沉式人工鱼礁研究综述

朱毅[1]，冯嘉成[2,3,4]，李晓宇[5]，宋悦[5*]
（1. 中交四航局第五工程有限公司，福建 福州 350008；2. 中交天津港湾工程研究院有限公司，天津 300222；
3. 中交集团海岸工程水动力重点实验室，天津 300222；4. 中交第一航务工程局有限公司，
天津 300461；5. 天津大学建筑工程学院，天津 300350）

摘 要：为厘清沉式人工鱼礁水动力与生态效果的影响机制，全面回顾了沉式人工鱼礁的水动力特征研究及发展历程。基于国内外相关研究成果，系统地梳理了沉式人工鱼礁单体的流场效应和礁体的稳定性，重点关注了水动力条件、海洋环境以及鱼礁外形、开孔率等相关因素对其上升流效应、涡流结构、基础冲刷的影响研究。同时，梳理了人工鱼礁礁群的排列方式、规模和间距对其水动力特性和生态效应的显著影响，明确了礁群布局的优化方向。总结了人工鱼礁在融合应用方面的研究进展，提出了已有研究的不足及展望，旨在为后续的理论研究和工程实践提供参考。

关键词：沉式人工鱼礁；流场效应；礁体稳定；布局优化；渔业资源养护
中图分类号：U6；U655.54；S953.1 **文献标志码：**A **文章编号：**2095-7874(2026)11-0024-07
doi:10.7640/zggwjs202611004

Research review on submerged artificial reefs

Zhu Yi[1], Feng Jiacheng[2,3,4], Li Xiaoyu[5], Song Yue[5*]
(1. The Fifth Engineering Co., Ltd. of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350008, China; 2. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 3. Key Laboratory of Coastal Engineering Hydrodynamics, CCCC, Tianjin 300222, China; 4. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 5. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: To clarify the influencing mechanisms underlying the hydrodynamic performances and ecological effects of submerged artificial reefs, this paper comprehensively reviews the research on hydrodynamic characteristics and development history of submerged artificial reefs. Based on relevant domestic and international research achievements, this paper systematically reviews the flow field effects and stability of single submerged artificial reef units, with a focus on the influences of hydrodynamic conditions, marine environment, as well as the reef's shape and opening ratio on the upwelling effect, vortex structure, and the scouring of the reef foundation. Furthermore, the study summarizes the significant impacts of the arrangement pattern, scale, and spacing of artificial reefs on their hydrodynamic characteristics and ecological effects, clarifying directions for the optimization of reef cluster layouts. Finally, the research advances in the integrated application of artificial reefs are summarized, the limitations of existing studies are identified, and future prospects are discussed. This study aims to provide references for further theoretical investigation and engineering practice.

Key words: submerged artificial reefs; flow field effect; reef stability; layout optimization; fishery resource conservation

0 引言

如何有效保护和恢复渔业资源，解决海洋渔业资源严重衰退和生态环境恶化，一直受到我国乃至世界学者的重视。2021 年 11 月，我国首个海洋牧场建设的国家标准 GB/T 40946—2021《海洋牧场建设技术指南》正式发布。作为海洋牧场的重

收稿日期：2025-08-15 修回日期：2025-10-17
基金项目：中交第一航务工程局有限公司科技研发项目（2024-8-13）；国家自然科学基金（52471296）
作者简介：朱毅（1992— ），男，福建漳州人，工程师，主要从事港口航道工程建设及研究。
*通讯作者：宋悦，E-mail：yuesong@tju.edu.cn

要载体和海洋生态修复的有效工具，人工鱼礁成为海洋经济发展的热点。人工鱼礁不仅可为海洋生物提供新的栖息地和繁殖场所，有助于增加物种丰富度和种群数量；同时为鱼类等经济生物提供了良好的生长环境，促进渔业资源的恢复和增殖；还能改善海底地形，增加水体交换，促进污染物的扩散和降解[1-2]。

