

海上风电对海洋生态的影响及其在水产养殖中的多模态融合技术应用

王 亮*, 张艳芳, 饶云松, 胡性涛, 孙晓晨

海洋石油工程股份有限公司, 天津

收稿日期: 2026年8月23日; 录用日期: 2026年9月14日; 发布日期: 2026年9月28日

摘 要

随着全球能源结构向低碳转型加速以及粮食安全压力加剧, 海上风电作为可持续海洋资源利用的重要途径, 正迅速发展, 且在替代化石能源、缓解气候变化方面发挥着重要作用。然而, 海上风电在建设运行过程中可能通过噪声扰动、栖息地变化以及人类活动增强等途径, 对海洋生态系统特别是海洋生物产生深远影响; 与此同时, 水产养殖业向深远海拓展虽前景广阔, 但在环境风险控制与智能化管理方面仍面临诸多挑战。因此, 在“海洋强国”和“向海洋要食物”战略引领下, 探索基于海上风电的深远海养殖融合模式, 对提升海洋空间利用效率和实现可持续发展具有重要意义。本文首先综述了海上风电对海洋生物的多维生态影响, 特别是风电设施对栖息地、物种多样性以及鱼类行为的影响, 并探讨了多模态融合技术在水产养殖中的应用, 重点讨论了如何通过这些技术监测海上风电项目对生态的影响。本研究创新性地结合了海上风电与水产养殖的协同发展, 通过应用多模态融合技术, 不仅为生态影响评估提供了新的视角, 还推动了水产养殖的智能化与精细化管理。通过这种技术整合, 我们能够更有效地实现海洋风电与水产养殖的协同发展, 推动“能源-生态-养殖”一体化系统的建设, 并总结了构建“能源-生态-养殖”一体化系统的关键实现路径。

关键词

海上风电, 水产养殖, 多模态融合技术, 生态影响, 智能化管理

The Impacts of Offshore Wind Power on Marine Ecosystems and the Application of Multimodal Fusion Technology in Aquaculture

Liang Wang*, Yanfang Zhang, Yunsong Rao, Xingtao Hu, Xiaochen Sun

Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin

*通讯作者。

文章引用: 王亮, 张艳芳, 饶云松, 胡性涛, 孙晓晨. 海上风电对海洋生态的影响及其在水产养殖中的多模态融合技术应用[J]. 水产研究, 2026, 13(3): 317-328. DOI: 10.12677/ojfr.2026.133037

Abstract

With the accelerated global transition toward low-carbon energy structures and mounting pressures on food security, offshore wind power has rapidly emerged as a key direction for sustainable marine resource utilization. It plays a positive role in replacing fossil fuels and mitigating climate change. However, during construction and operation, offshore wind farms may exert complex and far-reaching impacts on marine ecosystems—particularly marine life—through noise disturbance, habitat alteration, and increased human activity. Concurrently, while the expansion of aquaculture into deep and distant waters holds promising prospects, it still faces numerous challenges in environmental risk control and intelligent management. Therefore, guided by the national strategies of “Maritime Power” and “Securing Food from the Ocean”, exploring integrated models of deep-sea aquaculture based on offshore wind power holds significant importance for enhancing the efficiency of marine space utilization and achieving sustainable development. This paper first reviews the multi dimensional ecological impacts of offshore wind power on marine organisms, especially the effects of wind power facilities on habitats, species diversity and fish behaviour, and discusses the applications of multimodal fusion technology in aquaculture, with a focus on how these technologies can be used to monitor the ecological impacts of offshore wind power projects. Innovatively, this study integrates the coordinated development of offshore wind power and aquaculture. By adopting multimodal fusion technology, it not only provides new perspectives for ecological impact assessment but also promotes intelligent and refined management of aquaculture. Such technological integration enables more effective coordinated development of offshore wind power and aquaculture, facilitates the construction of an “energy ecology aquaculture” integrated system, and summarizes the key implementation pathways for establishing this integrated system.

Keywords

Offshore Wind Power, Aquaculture, Application of Multimodal Fusion Technology, Ecological Impacts, Intelligent Management

Copyright © 2026 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. 前言

海洋是地球上最大的生态系统，承载着丰富的生物资源，同时也是可再生能源开发和粮食生产的重要空间。近年来，海上风电作为一种清洁能源形式，在全球范围内快速发展。据统计，欧洲海上风电装机容量自 2014 年增长近六倍[1]，中国、英国、德国、丹麦等国也纷纷大规模布局海上风电项目[2]。随着海上风电的快速发展，其建设与运营过程对海洋生物的影响日益引起研究学者的广泛关注。早期研究主要关注海上风电对海洋生物的负面影响，如噪声污染和海底扰动[3] [4]；近年的研究则发现，风电项目在栖息地塑造和生物多样性提升方面也有显著的积极效应。与此同时，水产养殖业正朝着规模化、智能化方向转型。与传统的依赖人工经验投喂，效率低且易导致饲料浪费与水环境污染等养殖模式不同，现有水产养殖借助多模态融合技术，通过整合视觉、声学、传感器等多种数据源，实现对鱼类摄食和生长的精准评估和高效调控。这一技术进步为智能投喂、生态管理以及无人工厂的实现提供了技术基础和发展方向。尽管海上风电与水产养殖在目标与应用层面存在差异，但伴随深远海养殖产业的蓬勃发展和养殖

模式的不断完善,海上风电与水产养殖的结合日益成为可能。海上风电设施不仅能作为海洋监测平台,还能为养殖提供基础设施和数据采集中心。通过结合多模态融合技术,风电设施能够整合视觉、声学、传感器等多种数据源,从而实现深远海养殖的实时监测与管理。这一技术手段可精准评估鱼类的摄食行为、健康状况及生长情况,并优化养殖环境,为海上风电区域的生态影响评估提供高精度的数据支持。

本文旨在系统梳理海上风电对海洋生物的多维生态效应与多模态融合技术在水产养殖中的应用研究进展,探讨基于海上风电独特地理优势与布局,通过多模态融合技术融合规模化、智能化的海上网箱和牧场养殖模式,推动二者在海洋可持续发展中协同作用。本文将为海洋资源综合利用与生态保护提供理论依据与技术参考。

