的种内与种间捕食压力，研究提出一种基于数学分形理论与梯度变换原理的嵌套式构造体系。该结构由尺度逐级递减、形态相互嵌套的几何单元构成，形成从厘米至分米级别的连续孔径梯度，有效模拟天然珊瑚礁系统中多尺度共存的洞穴、裂隙与微孔栖息空间。此类结构为不同体型的鱼类及无脊椎动物提供了差异化庇护场所，从而显著缓解生物间的捕食压力，有助于提升物种多样性并增强生态系统的结构稳定性。其外在形态呈现出递归有序的数学秩序，体现出如雪花结晶或蕨类叶片般的自然几何美感。

在流体仿形曲面设计方面，如图 2，本研究致力于降低人工鱼礁在水流作用下的滑移与倾覆风险，并尽可能减少对周边流场的扰动。通过集成计算流体动力学模拟技术于 Grasshopper 参数化平台，对礁体初步形态进行流场数值分析，识别高阻力区与涡旋生成区域。进而采用算法驱动的方式对曲面进行光滑处理与流线型重构，最终生成具有低阻力特性的仿生形态，其造型灵感来源于鲸鱼体态、海豚体表或经水流长期磨蚀的卵石形态。此类形态与流体功能的高度契合，不仅提升了结构的物理性能，也赋予其流动

而富有张力的雕塑质感。



Figure 2. Fluid-shaped curved surface structure reef
图 2. 流体仿形曲面结构鱼礁

在地域文化符号的抽象转化方面，本研究强调人工鱼礁作为文化载体的身份认同与地方性表达。通过提取特定海洋区域的文化元素，如南海珊瑚的天然纹样、胶东传统渔网编织图案或古代航海图记等，将其抽象为几何构型并转化为礁体表皮的纹理语言或结构单元。这一策略既强化了礁体作为水下文化表征的艺术价值，也使其成为传递地域历史与海洋记忆的视觉媒介。

3.2. 研发生态功能性的材料及其性能的调节

材料不仅是功能性的承载者，而且是美学的基础。本文项目专注于开发一种适用于三维打印技术的环保型水泥基复合材料。

选用硫铝酸盐水泥或是普通硅酸盐水泥作为基础材料，并且加入大量的工业副产品，诸如矿粉、粉煤灰来减少碳排放[6]。主要的创新点是加入了经过特殊加工的天然骨料，比如磨碎的贝壳粉、废弃的珊瑚碎片。这类物质不但充当填充物，而且凭借自身的多孔构造及化学组成对礁体表层的 pH 值进行有效的调控，有利于钙质生物，例如藤壶、珊瑚虫的初步附生。梯度孔隙结构的实现是依靠对打印浆料流变性的精确定制、颗粒的合理分级及打印路径的科学规划，从而在礁体内部形成由宏观连通孔至微观毛细孔的多层次孔隙体系。所要达到的孔隙率是在 65% 到 70% 之间，这样不但大幅度地增大了生物附着的有效面积(预估比实心混凝土增加超过 40%)，而且对水体的流通、营养物质的传输以及生物的隐蔽都创造了良好的条件。

在色彩与质地的环境协调性方面，本研究摒弃传统灰色混凝土饰面，转而采用铁氧系与钴系无机矿物色素对打印材料进行着色，调配出近似海底沉积物的灰褐色与赭石色系，以及与海水光学反射特性相协调的蓝绿色调。在质地构建层面，通过精确控制打印层厚度及实施差异化表面处理工艺，模拟天然礁石表面的粗糙肌理及贝类附着所形成的层叠纹理，从而在视觉与触觉维度增强人工构筑物与周边海底环境的一体化程度，提升其生态与景观融合度。

3.3. 智能化印刷技术及精确投放方案

采用机械臂式 3D 打印系统开展人工礁体构建，关键工艺参数设置如下：喷嘴直径为 15 mm，在保证打印效率的同时兼顾成型构件的细节精度；单层打印高度设定为 10 mm，以保障层间粘结强度与结构整体性能；打印速度经正交试验优化确定为 80 mm/s，有效平衡成型质量与施工效率；挤出压力范围控制在 0.4 MPa~0.6 MPa，可根据浆料实际流变特性进行动态调节。针对大型礁体结构，采用“分块打印、现

场拼装”的制备策略，将单块尺寸控制在 $600\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 以内，便于运输与安装。在礁体投放前，基于 GIS 与多波束声纳数据构建目标海域高精度三维底图，结合计算流体动力学(CFD)分析与水下光照模拟，对礁群空间布局进行优化，以期形成生态功能协同、视觉形态连贯的水下景观廊道。

水泥 3D 打印技术的工艺优化主要集中在运用机械臂或是龙门架式的打印系统上。着重探讨喷嘴直径、移动速率以及挤出压力这些核心参数对于成形精确度、层间结合力及构造整体性的影响力。对于大型礁体结构，则是制订出分区打印并且在现场进行装配的方法。

在实际投放之前，运用地理信息系统(GIS)、多波束声纳探测和水下摄影的数据来建立一个高精度度的目标海域三维数字地图。把设计好的人工礁体模型放置于虚拟的海洋环境里，对流场、沉积物流动以及光影效果做模拟分析，对礁群的平面布置和立体构造加以优化，力求形成功能协同、视觉连贯的“水下艺术景观廊道”。