本文通过介绍当前国内外研究在流场效应、礁群布局与性能优化方面的进展，总结了沉式人工鱼礁水动力特性的研究现状，分析了人工鱼礁与其它海上构筑物融合的可行性及前景。

1　沉式人工鱼礁单体的水动力特性

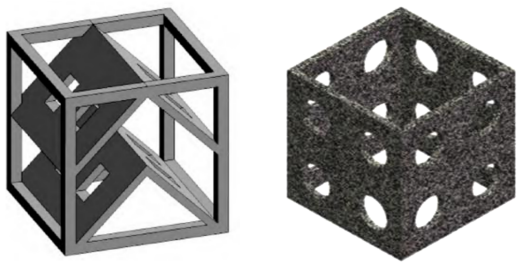
目前，沉式人工鱼礁单体的水动力特性研究主要包括人工鱼礁投放后产生的流场效应和礁体的稳定性，前者很大程度上决定了鱼礁的诱鱼作用，后者决定了礁体投放的方式[3]。

1.1　流场效应

人工礁体投放后，将改变原有的海洋地形和流场，礁体前方会形成局部上升流区域，在礁体内部形成湍流脉动，而下游形成带有涡旋的尾流区，这被称为人工礁体的流场效应。其中，上升流效应是人工鱼礁的重要功能之一，能够将底层营养盐输送到表层，吸引成鱼前来捕食浮游生物，同时适合附着生物的附着和繁殖。上升流的流速越大，意味着单位时间内从深层向表层输送的水量和营养物质越多；上升流高度越大，代表着深层水体向上涌升到表层的垂直距离越大，会带来更多的营养物质。在一定范围内，上升流流速和高度的增加可以提升营养物质的输送效率，增强流场对生态系统的正面效应。鱼礁后方形成的涡旋区或缓流区，适度的湍流可以增加营养盐的混合，促进浮游生物、甲壳类的聚集和繁殖；而弱湍流可以减少能量消耗，为幼鱼提供“庇护区”或“滞留区”。因此，上升流和背涡流的规模可作为鱼礁流场效应的评价标准[4-5]。

已有研究表明，流场效应除了受到鱼礁所处的水动力条件的影响，还与鱼礁自身的结构密切相关。水动力条件主要关注来流速度和来流方向的重要影响，根据上升流最大高度、最大速度以及背涡区尺度等流场效应参数判定适宜的来流速度和迎流方向。何文荣等[6]研究了不同来流速度下金字塔形人工鱼礁的三维绕流场，通过分析上升流最大高度、最大速度以及背涡区尺度等流场效应参数，揭示了礁体周围涡量和压力的分布特征。Guo 等[7]基于数值水槽模拟，对比了不同海域流速下迎流角度的影响，方形礁体立面与水流方向呈 45°迎流角时，上升流体积和背涡流体积都达到最大值，人工鱼礁的流场效应最佳。

除此之外，在充分考虑承载生物对象的种类、大小和生活习性的前提下，合理的鱼礁单体结构设计也可以有效地提升鱼礁上升流效应，拓宽尾流区域的宽度，改善局部海域的生态环境，因而得到了学者们的广泛关注。目前，已有研究主要聚焦在单体结构的外形、透空率(开孔比、开孔数量等)的优化以及附加导流结构的设计 3 个方面。在单体结构外形方面，郭禹等[8]选择大字形、米字形、回字形、交叉型、框架型和实体型 6 种鱼礁单体，分析礁体自身结构特征对流场效应的影响规律，并基于流场效应提出礁体结构特征指标分别为鱼礁空方体积比、透空率和迎流面相对截面积。毛海英等[9]采用 CFD 方法对方形、梯形和导流方形鱼礁体(见图 1(a))进行优化选型，经过不同形式礁体体积 V、礁体表面积与礁体体积之比 η、礁体空方体积与礁体体积之比 ε 和礁体覆盖区面积 A 的对比，发现导流型鱼礁体优于方形和梯形，方形开口礁体的内部及背部会有大范围的流速衰减区域，而圆形开口礁体的内部及背部水流交换较为顺畅。针对锥形礁，Xue 等[10]、薛大文等[11]比较了 5 种不同坡面倾角下的水动力特性，坡面倾角增大可增强人工鱼礁流场效应，但其物理稳定性下降，最后确定迎流角度 45°时，坡面倾角接近 85.2°的人工鱼礁性能最优。



(a) 导流型鱼礁体　　(b) 圆孔的立方体人工鱼礁模型

图 1　沉式人工鱼礁的单体结构形式

Fig. 1　Structural pattern of a single submerged artificial reef unit

对于结构透空率而言，开孔率较低时，水流难以绕过鱼礁，在鱼礁前方堆积，同时由于水流分离作用较强，容易形成明显的背涡流。此时增大开孔率有助于水流的扰动，形成上升流和周期