2. 海上风电对海洋生物的影响:双重效应分析

2.1. 海上风电促进海洋生物栖息地优化与生态系统修复

海上风电以风能替代化石燃料发电,显著降低二氧化碳及其他温室气体排放强度,进而间接缓解海洋酸化、海水升温与缺氧区域扩张带来的生态胁迫。

随着海上风电设施的广泛部署,研究逐渐揭示了其对海洋生态系统的复杂影响。风电设施不仅改变了水文环境,增加了底层营养盐的再悬浮,提升了初级生产力,还通过人工栖息地效应增强了生物多样性。但与此同时,风电场的建设也可能产生噪声污染、破坏底栖生物栖息地等负面影响。为评估这些影响的综合效应,研究者通过生物多样性指数分析、生态模型模拟、现场监测等多种方法,逐步量化风电项目的生态效益[4]。张明华等研究表明,海上风电场可显著增加鱼类及其他生物的食物供给,吸引大量恋礁型生物聚集繁殖,进而推动风电场区域生物多样性提升[5]。这一结果表明,海上风电场不仅重塑了局部生态环境,更为海洋生物提供了新型栖息空间;在比利时北海海域,DeMesel等[6]对 C-power 海上风电场风机基础的附着生物群落演替展开调查分析,结果显示:演替的第一年,新物种大量殖民迁入,附着性贝类迅速繁殖,往后的时间内可以吸引到 20 多种迁移性生物,导致该区域的生物多样性大幅提升,物种多样性提升了 30%。此外,海上风电设施中的桩基、导管架和电缆防护装置,能在原本缺乏硬质基底的海域创造了全新的三维栖息环境,形成了显著的“人工礁效应”。这些结构为藻类、藤壶、贝类等底栖生物提供了稳点的附着与繁殖的场所,从而显著增加局部生物量与物种多样性。欧洲北海的观测数据显示,风场周边鱼类与底栖生物密度显著高于无风电场区域[4]-[7],证实海上风电设施能为海洋生物提供了新的栖息空间,且有效提升区域生物资源量[8]-[11];值得关注的是,比利时北海海域海上风电场的风机附着生物群落同样经历了显著的生物多样性演替;风机建成首年便有大量新物种迁入,附着贝类快速繁殖,后续更吸引 20 余种迁移性生物聚集[12];丹麦 Horns Rev1 海上风电场进行了 10 年(2001~2010)的长期跟踪调查显示,底栖生物与游泳动物数量维持基本稳定,生物多样性亦明显提升[13]。荷兰 Egmond aan Zee 风电场的港海豚数量研究显示,其种群数量较风电场建设前有所增长,推测与“人工礁效应”导致场内鱼类资源增加相关[14]。另有研究指出,当德国湾海域风电机组规模达到 5000 台时,沉积物中生物量预计将较初始状态增加 4000 倍[15]。中国天津滨海南港风电场通过建设海上人工湿地,已吸引 32 种底栖生物和 217 种鸟类栖息。随着风电设施表面生物群落的逐步发展,区域食物网链条不断延长,生态系统复杂程度同步提升。上述研究均表明,海上风电在减缓生态胁迫的同时,还能通过人工栖息地效应有效促进生物附着繁殖与物种富集,为海洋栖息地优化及生物多样性提升提供了全新路径。

海上风电场的建设与运营往往伴随着捕捞活动的限制,由此事实上的海洋保护区(*de facto* Marine Protected)也应运而生,而这种捕捞限制在一定程度上为渔业资源恢复提供了积极助力。相关研究证实,风电区周边的底栖动物生物量与幼鱼密度普遍高于传统渔区[1];德国湾一个离岸平台的研究显示,与同等面积的软质沉积物区域相比,硬质基底上大型底栖动物的生物量是软质沉积物区域的 35 倍[16]。江苏东风

电场建成后,其周边海域的浮游动植物、部分底栖生物及鱼类的物种丰度与生物量均实现显著提升[17]。此外,海上风电场建设还推动了海洋空间的多功能复合利用——通过与海洋牧场、海藻养殖及生态修复项目相结合,催生了“风电 + 养殖”的创新试点模式。该复合利用模式已在部分欧洲国家落地实践,不仅有效缓解了海洋空间资源竞争压力,更助力了可持续海洋产业的协同发展[18]。综上,海上风电场建设通过对渔业资源的增益效应、生态系统的修复作用及海洋空间的多功能开发,既为“事实上的海洋保护区”形成创造了条件,更推动了渔业资源的可持续恢复。

总体而言,海上风电的生态效益远大于其环境成本。目前,大力发展现代海上风电项目,已成为高效盘活海洋资源、加速能源结构优化转型的核心关键[19]。图1当前提出的“海上风电 + 海洋牧场”的融合模式在现代有着重要的战略意义[20][21]。例如通过整合海上风电的基础设施和未充分利用的海域资源,将风机基础与海洋牧场设备相结合,旨在减少维护成本、增加养殖容量,并实现海域资源的高效利用与空间优化。德国、日本和韩国等国家在海上风电内同时开展了增养殖活动[22],对海洋资源的修复和养护的作用更加明显[23]。此外,风电产业的发展有助于降低对化石燃料的依赖度,削减温室气体排放,推动能源结构绿色转型;海洋牧场则依托人工养殖设施与现代渔业管理技术,以可持续模式扩大水产品供给规模,同步改善并保护海洋生态环境[19]。

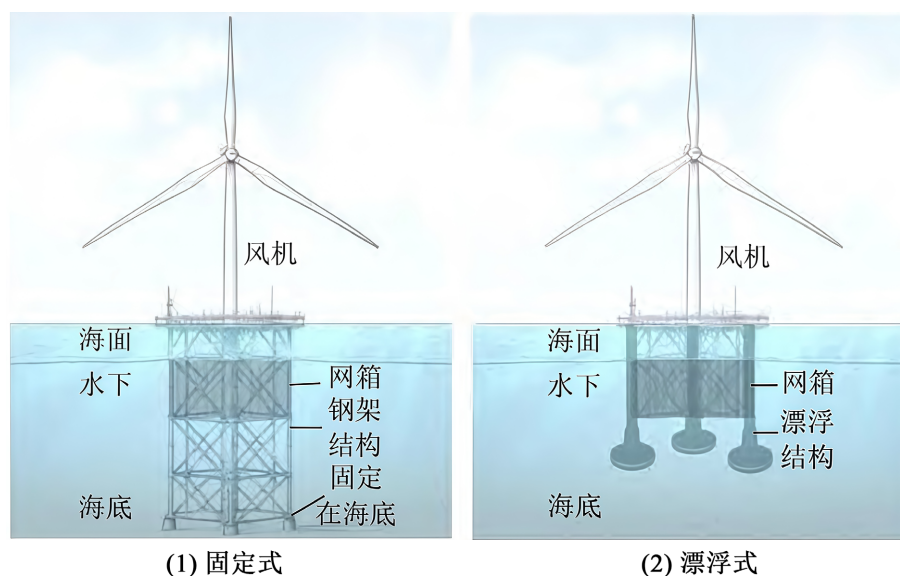


Figure 1. Structural integration mode [19]

