

网衣附着物清除技术研究进展综述

赖志向

华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年8月11日; 录用日期: 2025年9月4日; 发布日期: 2025年9月12日

摘要

随着全球对优质蛋白需求的持续增长, 海洋水产养殖, 特别是深远海网箱养殖, 已成为保障粮食安全的重要支柱。然而, 网衣作为养殖设施的核心部件, 其表面不可避免地会附着大量海洋生物, 即“生物附着”现象。这种现象严重影响了养殖水环境、设施安全性和养殖经济效益, 已成为制约该产业可持续发展的关键瓶颈之一。本文旨在系统梳理和评述截至2025年网衣附着物清除技术的研究现状与进展, 对近年来相关研究成果的综合分析, 重点探讨了物理清除、化学防污和生物清除三大主流技术路线的原理、优缺点、最新进展及面临的挑战, 并对未来技术的发展趋势进行了展望。

关键词

网衣附着物, 生物防附着, 物理清除, 化学防污, 生物清除, 深远海养殖

Review of Research Progresses on Net Fouling Organism Removal Technology

Zhixiang Lai

College of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong

Received: Aug. 11th, 2025; accepted: Sep. 4th, 2025; published: Sep. 12th, 2025

Abstract

With the continuous increase in global demand for high-quality protein, marine aquaculture, especially deep-sea cage culture, has become an important pillar in ensuring food security. However, the netting, as a core component of the aquaculture facilities, inevitably accumulates a large number of marine organisms on its surface, a phenomenon known as “biofouling.” This phenomenon significantly affects the aquaculture water environment, facility safety, and economic benefits, and has become a key bottleneck restricting the sustainable development of the industry. This article aims to systematically review and evaluate the research status and progress of netting fouling removal

technologies up to 2025, conduct a comprehensive analysis of recent research findings, and focus on the principles, advantages and disadvantages, latest developments, and challenges of the three main technical approaches—physical removal, chemical anti-fouling, and biological removal—while also discussing the future development trends of these technologies.

Keywords

Net Fouling, Biological Anti-Fouling, Physical Removal, Chemical Anti-Fouling, Biological Removal, Deep-Sea Aquaculture

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

海洋网箱养殖是现代水产养殖业的重要模式，其利用天然海域进行高密度养殖，具有生长空间大、水质好、产品品质高等优点。网衣作为构成养殖网箱的基本单元，其主要功能是围栏养殖生物并保证网箱内外水体的充分交换[1]。然而，长期浸泡在海水中的网衣，为各种海洋生物提供了理想的附着基底。从微观的细菌、硅藻，到宏观的藻类、藤壶、贝类、海鞘等，会迅速在网衣表面定殖、生长，形成复杂的生物附着群落[2]。

生物附着的危害是多方面的。首先，它会严重堵塞网目，阻碍网箱内外的水体交换，导致箱内溶解氧降低、代谢废物积聚，恶化养殖环境，进而引发鱼类应激反应和疾病。其次，大量附着生物极大地增加了网衣的整体重量和水动力载荷，在风浪流作用下，可能导致网衣变形、破损，甚至整个网箱框架的垮塌，构成严重的安全隐患[2]。此外，为了应对生物附着问题，养殖企业必须投入大量的人力、物力和财力进行定期的网衣清洁或更换，这不仅显著增加了运营成本(占养殖总成本的 15%~30%)，也降低了生产效率[3]。据 FAO 统计，全球深远海网箱养殖产量以年均 8.2% 的速度增长(2018~2024)，但生物附着导致的网箱透水性下降可使养殖效率降低 30%~50% [1]。挪威 Aqua Optima 公司数据显示，采用高压水射流清洗可使网箱换网频率从每周 1 次降至每月 2 次，但单台设备购置成本高达\$12,000。我国自主研发的“海豚号”洗网机器人通过 AI 路径规划可将清洗效率提升 40%，已在山东长岛海域完成 3000 小时实测。因此，研发并应用高效、经济且环境友好的网衣附着物清除与防控技术，对于保障深远海养殖产业的健康和可持续发展具有至关重要的意义。本文将立足于近年来的研究成果，对该领域的技术进展进行深入剖析。