性的涡旋结构，Zhao 等[12]考察了标准立方体和 4 种门格尔型人工鱼礁周围的湍流结构，高透空率（透空体积与总体积比 P=0.61）和中等表面积比（内外表面积与外表面积之比 S=1.90）的透空结构更有利于提高人工鱼礁的流场效应。然而，开孔率过高，水流容易通过，阻力过小，难以形成上升流，水流分离作用和涡旋结构也变弱。于定勇等[13]基于数值模拟研究梯形台人工鱼礁体开口比对其流场效应的影响，发现随着开口比增大，鱼礁产生的上升流最大高度、竖向最大速度和背涡流水平长度、水平宽度和最大高度均逐渐减小。Wang 等[14]针对大窗箱型鱼礁、大小窗箱型鱼礁、“𠂤（万）”字形鱼礁、双层贝类增殖礁 4 种鱼礁模型开展水动力学试验，分析单体结构对流场效应影响规律，在相同条件下，开口越小，体积越大，上升流越强，背涡区面积越大；双层贝类增殖礁和“𠂤（万）”字形鱼礁的上升流和背涡区域大于其他 3 种礁型。Wang 等[15]探究了开孔率、开孔形状和开孔数量对立方体人工礁石流场的影响（见图 1（b）），上升流速度随开孔率、开孔形状和开孔数量的变化幅度较小，而过高的开孔率或开孔数量会减小上升流体积和背涡流体积，进而削弱流场效应，影响集鱼效果。除此之外，结构表面粗糙度的变化也会改变鱼礁的水流阻力，影响其流场效应。Jung 等[16]对比分析了 6 种人工鱼礁的结构复杂性与尾流区特性之间的关联，特定粗糙度的上表面积以及充分阻水效应的迎流面面积有利于尾流区体积的增长。

为进一步促进上升流和背涡流的形成，已有研究还提出了附加导流结构以优化鱼礁周围的流场结构。Jiang 等[17]提出了一种附有导流板的立方框架鱼礁结构，促进上升流的形成并拓宽尾流区域的宽度。研究认为与均匀孔径相比，交错孔径的设计可以显著促进流场范围，特别是上升流的高度。Maslov 等[18]发现与圆形横截面相比，水滴形横截面的多功能人工鱼礁组合体展现出更优的功能性，其上升流速度、尾流区范围及相关效率指数均显著更高。王旭等[19]提出了一种遮板型开孔式正方体人工鱼礁，通过数值模拟验证了遮板能为底栖生物创造更好的增殖效果，开口比为 0.11 时鱼礁的效果最为显著。戚福清等[20]基于 CFD 方法结合水槽试验，研究了侧板结构对八棱柱形人工鱼礁流场效应的影响，结果显示上层为倾斜侧板有利于提升礁体的上升流效应，上层为垂直侧板时有利于提升礁体的背涡流效应。

1.2 礁体的稳定性

人工鱼礁的稳定性是指人工鱼礁在海洋环境中抵抗外部环境力作用而不发生位移、倾覆或破坏的能力，是人工鱼礁设计和建设中一个非常重要的工程指标，直接影响其生态功能的发挥、使用寿命以及对海洋环境的安全性。目前研究主要关注鱼礁在抗冲刷性能及浪流作用下的稳定性。

沉式人工鱼礁前方水流下降，致使底部产生漩涡，掀起泥沙，导致局部冲刷，进而严重威胁到结构本身的稳定性，极易造成人工鱼礁的掩埋、倾覆甚至破坏。鱼礁体局部冲刷的研究较少，已有研究主要集中在通过现场观测、物理模型试验等方法对不同礁型和礁体布设方式的人工鱼礁局部冲刷特征进行描述，阐明流速、水深、底质等关键因素对其局部冲刷的重要影响。Zheng 等[21]结合水槽试验（见图 2）及 CFD 模拟研究发现，立方体人工鱼礁的最大冲刷深度出现在人工礁石的前角位置，流速、泥沙粒径和开孔率对局部冲刷的深度和体积影响依次减弱，人工鱼礁周围的冲刷程度随着流速增大、泥沙粒径减小以及开孔率降低而加剧。Yang 等[22]基于不同开孔率的梯形人工鱼礁周围局部冲刷的研究，发现其周围沉积物冲刷是源于锐角上游前缘处的流速放大效应；相比方形鱼礁，梯形鱼礁有更好的生态流动特性和稳定性，更适用于底质松软易侵蚀的海床环境。Yun 等[23]在单向流水槽中研究了人工礁组合在不同含沙量和水深条件下的局部冲刷特征。刘针等[24]基于南黄海海洋牧场人工鱼礁群投放后的实测地形和数值模拟，分析了人工鱼礁群投放后对海域水动力的影响以及冲刷稳定后对局部海域水动力的响应，形成局部冲刷坑后，鱼礁群上下游水域流速增大，鱼礁群内部流速减弱。