图1. 海上风电结构融合模式[19]

2.2. 海上风电施工期生态扰动与长期生态效应的不确定性

在海上风电的建设阶段,海底工程作业可能导致废弃物污染,并引发一系列生态扰动。在建设过程中,包括桩基打入、海底电缆铺设和船舶作业等环节,易引起海底沉积物再悬浮、浑浊度升高,甚至对底栖生物的生命活动造成直接损害。底栖生物群落对海洋底质变化极为敏感,施工活动可能导致群落结构的短期紊乱[3][24]。尤其是在海底电缆铺设过程中,原有地形和地貌的改变可能会破坏底栖生物的栖息环境,甚至导致其物种消失。此外,海上风电平台基础桩的施工与海底电缆的敷设,会扰动海床沉积物层,短期内改变底栖生物的生存环境。而漂浮式风电场的锚链安装,可能进一步扩大海床扰动的影响范围,尤其当多个平台共用锚点时,这种扰动影响会更为显著。海上风电项目通常选址于细沙沉积区域,在项目建设过程中,风机基础的打桩钻探作业和海底电缆的铺设会改变海底地形和沉积环境,进而对海

洋生态产生一定程度的破坏[25]。张晶磊等研究指出[26],随着海上风电建设规模的不断扩大,海水污染因子超标率上升,浮游生物和底栖生物的损失显著增加,这种累积效应会随建设规模的扩大而加剧。

风电场的建设与运营伴随噪声和电磁场等诸多环境要素的改变,这些变化对海洋生物的生理状况及行为等生命活动产生直接或间接的影响[27][28]。大部分海洋哺乳动物对声音具有高度敏感性,而海上风电项目在施工阶段的打桩、钻探作业,以及运营期间设备运行所产生的低频噪声,恰恰对这类生物的危害最为显著[29][30]。在苏格兰 Moray Firth 海域,对海上风电打桩作业近场区域的水下打桩噪声衰减曲线进行拟合,将其与宽吻海豚(*Tursiops truncatus*)的听觉特性曲线对比后发现,距打桩点 5 m 处海豚会出现永久性听觉损伤,在 10 m 处则会发生暂时性听力缺失[31]。不仅如此,噪音对鱼类的捕食行为也存在显著影响。例如,噪音干扰导致欧洲鳗鲡(*Anguilla anguilla*)侧化行为变弱,反捕食性能降低[32],打桩噪音会导致长鳍近海鲑鱼(*Doryteuthis pealeii*)的捕食效率降低[33],同时也会对其警报行为造成干扰,而三刺鱼(*Gasterosteus aculeatus*)在风电噪音回放暴露下,会出现捕食误差增加,捕食效率降低等[34]。此外,海洋哺乳动物多通过声音进行种间交流,因此运营期的海上风电可能会对种间交流造成掩蔽效应[35]。比如对于鲸类和海豚(*Delphinidae*)等依靠远距离声学交流的动物,持续的低频噪声可能干扰其回声定位及通信系统[31]。尽管运营期的噪声强度明显低于施工期,但长期的低频振动仍需持续监测。

除海洋噪声外,施工建设与运营期间的大型装置设备和海底电缆在输电过程中产生的电磁场,可能对依赖地磁导航的鱼类、鳗鱼(*Anguilla japonica*)及鲨鱼(*Selachomorpha*)等物种产生影响[36]。研究发现,磁场的变化会导致黄鳗(*Anguilla japonica*)的行动方向发生改变[37];电缆处的强磁场对黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)的存活率及行为产生了影响[38];低强度的恒定磁场暴露可能减缓鳟鱼(*Salmo trutta*)和虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的胚胎发育,电磁场对鱼类的存活率和行为亦可能产生一定影响[39]。此外,部分海洋生物具有明显的迁徙路线和季节性分布规律,海上风电场可能成为这些物种迁徙的潜在障碍。研究表明,部分海鸟和欧亚杓鹬(*Numenius arquata*)在迁徙通道上可能因规避风机而改变飞行路线,而某些鱼类也可能因声场和流场变化而调整栖息与觅食路径[40]。

已有研究表明,海上风电场在建设运营过程中产生的电磁场强度较低,通常不会直接造成生物致死效应,但其长期暴露所带来的生态影响仍未完全明确[24]。受海上风电场建设周期短、运行年限有限等因素制约,当前学界对其长期效应、累积效应及复合效应(如多台风机、多海域、多物种间的交互作用)的认知仍较为不足。生态系统的多层级反馈、物种间相互关系的重构等复杂过程,仍需通过长期原位观测与系统研究加以阐明。在全球尺度下,超过 80% 的潜在生态效应仍缺乏定量数据支撑,研究空白主要集中在风电设施退役阶段、漂浮式风机的生态影响,以及复杂生态系统演变的长期动态等方面[2]。此外,大规模海上风电场的建设可能改变区域水文动力过程,影响浮游植物藻华的发生节律,进而通过食物链的级联效应对整个生态系统产生连锁影响。

综上所述,海上风电的建设与运营过程中,施工期的生态扰动、噪声与电磁场影响对水产养殖生物的生理与行为产生显著影响。施工期产生的低频噪声与电磁场,可对鱼类及海洋哺乳动物的信号交流、回声定位与迁徙路线造成干扰,进而引发其栖息生境的改变。此外,风电设施对海底沉积物的扰动和人工栖息地的建立也对底栖生物群落产生短期影响。然而,长期的生态效应仍不明确,尤其是多台风机和多海域交互作用的复合效应,尚需进一步研究。尽管存在这些生态扰动,海上风电的生态效益仍然显著,如生物多样性提升、次级生产量增加以及碳减排等间接效益。因此,海上风电在实现能源替代的同时,能够为生态系统提供重要的保护与修复作用。