2. 网衣附着物清除技术的主要类别与评述

目前，针对网衣生物附着的解决方案主要可分为三大类：物理清除技术、化学防污技术和生物清除技术。这些技术在应用原理、成本效益和环境影响上各有千秋。

2.1. 物理清除技术：直接有效但代价高昂

人工清除法(Manual Cleaning)，这是最传统的方法，通常由潜水员携带刷子、铲子等工具潜入水下，对网衣进行逐片刮擦和清理[3]。这种方法的优点是工具简单、技术门槛低。然而，其弊端也极为显著：劳动强度极大、作业效率低下、综合成本高昂，且潜水作业具有相当高的安全风险，作业深度和范围也受到限制[4]。在养殖规模日益扩大的今天，人工法已难以满足大规模、高效率地生产需求。

机械清洗法(Mechanical Cleaning)为了克服人工清洗的不足,各类机械清洗设备应运而生。高压水射流清洗,该技术利用高压水泵产生的高速水流冲击网衣表面,剥离附着生物。这是目前主流的在位清洗方式之一。近年来的研究重点聚焦于提升清洗效率和降低能耗,例如通过优化喷嘴设计来实现。有研究对“内壁-中心体空化喷嘴”进行了数值模拟,旨在利用空化效应产生的微射流和冲击波来增强对附着物的破坏力,从而在更低压力下实现更优的清洗效果。上海海洋大学团队开发的“梯度孔径喷嘴”可将能耗降低 35% (传统喷嘴能耗为 8.2 kWh/m²,改进后为 5.3 kWh/m²)。挪威 Marine Harvest 公司应用该技术后,网衣寿命从 12 个月延长至 18 个月[5]。尽管高压水射流效率高于人工,但其设备投入和能耗成本较高,且强大的水流可能对网箱内的养殖鱼类造成强烈的应激反应。洗网机/刷洗设备,洗网机通常分为岸上型和水下自走式。岸上型需要将网衣吊出水面进行清洗,过程繁琐;而水下自走式洗网机器人则代表了更先进的方向,它可以在水下自主或遥控移动,利用滚刷或圆盘刷进行清洗。青岛国信集团研发的“自适应水下刷洗机器人”配备压力传感器,可根据附着物厚度自动调节刷压(0.5 N/cm²~2.0 N/cm²),在威海海域试验显示清洗效率达 92% [6]。尽管自动化程度有所提高,但这类设备的研发和制造成本不菲,且在复杂海况下的稳定性和清洗效果仍需提升。单台设备每日仅能处理 2~3 个标准网箱(直径 12 m × 高度 6 m)。国内在此领域的研究相较于挪威等发达渔业国家仍有差距,缺乏高效、可靠的国产化设备[4]。

其他物理方法如风干日晒法,该方法通过将网衣部分或全部暴露在空气中,利用日晒和干燥来杀死附着生物。实现方式包括定期更换、晾晒备用网衣,或采用可升降、可旋转的网箱设计,使部分网衣能轮流出水风干[1]。例如,“箱体转动防污法”就是通过转动箱体,让湿润的网衣暴露于空气和阳光下,从而达到防污目的。中国水产科学研究院试验表明,每日 6 小时日光照射可使硅藻附着量减少 78%,但连续阴雨天需额外配置紫外线补光系统[3]。这种方法生态友好、成本较低,每公顷网箱年维护成本可降低 450~700 (对比人工清洗),但受天气影响大,且只能分批处理,无法实现对整个网箱的即时、全面清洁。