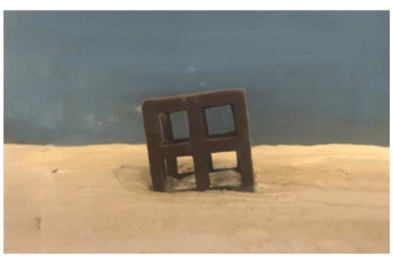


图 2 沉式人工鱼礁单体稳定性的水槽试验

Fig. 2 Flume experiment on the stability of a single submerged artificial reef unit

与此同时，波浪作用还会诱发人工鱼礁的漂移、倾覆、碰撞等失稳现象。因此，人工鱼礁在波流联合作用下稳定性的研究也是人工鱼礁设计的重要依据，但已有研究较少。

唐振朝等[25]以大亚湾海域车叶形鱼礁为研究对象，针对不同波浪、不同水深、不同海床坡度及附着生物等多种条件下的稳定性进行了对比分析，从而确定了车叶形鱼礁的安全重量和适于其投放的水深范围。此外，波浪作用还会改变鱼礁的冲刷特征，龚政等[26]在波流水槽中开展局部冲刷物理模型试验，分析不同波流条件、鱼礁类型以及布置方式下鱼礁群自身稳定性及其对桩基的防护效果，相比于空心礁，在较大流速及波流作用下，实心礁的失稳率更高，对桩基础冲刷深度的削弱效果更优；而波流作用下空心礁群的防护效果更优。

此外，通过结构的优化设计，也可以有效提高鱼礁的结构稳定性，改善其冲刷性能。Giraldes 等[27]对蘑菇林人工鱼礁进行了稳定性及其避免淤积的功能性分析，该鱼礁可在水动力荷载下保持稳定且顶部淤积显著减少。Liu 等[28]同样考虑到附加结构对人工鱼礁周围流态和冲刷深度的影响，提出一种带有导流板的立方人工鱼礁，能够有效减弱侧面形成的逆时针涡旋以及冲刷坑内涡旋的不利影响。

2　礁群的布局优化

人工鱼礁礁群的布局设计是影响其性能和生态效应的关键因素。合理的礁群构型能够显著增加局部海域的物种丰富度和生物量，扩大生物群落的诱集范围，提高渔业资源量，最大程度地提高经济效益。近年来，研究者们采用数值模拟、物理模型试验和现场观测等方法对人工鱼礁礁群的布局优化进行了深入研究。与来流速度相比，礁体的排列方式、规模和间距对其水动力特性和生态效应有更为显著的影响。

1）排列方式不同，礁群周围的流场结构不同，其生态效应也会发生变化。如线性排列有利于形成连续的上升流区，而矩阵排列则可以产生更复杂的涡流结构，为海洋生物提供多样化的栖息环境。谭赛飞等[29]基于数值模拟与试验验证，计算了多礁体在不同布设方式下的流场效应。直线排列较圆弧排列拥有更大的上升流与背涡流体积，交错排列较对齐排列流场效应更佳。

2）随着人工鱼礁组合数量的增加，上升流、背涡流最大高度和体积逐渐增加，呈现出更好的流场效应。Li 等[30]针对管状人工鱼礁在不同流速和礁群组合的流场进行了模拟（见图 3），上升流和背涡区的尺度和强度均随礁体数量的增加而增强，当应用 15 个鱼礁进行组合时流场效应最佳，此时礁体单体高度与水深之比为 0.224。