通过对海上风电对海洋生物生态影响的探讨,我们认识到,尽管风电项目带来生态效益的同时,也面临着诸如噪声污染、栖息地扰动等影响。尽管存在一定的生态扰动,风电场的建设同时为海洋生物提供了新的栖息空间和生物多样性提升的机会。这一现象为水产养殖提供了新的机会,同时也提出了如何

优化养殖环境的挑战。为了有效应对这些挑战,多模态融合技术作为一种先进的监测与管理手段,逐渐成为水产养殖的关键技术。因此,探索多模态融合技术在水产养殖中的应用,尤其是在海上风电环境中的应用,显得尤为重要。

3. 多模态融合技术在水产养殖上的应用研究及发展潜力

水产养殖的管理与监测长期面临诸多技术挑战,尤其在复杂多变的水下环境中更为突出。水质、光照、水体浊度等环境因素易对传统单模态监测手段产生显著干扰,严重制约了其在实际养殖场景中的应用效果与稳定性。为有效应对上述问题,多模态融合技术逐渐成为水产养殖智能化领域的重要发展方向。多模态融合技术通过整合视觉、声学、温盐溶解氧等多类型传感器数据,实现对养殖水环境与鱼类行为状态的全方位、立体化感知。该技术可有效弥补单一模态感知的固有缺陷,例如水下噪声、水体浊度对视觉成像的影响。通过融合视觉、声学与环境传感等多源信息,能够显著提升数据采集的完整性与分析准确性,进而增强对鱼类摄食行为、健康状态及环境动态变化的监测精度。多模态融合技术不仅可实现对鱼类行为的精准评估,还能助力优化投喂策略、提升饲料利用率、降低水体污染,是实现水产养殖智能化管理与可持续发展的关键支撑技术。

综上所述,多模态融合技术通过整合视觉、声学、传感器等多种数据源,能够实时监测水产养殖环境,并在评估风电项目对生态的影响方面发挥重要作用。本章将详细讨论这一技术如何在水产养殖中实现精准数据采集,并为风电与养殖的融合提供技术支撑。

3.1. 多模态融合的必要性与优势

随着水产养殖向智能化方向发展,利用单模态分析或多模态融合技术量化鱼类摄食强度已成为研究的热点问题[41]。准确评估鱼类摄食强度对于优化投喂策略、提高饲料利用率、减少饵料浪费和水体污染至关重要[42],与传统的人工监测方法相比,多模态融合技术能够实时提供更精准的鱼类行为和健康状况评估。传统方法通常依赖人工观察,存在主观性强、效率低的缺点;单模态方法,如基于视觉的摄食行为识别,受水体浑浊、光照变化等因素的影响较大[43]-[45]。而多模态技术通过整合温度、视觉、声学、电压、振动和传感器数据,不仅减少了人为误差,还能实时监测水产养殖环境的变化和及时发现故障,从而实现更加智能化和高效的管理。

声学方法通过分析鱼类摄食时产生的声学信号(如咀嚼饲料和活动噪音等)量化鱼类摄食行为,Zeng等[46]基于声学信号和深度学习模型的方法,能够实时识别鱼类的进食强度,从而有效调整投喂量,减少饲料浪费,提高水体的生态平衡,类似的多模态技术在多地取得了显著效果,例如,利用对数梅尔频谱图和深度学习算法评估养殖鱼类的摄食强度[47],这些研究表明多模态技术在水产养殖中具有极大的应用潜力。然而,声学系统易受到背景噪音的干扰,如养殖系统中的增氧设备或水泵产生的噪音[48]。传感器常被应用于鱼类摄食强度的评估,如利用六轴惯性传感器结合时域和频域特征进行鱼类摄食强度分类[49],或通过监测水质参数评估鱼类的摄食强度[50],这些参数虽能反映鱼类生理状态,但由于其变化存在一定的滞后性,难以反映鱼类实时摄食强度[51]。因此,单一模态数据在复杂水下环境中存在一定限制,而多模态融合能够整合来自不同传感器的信息,克服单一模态的局限性,提供更全面的鱼类摄食行为表征,从而显著提高评估的准确性和可靠性[52]。

3.2. 多模态核心技术与方法

多模态核心技术包括计算机视觉技术、声学方法、传感器技术、水质传感器、无人机技术、大数据与机器学习技术以及深度学习与神经网络等(图2)。

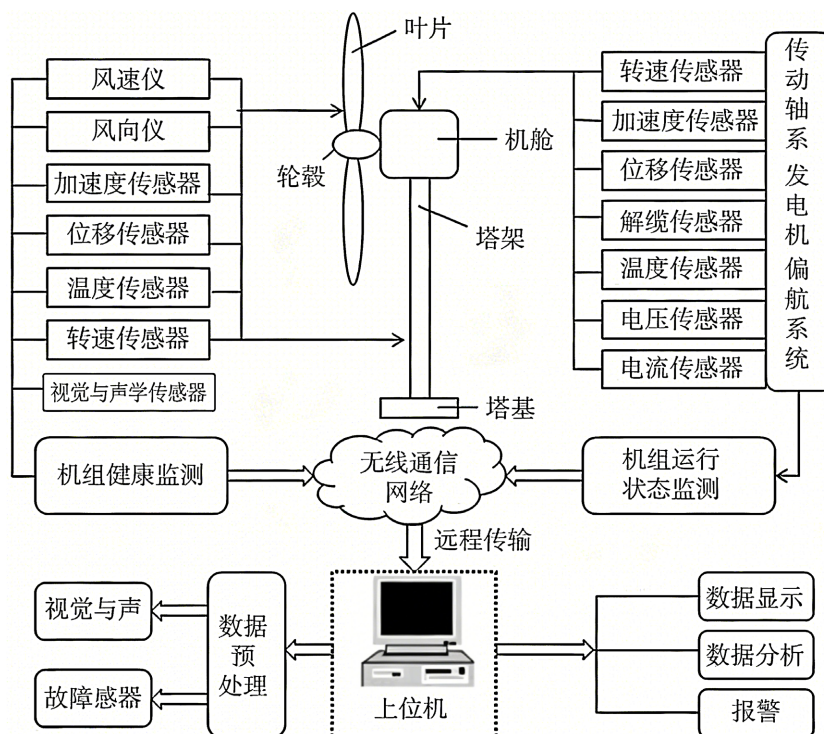


Figure 2. Multimodal data fusion monitoring platform [53]

图 2. 多模态数据融合监测平台[53]