3.4. 生态效能的监测及评价系统

构建一个包含物理稳定性能、生物影响以及美感感受的全面评价系统。除常规的水下视频观测、潜水普查以统计鱼类种类、数量、个体大小和附着生物覆盖率外，还将布设水下传感器，长期监测礁体周围的温度、盐度、溶解氧、pH 值及营养盐变化。同时，尝试通过问卷调查、公众投票等方式，评估艺术化鱼礁相较于传统鱼礁在提升公众海洋环保意识与审美体验方面的社会效益。

4. 项目的创新之处及特点

4.1. 方法论的革新：由“经验设计”转向“数据驱动及算法生成”

本项目对传统的依靠工程师经验来设计人工鱼礁图样的方式做了根本性的改变，确立了把海洋生态资料作为输入信息，运用参数化算法作为核心手段，追求生态效益与审美形式相协调的设计成果的数字化设计理念。这是一次方法论上的革新，使鱼礁的设计流程更为科学化、精确化并且具有优化的可能性。

4.2. 技术集成创新：材料、结构、工艺的一体化协同工作

本项目并非简单地将 3D 打印技术应用于既有鱼礁模型的制造，而是从材料配方设计之初，就充分考虑其打印适性、生态活性与美学表现力；复杂的构造设计既是为了满足生态功能的要求，也只有借助 3D 打印技术才能够以经济有效的方式完成。材料、结构、工艺这三者的高度结合并且互相促进，是此项目的技术核心所在。

4.3. 创新之价值层面：由“生态修复工具”转型为“生态文化产品”

项目的终极目标并非仅仅产出一种性能更优的鱼礁，而是旨在创造一种新型的“生态文化产品”。此产品既是海洋生物的理想栖息之所，又是融科学理性与美学于一体的艺术作品，同时也是触动大众心灵、传达生态保护思想的文化标志。对于人工鱼礁功能上的扩展，是对海洋生态恢复意义的一种深化，适应了当今社会对生态环境建设提出的高标准要求。

5. 初步成果

截至目前，项目已完成首批礁体的参数化模型设计，并联合合作企业制备了两组水泥基 3D 打印样品。初步测试结果表明，样品在结构稳定性方面表现良好，水槽试验中在 1.2 m/s 流速条件下未发生滑移或倾覆现象；在生物附着性能方面，浸泡 60 天后样品表面生物覆盖率达到 35%，高于传统混凝土对照样品的 22%，附着生物以藤壶、藻类及小型贝类为主；在材料生态相容性方面，礁体表面 pH 值长期稳定在 $8.2\sim8.5$ 范围内，为钙质生物附着提供了适宜的生长环境。综合以上结果，本研究提出的设计体系在结构

稳定性与生物亲和性方面均优于传统人工鱼礁，具备良好的工程适用性与生态推广潜力。

6. 前景展望

本研究构建了一种融合 3D 打印技术与生态美学理念的人工鱼礁设计体系，通过整合参数化设计方法、生态友好材料与智能化制造工艺，实现了复杂结构的高精度成型，并在生态功能与美学表现上取得协同提升。初步实验结果表明，该体系在结构稳定性、生物附着能力及环境融合度等方面均表现出良好性能。

在后续研究中，将重点结合 GIS 分析与长期水下监测数据，量化评估礁体对局部海洋生态的实际影响；同步开展公众问卷调查，探讨艺术化鱼礁的社会接受度及其潜在教育价值；并进一步拓展该技术体系的应用范围，探索其在珊瑚移植基座、海岸防护结构等多元场景中的适用性。

展望未来，随着 3D 打印成本的持续下降、智能材料的不断发展以及海洋监测技术的日益成熟，艺术化、智能化、定制化的生态修复构件将迎来广阔的应用前景。此项目的研究方向不但对人造鱼礁有效，而且可以推广到珊瑚移植平台、海岸线生态保护屏障、水下历史遗迹保存等众多方面，为创建“水清、岸绿、滩净、湾美、物丰”的美好海域提供多学科交叉创新的青年才智。

基金项目

云南大学大学生创新训练计划与项目 20251014 礁艺源生——基于 3D 打印的人工鱼礁艺术化设计。

参考文献

- [1] 杨红生, 章守宇, 张秀梅, 等. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考[J]. 水产学报, 2019, 43(4): 1255-1262.
- [2] 沈璐, 张年华, 田涛, 洪鹤轩. 3D 打印混凝土人工鱼礁的生物附着效果[J]. 大连海洋大学学报, 2022(4): 584-591.
- [3] 刘鸿雁, 杨超杰, 张沛东, 等. 基于 Ecopath 模型的崂山湾人工鱼礁区生态系统结构和功能研究[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 3926-3936.
- [4] 张清芳, 沈璐, 田涛, 张年华. 水泥基材料 3D 打印人工鱼礁建造技术研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(8): 1-5.
- [5] 姜传胜, 梅敬松, 刘志勇. 生态型混凝土人工鱼礁研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(7): 43-46.
- [6] 聂光临, 孙诗兵, 姚晓丹, 等. 普通硅酸盐水泥与快硬硫铝酸盐水泥复配砂浆性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(3): 10-13.