（a）管状人工鱼礁单体　　（b）管状人工鱼礁双层排布　　（c）管状人工鱼礁 3 层排布

图 3　人工鱼礁礁群的不同布置形式（mm）

Fig. 3　Different configuration of artificial reef groups（mm）

3）合理的礁群间距可以避免流场干扰，提高整体生态效应。Zhou 等[31]对比了单体和双体的梯形人工鱼礁周围的水动力行为，与单体人工鱼礁相比，双体人工鱼礁的上涌区和尾流区指标均有所提升，当梯形礁体立面与水流方向间的迎流角 $\theta \geqslant 45°$ 时，流体效应指标随着两礁体中心间距的增加而减小，确定了双梯形礁水动力特性的优选配置为迎流角 $\theta=75°$ 且两礁体中心间距为 1.5 倍礁长。胡聪等[32]探究了圆筒形人工鱼礁体在不同纵向和横向布设间距下的水动力特性，纵横布设间距对礁群的水动力特性影响较大；上升流最大高度、上升流水平跨度和阻力系数随横向间距增大而减小；上升流最大高度随纵向布设间距增大而减小。针对三棱柱式人工鱼礁，王兴超等[33]基于计算流体力学方法，对比分析了不同来流速度与布设间距下人工鱼礁的流场特性，上升流和背涡

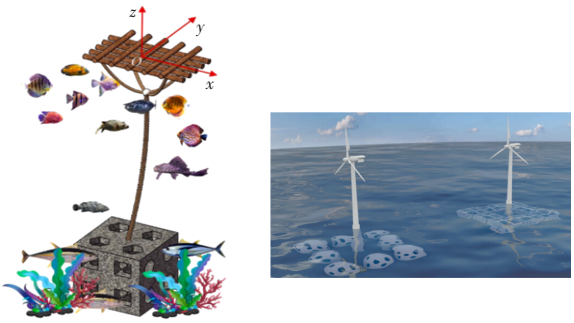
流体积均与人工鱼礁布置的横向间距(垂直水流方向)成反比，随纵向间距(平行水流方向)增大呈先增大后减小的变化。邵鹏飞等[34]、于定勇等[35]通过物模试验数值模拟相结合，确定了人工鱼礁的最佳布设方式为横向间距 0.5 倍礁长，纵向间距 4.0 倍礁长。成泽毅等[36]针对方形人工鱼礁，基于大涡模拟及被动示踪物模块研究不同布设间距和来流速度对上升流体积、营养盐的抬升和垂向涡黏系数的影响，在横向布置条件下，布设间距为 1 倍礁长时，上升流体积参数最佳。单排布置下 3 块人工鱼礁形成的上升流体积大小与来流速度呈正相关，体积随来流流速增加而增大 6.4%~80.5%。

3 人工鱼礁的融合应用与展望

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，基于防灾减灾、生态环保及资源应用，依托离岸海域，发展在同一片海域的海工建筑物之间的综合联动开发技术，对于减缓渔业资源枯竭，改善海域生态环境具有重要的工程意义。

最为常见的融合模式是将沉式人工鱼礁与浮式集鱼装置结合，利用海洋的纵向空间提高海域单位面积的集鱼效率。沉式人工鱼礁要求投放区域水深为 100 m 以浅(10~60 m 为优)，而浮式鱼礁可以突破海域水深的限制，在深海大洋性海洋牧场构建中发挥重要作用，继而扩大人工渔场、海洋牧场等的应用区域。因此，将浮式鱼礁与沉式人工鱼礁结合，有利于解决近海用海空间紧张、用海矛盾日益突出的严峻现状，已经成为离岸岛礁未来重要的发展方向[37]。张丽珍等[38]针对我国东海近海海域的海况和生物特性，研发了能与底层人工鱼礁协同工作的中上层浮鱼礁，经 60 d 持续观测数据显示所研发的鱼礁能够与底层鱼礁协同工作。Zhang 等[37]提出了一种浮筏集鱼装置和沉式人工鱼礁的鱼类聚集系统(见图 4(a))，讨论了其在波浪和水流中的水动力性能，波浪参数对其水动力性能有显著影响，确定了结构的优化尺寸。目前关于沉式人工鱼礁和浮式鱼礁的结合研究相对偏少，考虑多浮体耦合效应的构型及布局优化方法还尚未完全解明，特别是针对不同海域和生物对象采用何种配置达到最佳的集鱼效果还亟需进一步研究。