计算机视觉技术在鱼类摄食行为识别中扮演着重要角色[42]。该技术能够实现鱼体检测、跟踪、行为姿态估计和运动轨迹分析等功能,在图像采集与预处理环节,常采用水上或水下摄像头进行视频流采集。为应对水下环境挑战,研究者探索使用近红外相机在夜间或浑浊水体中进行观测,例如 Zhou 等人利用近红外成像技术成功量化了鱼类摄食行为。在预处理过程中,常采用图像增强、背景扣除和图像分割等技术,以精确提取鱼体信息[54] [55],其中, Yang 等人提出的 BlendMask-VoVNetV2 方法有效解决了鱼群拥挤和遮挡情况下的鱼体分割问题[56]; Zhang 等人采用 MobileNetV3 轻量级网络进行鱼类摄食行为分析,通过多尺度信息融合提升特征提取能力,克服了图像中鱼体区域小、运动随机性强等难题[57]; Zhao 等人结合时空图卷积网络和改进的 ByteTrack 跟踪算法,分析个体鱼类的行为特征,以评估食欲,有效解决了鱼群内部遮挡和类内变异性问题; Liu 等人则基于改进的视觉 Transformer 模型,将虹鳟鱼摄食行为划分为强、中、弱三种强度[58]。在语义分割技术方面, Wei 等人提出基于语义分割的鱼类摄食行为识别方法,实现了高精度识别,为自动投喂系统提供科学投喂策略[59]; Wu 等人创新性地利用摄食产生的水花大小和形态作为评估指标,采用多核选择结构自适应感受野图像特征提取网络和半监督学习的摄食水花检测网络,评估高、中、低三种摄食强度[44]。与个体行为分析相比,鱼群行为的定量分析对于管理鱼类健康和提高养殖效率至关重要[59]。

声学方法在水产养殖中广泛应用于监测和评估鱼类摄食强度,特别是在自动化评估方面展现出显著的潜力[60]。在声学信号采集上, Zeng 等人通过水听器等设备捕获鱼类咀嚼饲料和摄食活动产生的声学信号[46];在信号处理与特征提取上, Du 等人采用时域和频域分析对声学信号进行处理,提取梅尔谱图等特征[61]; Zeng 等人基于声学信号和改进的 Swin Transformer 音频频谱模型(ASST),将鱼类摄食强度划分为强、中、弱、无四个等级[46]。深度学习模型与音频事件检测技术结合,能够自动识别并量化鱼类摄食行为。

除了视觉和声学,传感器技术,如六轴惯性传感器,也开始应用于鱼类摄食行为的监测,六轴惯性传感器能够收集由鱼类摄食引起的水面波动数据[49]。Ma 等人提出 TFFormer 模型,通过融合时域和频域信号来识别鱼类摄食行为,并将其划分为强、中、弱、无四个类别[49];此外, Ma 等采用多传感器融合策略,将视频图像与六轴惯性传感器信号相结合,构建了 VTfish 模型,显著提升了鱼类摄食行为识别的精度与可靠性。

3.3. 多模态融合技术在水产养殖上的应用

多模态融合技术旨在整合不同数据源的优势,克服单一模态的局限性,进而实现更全面、准确的鱼类摄食强度评估[49]。这种技术在水产养殖上的应用上,显著提高了摄食行为识别的精度与管理效率。

为应对复杂水下环境, Li 等提出跨模态协同学习方法,融合音频和视觉信息,通过跨模态互补学习识别鱼类摄食强度,该方法通过整合视觉和声学线索,克服了单一模态在复杂环境下的局限性,较单模态与传统融合方法精度提升 6.4% [48]。面向养殖场应用, Wang 等构建跨模态分层门控网络,结合协同学习的多模态融合和音频引导注意力机制,实现自适应精准投喂[62]。为进一步增强分类可靠性, Li 等提出视频和音频融合模型,强化特征提取与跨模态融合能力,以带坐标注意力的 Res2Net 网络强化音频特征捕捉,采用轻量级卷积网络提取视频特征,并以带流形保持的仿射变换矩阵提升融合效率;实验表明,该模型分类准确率达到 93%,较单模态模型提高了 7%,参数减少了 25.41%,相较单音频与单视频分别提升 7%和 6.5% [63]。在模型体系层面, Zhang 等提出多阶段增强的多模态交互网络,于不同处理阶段引入深度交互与增强策略,以捕捉更丰富的时空与语义关联,从而提升准确性、适用性与可靠性[64]; Yang 等人将水质参数、音频和视频统一到自适应深度模块化协同注意力框架,实现摄食行为全流程识[65]。

总体而言,上述研究表明,多模态融合技术在水产养殖中具有重要应用价值,可在养殖场景中实现对摄食强度的稳健、精细化评估,随着多模态融合技术的发展,其不仅能够提供精准的鱼类摄食行为识别,还可以优化养殖效率,为实现智能化、精细化管理提供了有力的技术保障。

3.4. 多模态融合技术在风电场的潜在应用

随着海上风电的快速发展,风电场对海洋生态的影响日益受到关注。多模态融合技术为风电场生态监测提供了全新的解决方案,能够通过整合视觉、声学、传感器等多种数据源,实现对风电场养殖生态影响的精准评估。具体而言,多模态技术为风电场的生态监测提供了更加全面和高效的解决方案,能够实时监测风电场对海洋生态系统的影响,尤其是在风机运行时的噪声污染、海底扰动以及生物栖息地变化等方面。

在海上风电环境中,多模态融合技术的应用不仅限于监测水产养殖的日常管理,还可以用于评估风电场对水产养殖环境的影响。通过结合声学信号、视觉影像和环境传感器数据,研究人员可以系统地评估风电场运行对海洋生物栖息地的影响。例如,声学数据有助于监测风电场运行产生的低频噪声对海洋哺乳动物的干扰;视觉技术可以揭示海底扰动和沉积物再悬浮的情况;环境传感器则能监测水质、溶解氧等参数的变化,进一步评估风电场建设与运营对周围生态环境的长远影响。通过多模态数据的整合,风电场的生态影响评估能够更加精确、全面,使得风电与水产养殖的协同发展成为可能,同时为海上风电对生态的影响评估提供了高精度的数据支持。

尽管多模态融合技术在水产养殖中展现了巨大的潜力,但在实际应用中仍面临诸如水下环境噪声干扰、光照变化等挑战。未来的研究可以进一步优化传感器数据融合算法,通过引入深度学习和人工智能技术,提高对鱼类行为的识别精度,并将其与现有的智能养殖系统结合,实现全面的自动化管理。此外,如何提升多模态系统的成本效益,使其适用于大规模养殖场,也是未来研究的重点方向之一。

随着技术的发展,未来风电场的生态监测系统将更加智能化,能够实时整合和分析多模态数据,不仅提高生态监测的精度,也能为风电场的优化管理提供决策支持。通过这种技术的推动,海上风电与水产养殖的融合发展将不再是遥不可及的目标,二者的协同效应将推动海洋资源的可持续利用,为实现“能源-生态-养殖”一体化系统提供有力支持。

4. 总结

本文系统地综述了海上风电对海洋生态的影响,并探讨了多模态融合技术在水产养殖中的应用。海上风电的生态效益可通过适当的环境保护措施得到增强,而多模态技术则为水产养殖提供了智能化、精细化管理的解决方案。未来的研究可以集中在进一步优化多模态融合技术在复杂水域环境中的应用,特别是提高其在风电环境下的适应性和数据处理效率。

参考文献

- [1] European Environment Agency (EEA) (2024) Harnessing Offshore Wind while Preserving the Seas. <https://doi.org/10.2800/3621684>
- [2] Watson, S.C.L., Somerfield, P.J., Lemasson, A.J., Knights, A.M., Edwards-Jones, A., Nunes, J., *et al.* (2024) The Global Impact of Offshore Wind Farms on Ecosystem Services. *Ocean & Coastal Management*, **249**, Article 107023. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107023>
- [3] 王婷, 茹小尚, 张立斌. 海上风电对海洋生态环境与海洋生物资源的综合影响研究进展[J]. 海洋科学, 2022, 46(7): 95-104.
- [4] Slavik, K., Lemmen, C., Zhang, W., Kerimoglu, O., Klingbeil, K. and Wirtz, K.W. (2018) The Large-Scale Impact of Offshore Wind Farm Structures on Pelagic Primary Productivity in the Southern North Sea. *Hydrobiologia*, **845**, 35-53. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3653-5>
- [5] 张明华, 张永, 刘辉, 等. 海上风电场对海洋生态环境影响分析——以渤中海上风电场为例[J]. 海岸工程, 2026, 45(1): 26-43.
- [6] DeMesel, I., Kerckhof, F., Norro, A., Rumes, B. and Degraer, S. (2015) Succession and Seasonal Dynamics of the Epifauna Community on Offshore Wind Farm Foundations and Their Role as Stepping Stones for Non-Indigenous Species. *Hydrobiologia*, **756**, 37-50. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2157-1>
- [7] Bergström, L., Sundqvist, F. and Bergström, U. (2013) Effects of an Offshore Wind Farm on Temporal and Spatial Patterns in the Demersal Fish Community. *Marine Ecology Progress Series*, **485**, 199-210. <https://doi.org/10.3354/meps10344>
- [8] Degraer, S., Carey, D.A., Coolen, J.W.P., Hutchison, Z.L., Kerckhof, F., Rumes, B., *et al.* (2020) Offshore Wind Farm Artificial Reefs Affect Ecosystem Structure and Functioning: A Synthesis. *Oceanography*, **33**, 48-57. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.405>
- [9] Paxton, A.B., Shertzer, K.W., Bacheler, N.M., Kellison, G.T., Riley, K.L. and Taylor, J.C. (2020) Meta-Analysis Reveals Artificial Reefs Can Be Effective Tools for Fish Community Enhancement but Are Not One-Size-Fits-All. *Frontiers in Marine Science*, **7**, Article 282. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00282>
- [10] Bohnsack, J.A. (1989) Are High-Densities of Fishes at Artificial Reefs the Result of Habitat Limitation or Behavioral Preference? *Bulletin of Marine Science*, **44**, 631-645.
- [11] Andersson, M.H. (2011) Offshore Wind Farms—Ecological Effects of Noise and Habitat Alteration on Fish. Stockholm University.
- [12] DeMesel, I., Kerckhof, F., Norro, A., Rumes, B. and Degraer, S. (2015) Succession and Seasonal Dynamics of the Epifauna Community on Offshore Wind Farm Foundations and Their Role as Stepping Stones for Non-Indigenous Species. *Hydrobiologia*, **756**, 37-50. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2157-1>
- [13] Stenberg, C., Deurs, M.V., Stottrup, J., Mosegaard, H., Grome, T., Dinesen, G., *et al.* (2011) Effect of the Horns Rev 1 Offshore Wind Farm on Fishcommunities: Follow-Up Seven Years after Construction. Danish Energy Authority.
- [14] Scheidat, M., Tougaard, J., Brasseur, S., Carstensen, J., van Polanen Petel, T., Teilmann, J., *et al.* (2011) Harbour Porpoises (*Phocoena phocoena*) and Wind Farms: A Case Study in the Dutch North Sea. *Environmental Research Letters*, **6**, Article 025102. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/2/025102>
- [15] Krone, R., Gutow, L., Brey, T., Dannheim, J. and Schröder, A. (2013) Mobile Demersal Megafauna at Artificial Structures in the German Bight—Likely Effects of Offshore Wind Farm Development. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*,