海洋牧场及海上风电的融合，可在修复海洋生态的同时防治基础冲刷，近年来已成为集约化利用海域空间、提高海洋资源利用效率的重要发展方向。Liu 等[39]研究证实了通过在固定式风机周围投放人工鱼礁(见图 4(b))，可有效提高海上风电场以鱼类为主的底层渔业资源量，同时对风电桩基及冲刷防护层等硬质结构具有一定的保护作用。高源等[40]通过水槽试验与数值模拟，探究了三角形鱼礁群绕桩排布下的流场特点，证实了其对减少桩基础冲刷深度有一定效果。赵继升等[41]对沉式人工鱼礁群与风机基础联合结构的水动力特征进行分析，验证了两者的联合结构能够显著促进水体的垂向混合。目前，人工鱼礁与海上风电的融合应用尚处于探索和试验阶段，在选址布局、融合装备及生态影响等方面还存在许多尚未解决的关键技术问题，还需要进一步在相关方向开展系统的研究。1) 与浮–沉式鱼礁组合不同，风渔融合是结合 2 种不同功能的复杂海工结构，其选址不仅要考虑风电场的海域环境要求，还需满足人工鱼礁的生态要求，包括适宜的水质条件、生物资源、海流流速等。然而，目前对于风渔融合的选址布局尚未形成设计规范；2) 目前风渔融合装备的目标海域大多位于深远海海域，巨浪、台风以及强流的恶劣海况频发，亟需融合空气动力学、水动力学、结构力学、弹性力学等多学科基础，解决风渔融合装备的载荷精确模拟、多体耦合机制、结构安全分析、系泊优化等关键技术，填补设计规范的空白；3) 在生态环境学方面，海上风电施工期及运行期会产生噪声及电磁辐射，对增殖鱼类是否存在显著的负面影响仍存疑，亟待解决。



(a) 集鱼装置与人工鱼礁的结合　　(b) 浮式风电桩基与人工鱼礁的结合

图 4 人工鱼礁的融合应用示例

Fig. 4 Integrated application examples of artificial reefs

4 结语

本文从水动力学角度，对国内外沉式人工鱼

礁的相关研究进行了较为全面的回顾。人工鱼礁的流场效应不仅受水动力条件和海洋环境影响，还与其自身结构的形状、透空率密切相关。在充分考虑承载生物对象的种类、大小和生活习性的前提下，通过对人工鱼礁的单体结构进行优化选型，对其开孔率和开孔形状进行合理设计，可以有效提升人工鱼礁的生态功能。礁体的稳定性是人工鱼礁设计和建设中一个非常重要的工程指标，已有研究重点关注了流速、水深、底质等关键因素对其局部冲刷以及稳定性的重要影响。此外，人工鱼礁礁群的布局设计是影响其性能和生态效应的关键因素，合理的鱼礁排布能增强局部的生态聚集效果。

需要注意的是，目前人工鱼礁单体及礁群的水动力研究大多集中在水流作用下，对于浪流联合作用下的流场效应、稳定性以及布局优化研究相对偏少，且研究大多没有体现目标海域及生物对象的综合考虑，不同鱼礁结构形式下各影响因素的规律也不尽一致。未来建议针对真实的海洋环境，对沉式人工鱼礁在不同波流作用以及底质条件下的流场效应以及稳定性开展研究，进一步完善各类鱼礁结构的生物适应性分析及礁群的布局优化方法，使人工鱼礁的设计和建造方案更适宜深远海的发展需求。

将沉式人工鱼礁与浮式集鱼装置相结合，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，可以有效提高生物多样性和渔业资源量。而将沉式人工鱼礁布局在固定式风电桩基周围，可以实现风电能源与渔业养殖的功能融合。但目前沉式人工鱼礁的融合尚处于尝试阶段，还需要在选址布局、融合装备及生态影响等方面解决一系列关键技术，填补其在设计规范、标准体系的空白。此外，未来也可以通过沉式人工鱼礁与其他海洋工程结构的集成设计，进一步加强沉式人工鱼礁的功能扩展，促进海洋能源开发与利用的有机融合。

参考文献：

[1] 李忠义，林群，李娇，等. 中国海洋牧场研究现状与发展[J]. 水产学报，2019，43(9)：1870–1880.
Li Z Y, Lin Q, Li J, et al. Present situation and future development of marine ranching construction in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 1870–1880.

[2] Yu J K, Zhang L L. Evolution of marine ranching policies in China: Review, performance and prospects[J]. Science of the Total Environment, 2020, 737: 139782.

[3] Pan Y, Tong H H, Wei D Z, et al. Review of structure types and new development prospects of artificial reefs in China[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 853452.