- 125, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.03.012>
- [16] Krone, R., Gutow, L., Joschko, T.J. and Schröder, A. (2013) Epifauna Dynamics at an Offshore Foundation—Implications of Future Wind Power Farming in the North Sea. *Marine Environmental Research*, **85**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2012.12.004>
- [17] Wang, J.J., Zou, X.Q., Yu, W.W., Zhang, D. and Wang, T. (2019) Effects of Established Offshore Wind Farms on Energy Flow of Coastal Ecosystems: A Case Study of the Rudong Offshore Wind Farms in China. *Ocean & Coastal Management*, **171**, 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.01.016>
- [18] 阳杰, 张建华, 马兆荣, 等. 海上风电与海洋牧场融合发展趋势与技术挑战[J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 1-16.
- [19] 黎静华, 田伟, 王明燕, 等. 海上风电与海洋牧场融合发展研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(5): 1966-1980.
- [20] Chen, C.H. and Su, N.J. (2022) Global Trends and Characteristics of Offshore Wind Farm Research over the Past Three Decades: A Bibliometric Analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, **10**, Article 1339. <https://doi.org/10.3390/jmse10101339>
- [21] Pardo, J.C.F., Aunem, U., Harman, C., Walday, M. and Skjelum, S.F. (2023) Asynthesis Review of Nature Positive Approaches and Coexistence in the Offshore Wind Industry. *Journal of Marine Science*, **80**, 1427-1443.
- [22] Griffin, R., Buck, B. and Krause, G. (2015) Private Incentives for the Emergence of Co-Production of Offshore Wind Energy and Mussel Aquaculture. *Aquaculture*, **436**, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.10.035>
- [23] Russell, D.J.F., Brasseur, S.M.J.M., Thompson, D., Hastie, G.D., Janik, V.M., Aarts, G., *et al.* (2014) Marine Mammals Trace Anthropogenic Structures at Sea. *Current Biology*, **24**, R638-R639. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.06.033>
- [24] Xu, P., Wang, B., Wang, Z., Jin, R., Ahmad, M., Shang, Y., *et al.* (2025) Effects of Electromagnetic Radiation from Offshore Wind Power on the Physiology and Behavior of Two Marine Fishes. *Marine Pollution Bulletin*, **213**, Article 117633. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117633>
- [25] Bray, L., Reizopoulou, S., Voukouvalas, E., Soukissian, T., Alomar, C., Vázquez-Luis, M., *et al.* (2016) Expected Effects of Offshore Wind Farms on Mediterranean Marine Life. *Journal of Marine Science and Engineering*, **4**, Article 18. <https://doi.org/10.3390/jmse4010018>
- [26] 张晶磊. 江苏滨海北区海上风电工程累积环境影响评价[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- [27] Nedwell, J. and Howell, D. (2004) A Review of Offshore Windfarm Related Underwater Noise Sources. COWRIE.
- [28] Nedwell, J.R., Turnpenny, A.W.H., Lovell, J., Parvin, S.J., Workman, R., Spinks, J.A.L., *et al.* (2007) A Validation of the dBht as a Measure of the Behavioural and Auditory Effects of Underwater Noise. Subacoustech Ltd.
- [29] Bailey, H., Senior, B., Simmons, D., Rusin, J., Picken, G. and Thompson, P.M. (2010) Assessing Underwater Noise Levels during Pile-Driving at an Offshore Windfarm and Its Potential Effects on Marine Mammals. *Marine Pollution Bulletin*, **60**, 888-897. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.01.003>
- [30] Madsen, P.T., Wahlberg, M., Tougaard, J., Lucke, K. and Tyack, P. (2006) Wind Turbine Underwater Noise and Marine Mammals: Implications of Current Knowledge and Data Needs. *Marine Ecology Progress Series*, **309**, 279-295. <https://doi.org/10.3354/meps309279>
- [31] Zhang, X.G., Guo, H.Y., Chen, J., Song, J., Xu, K., Lin, J., *et al.* (2021) Potential Effects of Underwater Noise from Wind Turbines on the Marbled Rockfish (*Sebasticus marmoratus*). *Journal of Applied Ichthyology*, **37**, 514-522. <https://doi.org/10.1111/jai.14198>
- [32] Simpson, S.D., Purser, J. and Radford, A.N. (2015) Anthropogenic Noise Compromises Antipredator Behaviour in European Eels. *Global Change Biology*, **21**, 586-593. <https://doi.org/10.1111/gcb.12685>
- [33] Jones, I.T., Peyla, J.F., Clark, H., Song, Z., Stanley, J.A. and Mooney, T.A. (2021) Changes in Feeding Behavior of Longfin Squid (*Doryteuthis pealeii*) during Laboratory Exposure to Pile Driving Noise. *Marine Environmental Research*, **165**, Article 105250. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105250>
- [34] Jones, I.T., Stanley, J.A. and Mooney, T.A. (2020) Impulsive Pile Driving Noise Elicits Alarm Responses in Squid (*Doryteuthis pealeii*). *Marine Pollution Bulletin*, **150**, Article 110792. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110792>
- [35] Nabi, G., McLaughlin, R.W., Hao, Y., Wang, K., Zeng, X., Khan, S., *et al.* (2018) The Possible Effects of Anthropogenic Acoustic Pollution on Marine Mammals' Reproduction: An Emerging Threat to Animal Extinction. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**, 19338-19345. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2208-7>
- [36] Taormina, B., Bald, J., Want, A., Thouzeau, G., Lejart, M., Desroy, N., *et al.* (2018) A Review of Potential Impacts of Submarine Power Cables on the Marine Environment: Knowledge Gaps, Recommendations and Future Directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **96**, 380-391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.026>
- [37] Souza, J.J., Poluhovich, J.J. and Guerra, R.J. (1988) Orientation Responses of American Eels, *Anguilla Rostrata*, to Varying Magnetic Fields. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, **90**, 57-61.