[4] Zheng Y H, Kuang C P, Zhang J B, et al. Current and turbulence characteristics of perforated box–type artificial reefs in a constant water depth[J]. Ocean Engineering, 2022, 244: 110359.

[5] 杨伟，林军，唐建江，等. 规模化透水性人工鱼礁阻流效应的数值模拟[J]. 水产学报，2022，46(12)：2366–2382.
Yang W, Lin J, Tang J J, et al. Numerical simulation of the flow retarding effect of large–scale permeable artificial reefs[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(12): 2366–2382.

[6] 何文荣，黄远东，黄黎明，等. 金字塔型人工鱼礁绕流的三维CFD模拟研究[J]. 水资源与水工程学报，2013，24(5)：71–76.
He W R, Huang Y D, Huang L M, et al. Simulation of three–dimensional CFD of water flow at pyramid artificial reef[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(5): 71–76.

[7] Guo C L, Zhu L X, Liang Z L, et al. Study on the effect of internal reefs deflection on the flow field effect of unit reef[J]. Ocean Engineering, 2023, 286: 115653.

[8] 郭禹，秦传新，章守宇. 基于结构差异性正方体鱼礁的流场效应研究[J]. 渔业科学进展，2022，43(2)：1–10.
Guo Y, Qin C X, Zhang S Y. Flow field effect of the cube reef monocase of different structure[J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(2): 1–10.

[9] 毛海英，胡聪，王逢雨，等. 不同开口形式方型人工鱼礁的水动力特性数值模拟研究[J]. 海洋湖沼通报，2023，45(4)：40–47.
Mao H Y, Hu C, Wang F Y, et al. Numerical simulation of hydrodynamic characteristics of square artificial reefs with different opening forms[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2023, 45(4): 40–47.

[10] Xue D W, Wang C Y, Huang T, et al. Flow field effects and physical stability of pyramidal artificial reef with different slope angles [J]. Ocean Engineering, 2023, 283: 115059.

[11] 薛大文，庞聪利，潘昀. 立方对角面开孔人工鱼礁流场效应的数值模拟[J]. 水产学报，2024，48(3)：182–193.
Xue D W, Pang C L, Pan Y. Numerical simulation of flow field effect of cube–diagonal hole–opening artificial reefs[J]. Journal of Fisheries of China, 2024, 48(3): 182–193.

[12] Zhao J L, Whittaker C, Melville B. The effects of structural complexity on the turbulent structure around cubic artificial reefs with multiscale cavities[J]. Ocean Engineering, 2025, 334: 121594.

[13] 于定勇，王逢雨，张彩霞，等. 梯型台人工鱼礁体流场效应数值研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版)，2020，50(12)：135–143.
Yu D Y, Wang F Y, Zhang C X, et al. Research of flow field around trapezoidal artificial reefs[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(12): 135–143.

[14] Wang H, Zhang X, Zhang J W, et al. Optimization method of reef structure design based on hydrodynamic model[J]. Marine Science Bulletin, 2024, 26(1): 67–80.

[15] Wang G, Wan R, Wang X, et al. Study on the influence of cut-opening ratio, cut-opening shape, and cut-opening number on the flow field of a cubic artificial reef[J]. Ocean Engineering, 2018, 162: 341-352.

[16] Jung S, Na W B, Kim D. Rugosity and blocking indices of artificial reefs and their correlations with wake volume[J]. Ocean Engineering, 2022, 261: 112204.

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

[18] Maslov D, Pereira E, Duarte D, et al. Numerical analysis of the flow field and cross section design implications in a multifunctional artificial reef[J]. Ocean Engineering, 2023, 272: 113817.

[19] 王旭，李雪艳，岳峻，等. 遮板型开孔式正方体人工鱼礁流场特性数值研究[J]. 水资源与水工程学报，2021，32(5)：158-165.
Wang X, Li X Y, Yue J, et al. Numerical study on flow field characteristics of a novice open-aperture square artificial reef with shutter[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(5): 158-165.

[20] 戚福清，林军，张清雨. 不同侧板结构对八棱柱型人工鱼礁流场效应的影响[J]. 水产学报，2023，47(12)：176-191.
Qi F Q, Lin J, Zhang Q Y. Influence of different side plate structures on effects of flow field of octagonal prism artificial reef[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(12): 176-191.

[21] Zheng Y, Zhang J, Xie W, et al. Numerical study of local scour around a cubic artificial reef in steady current[J]. Ocean Engineering, 2024, 311: 118851.