- [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(88\)91005-5](https://doi.org/10.1016/0300-9629(88)91005-5)
- [38] 袁健美, 贲成恺, 高继先. 海上风电磁场对 12 种海洋生物存活率与行为的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 3051-3056.
- [39] Formicki, K. and Winnicki, A. (1998) Reactions of Fish Embryos and Larvae to Constant Magnetic Fields. *Italian Journal of Zoology*, **65**, 479-482. <https://doi.org/10.1080/11250009809386870>
- [40] Schwemmer, P., Pederson, R., Haecker, K., Bocher, P., Fort, J., Mercker, M., et al. (2022) Assessing Potential Conflicts between Offshore Wind Farms and Migration Patterns of a Threatened Shorebird Species. *Animal Conservation*, **26**, 303-316. <https://doi.org/10.1111/acv.12817>
- [41] Li, W., Du, Z., Xu, X., Bai, Z., Han, J., Cui, M., et al. (2024) A Review of Aquaculture: From Single Modality Analysis to Multimodality Fusion. *Computers and Electronics in Agriculture*, **226**, Article 109367. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109367>
- [42] Li, D., Wang, Z., Wu, S., Miao, Z., Du, L. and Duan, Y. (2020) Automatic Recognition Methods of Fish Feeding Behavior in Aquaculture: A Review. *Aquaculture*, **528**, Article 735508. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735508>
- [43] Yang, Y., Jia, L., Long, W. and Jiang, L. (2025) A Review of Research on Fish Feeding Behavior Based on Computer Vision. *Journal of Big Data and Computing*, **3**, 50-58. <https://doi.org/10.62517/jbdc.202501107>
- [44] Wu, Y., Wang, X., Shi, Y., Wang, Y., Qian, D. and Jiang, Y. (2024) Fish Feeding Intensity Assessment Method Using Deep Learning-Based Analysis of Feeding Splashes. *Computers and Electronics in Agriculture*, **221**, Article 108995. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108995>
- [45] Yue, J., Yang, H., Jia, S., Wang, Q., Li, Z., Kou, G., et al. (2021) A Multi-Scale Features-Based Method to Detect Oplegnathus. *Information Processing in Agriculture*, **8**, 437-445. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.10.001>
- [46] Zeng, Y., Yang, X., Pan, L., Zhu, W., Wang, D., Zhao, Z., et al. (2023) Fish School Feeding Behavior Quantification Using Acoustic Signal and Improved Swin Transformer. *Computers and Electronics in Agriculture*, **204**, Article 107580. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107580>
- [47] Iqbal, U., Li, D., Du, Z., Akhter, M., Mushtaq, Z., Qureshi, M.F., et al. (2024) Augmenting Aquaculture Efficiency through Involutional Neural Networks and Self-Attention for Oplegnathus Punctatus Feeding Intensity Classification from Log Mel Spectrograms. *Animals*, **14**, Article 1690. <https://doi.org/10.3390/ani14111690>
- [48] Li, J., Wei, Y., Ma, W. and Wang, T. (2025) Cross-Modal Complementarity Learning for Fish Feeding Intensity Recognition via Audio-Visual Fusion. *Animals*, **15**, Article 2245. <https://doi.org/10.3390/ani15152245>
- [49] Ma, P., Yang, X., Hu, W., Fu, T. and Zhou, C. (2024) Fish Feeding Behavior Recognition Using Time-Domain and Frequency-Domain Signals Fusion from Six-Axis Inertial Sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*, **227**, Article 109652. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109652>
- [50] Sun, L., Wang, B., Yang, P., Wang, X., Li, D. and Wang, J. (2022) Water Quality Parameter Analysis Model Based on Fish Behavior. *Computers and Electronics in Agriculture*, **203**, Article 107500. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107500>
- [51] Du, Z., Cui, M., Xu, X., Bai, Z., Han, J., Li, W., et al. (2024) Harnessing Multimodal Data Fusion to Advance Accurate Identification of Fish Feeding Intensity. *Biosystems Engineering*, **246**, 135-149. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.08.001>
- [52] Zhou, C., Zhang, B., Lin, K., Xu, D., Chen, C., Yang, X., et al. (2017) Near-Infrared Imaging to Quantify the Feeding Behavior of Fish in Aquaculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, **135**, 233-241. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.013>
- [53] 马腾飞. 海上油气平台智能监测技术[J]. 今日制造与升级, 2025(8): 84-86.
- [54] Li, Y., Hu, Z., Zhang, Y., Liu, J., Tu, W. and Yu, H. (2024) DDEYOLOV9: Network for Detecting and Counting Abnormal Fish Behaviors in Complex Water Environments. *Fishes*, **9**, Article 242. <https://doi.org/10.3390/fishes9060242>
- [55] Yang, L., Chen, Y., Shen, T. and Li, D. (2023) An FSFS-Net Method for Occluded and Aggregated Fish Segmentation from Fish School Feeding Images. *Applied Sciences*, **13**, Article 6235. <https://doi.org/10.3390/app13106235>
- [56] Yang, L., Chen, Y., Shen, T., Yu, H. and Li, D. (2023) A BlendMask-VoVNetV2 Method for Quantifying Fish School Feeding Behavior in Industrial Aquaculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, **211**, Article 108005. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108005>
- [57] Zhang, Y., Xu, C., Du, R., Kong, Q., Li, D. and Liu, C. (2023) MSIF-MobileNetV3: An Improved MobileNetV3 Based on Multi-Scale Information Fusion for Fish Feeding Behavior Analysis. *Aquacultural Engineering*, **102**, Article 102338. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2023.102338>
- [58] Liu, J., Becerra, A.T., Bienvenido-Barcena, J.F., Yang, X., Zhao, Z. and Zhou, C. (2024) Cffi-vit: Enhanced Vision

- Transformer for the Accurate Classification of Fish Feeding Intensity in Aquaculture. *Journal of Marine Science and Engineering*, **12**, 1132. <https://doi.org/10.3390/jmse12071132>
- [59] Wei, Y., Ji, L. and An, D. (2025) Review on Quantitative Methods of Fish School Behaviors. *Reviews in Aquaculture*, **17**, e70023. <https://doi.org/10.1111/raq.70023>
- [60] Mysore Guruprasad, S., Bies, L., Ingale, M. and Werth, D. (2024) Fish Feeding Behavior Quantification and Automatic Acoustic Event Detection: Algorithmic Optimization with Deep Learning. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, **270**, 8075-8085. https://doi.org/10.3397/in_2024_4043
- [61] Du, Z., Cui, M., Wang, Q., Liu, X., Xu, X., Bai, Z., *et al.* (2023) Feeding Intensity Assessment of Aquaculture Fish Using Mel Spectrogram and Deep Learning Algorithms. *Aquacultural Engineering*, **102**, Article 102345. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2023.102345>
- [62] Wang, H., Wang, M., He, Z., Han, A., Long, J., Wu, J., *et al.* (2025) Collaborative Learning of Multimodal Fusion and Audio-Guided Attention for Fish Feeding Behavior Analysis in Aquafarm. *Aquaculture International*, **33**, Article No. 463. <https://doi.org/10.1007/s10499-025-02150-1>
- [63] Li, S., Yang, X., Huang, Z., Fu, T., Ma, P., Feng, D., *et al.* (2025) RC-UMT: Multimodal Fish Feeding Intensity Classification Network with Enhanced Feature Extraction Capability in Aquaculture. *Aquacultural Engineering*, **112**, Article 102639. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2025.102639>
- [64] Zhang, S.L., Yao, M.Y., Zhao, J.Y., Liu, X. and Wang, H. (2025) Progressive Multimodal Interaction Network for Reliable Quantification of Fish Feeding Intensity in Aquaculture. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.14170>
- [65] Yang, C., Yang, X., Zhu, K. and Zhou, C. (2023) Fish Feeding Behavior Recognition Using Adaptive DMCA-UMT Algorithm. *Journal of Beijing Institute of Technology*, **32**, 285-297. <https://doi.org/10.15918/j.jbit1004-0579.2023.008>