[22] Yang M, Tang Y, Wang L, et al. Experimental and numerical investigation of flow field characteristics and local scour around trapezoidal artificial reefs[J]. Ocean Engineering, 2025, 317: 120038.

[23] Yun D H, , Kim Y T. Experimental study on settlement and scour characteristics of artificial reef with different reinforcement type and soil type[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(4): 448-454.

[24] 刘针，程永舟，路川藤，等. 南黄海人工鱼礁群局部冲刷对海域水动力的响应研究[J]. 水道港口，2021，42(5)：588-595.
Liu Z, Cheng Y Z, Lu C T, et al. Response of local scour of artificial reefs to hydrodynamic forces in the southern Huanghai Sea[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2021, 42(5): 588-595.

[25] 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)：1742-1749.
Tang Z Z, Chen P M, Jia X P. Study on safe weight of artificial reef in different water depths and bottom slopes under Daya Bay wave [J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(11): 1742-1749.

[26] 龚政，王子木，靳闯，等. 人工鱼礁群对单桩基础局部冲刷防护效应的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2024，54(4)：870-876.
Gong Z, Wang Z M, Jin C, et al. Experimental study on effect of artificial reefs on local scour protection of monopile foundation[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2024, 54 (4): 870-876.

[27] Giraldes B W, Wuppukondur A, Al-Mohannadi H S, et al. Enhancing subsea asset performance: Investigating the biomimetic functionality of the Mushroom Reef design in hydrodynamics, stability, and sedimentation[J]. Ocean Engineering, 2023, 287: 115850.

[28] Liu X Y, Wang X X, Zhao F F, et al. Effect of flow deflectors on local scour around artificial reefs under steady current: Experimental and numerical investigations[J]. Applied Ocean Research, 2025, 157: 104509.

[29] 谭赛飞，王选志，张美玲，等. 长方体框架型人工鱼礁的流场效应[J]. 应用力学学报，2025，42(3)：665-676.
Tan S F, Wang X Z, Zhang M L, et al. Flow field effect of cuboid frame artificial reef[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2025, 42(3): 665-676.

[30] Li J, Zheng Y X, Gong P H, et al. Numerical simulation and PIV experimental study of the effect of flow fields around tube artificial reefs[J]. Ocean Engineering, 2017, 134: 96-104.

[31] Zhou P Y, Gao Y Y, Zheng S. Three-dimensional numerical simulation on flow behavior behind trapezoidal artificial reefs[J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 112899.

[32] 胡聪，毛海英，王开睿. 圆筒型鱼礁体纵横布设间距下的水动力特性研究[J]. 海洋科学进展，2022，40(1)：154-164.
Hu C, Mao H Y, Wang K R. Hydrodynamic characteristics under different longitudinal and transverse layout spacing of cylindrical reefs[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(1): 154-164.

[33] 王兴超，彭志豪，万宇，等. 长江上游航道三棱柱式人工鱼礁流场特性研究[J]. 水运工程，2024(12)：152-159，205.
Wang X C, Peng Z H, Wan Y, et al. Flow characteristics of triangular prism artificial fish reef in upper waterway of Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2024(12): 152-159, 205.

[34] 邵鹏飞，贾瑞，万宇，等. 不同来流流速和布设间距下人工鱼礁组合的流场效应研究[J]. 水运工程，2024(12)：97-104，110.
Shao P F, Jia R, Wan Y, et al. Effect of artificial reef assemblage with different inflow velocities and layout spacings on flow field[J]. Port & Waterway Engineering, 2024(12): 97-104, 110.

[35] 于定勇，王逢雨，钟延超，等. 不同布设间距下方型人工鱼礁体的水动力特性数值研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版)，2020，50(2)：126-134.
Yu D Y, Wang F Y, Zhong Y C, et al. Numerical research on hydrodynamic characteristics of artificial reefs with different disposal spaces[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(2): 126-134.

[36] 成泽毅，叶灿，高宇，等. 不同布设间距和来流速度下方型人工鱼礁上升流效应的数值模拟[J]. 海洋与湖沼，2023，54(3)：665-678.
Cheng Z Y, Ye C, Gao Y, et al. Numerical simulation of upwelling effects of square artificial reefs under different layout spacings and inflow velocities[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2023, 54(3): 665-678.

[37] Zhang T, Zhao W, Zhou C, et al. Design and modeling of an eco-

（下转第 47 页）