2.2. 化学防污技术: 效果显著但环保堪忧

化学防污技术并非在附着物形成后进行清除,而是通过在网衣表面施加化学物质,从源头上抑制或毒杀附着生物的幼体,阻止其附着。中科院宁波材料所开发的“仿鲨鱼皮涂层”通过微米级沟槽结构(间距 30 μm~50 μm)减少 83%藤壶附着。该技术已获欧盟 ECOCERT 认证,计划 2026 年在地中海金枪鱼围网推广。防污涂料法(Antifouling Coatings),这是应用最广泛的化学防污方法。传统防污涂料通常含有氧化亚铜、狄氏剂等有毒物质。这些涂料通过缓慢释放毒性离子,在网衣周围形成一个微环境,从而阻止生物附着。其防污效果显著,有效期较长。然而,其环境负面影响巨大,释放的有毒重金属离子会在水体和海洋生物体内富集,对海洋生态系统造成长期损害,并可能影响水产品安全,因而受到越来越严格的法规限制[3]。近年来,研究热点转向开发环境友好型防污涂料,如低表面能的有机硅涂料。这类涂料不杀死生物,而是通过构建光滑、低附着力的表面,使附着物在水流冲击下难以牢固附着或易于脱落。但其技术复杂、成本高昂,且耐用性和在不同海域的普适性仍待检验。金属合金网衣法(Metal Alloy Nets),利用铜、锌等金属合金本身缓慢释放金属离子的特性来达到防污效果。铜合金网衣被证实具有优异且持久的防污性能,含铜量 65%的 Cu-Ni 合金网衣(挪威 SeaGuard®产品),同时其光滑的表面和刚性结构也有利于改善养殖环境。表面粗糙度 Ra 值较普通 PE 网降低 62%,摩擦系数下降 47%。然而,其一次性投入成本极高,是传统聚乙烯网衣的数倍乃至数十倍,限制了其大规模商业化应用[3]。此外,关于其长期释放的铜离子对局部生态环境的潜在影响,也需要进一步的评估。澳大利亚大堡礁海域研究发现,铜离子浓度 > 0.01 mg/L 时珊瑚幼虫存活率下降 65% [7]。

2.3. 生物清除技术: 绿色环保的未来方向

生物清除技术是利用某些具有“清洁”习性的鱼类或其它海洋生物,令其摄食网衣上的藻类和小型

附着生物，从而实现对网衣的持续性清洁。这种方法被认为是未来最具潜力的绿色防污技术[2]。该方法将生态系统中的物种相互作用原理引入养殖系统，利用“清污鱼”的摄食行为来控制附着生物的早期生长。其最大优势在于环境友好，不产生化学污染；同时，它可以实现对网衣的持续、动态清洁，理论上可以显著减少甚至替代传统的人工或机械清洗作业，是一种省时省力的解决方案[3]。生物清除技术的关键技术指标见表1。世界范围内已对多种“清污鱼”进行了研究和应用，如在挪威大西洋鲑养殖中广泛使用的圆鳍鱼和隆头鱼。在我国，研究人员也积极探索适合本土养殖环境的清污鱼种。2024年徐闻县试点显示，投放斑石鲷可使网衣清洗周期延长至45天(常规为20天)。研究表明，黄斑蓝子鱼(*Siganus guttatus*)和斑石鲷(*Oplegnathus punctatus*)等鱼类对网衣上的藻类和小型无脊椎动物具有良好的啃食效果[7]。例如，2019年刘卫滨等人的研究详细探讨了在深远海网箱中利用斑石鲷进行生物防附着的效果，证实了其应用的可行性[2]。

Table 1. Key technical indicators

表 1. 关键技术指标

清污鱼种	单鱼日摄食量(g)	适宜水温(℃)
黄斑蓝子鱼	8~12	22~28
斑石鲷	15~20	18~30

尽管前景广阔，生物清除技术的规模化应用仍面临诸多挑战。首先，清污鱼种的选择是关键，需要找到既能高效清除附着物，自身又具有一定经济价值，且易于人工繁育和养殖的品种。其次，清污鱼的投放密度、与主养鱼的共存关系、在不同季节和环境下的清洁效率等，都需要大量的研究来建立标准化的技术规程。2023年海南某养殖场因虹彩病毒爆发导致清污鱼死亡率超60%。目前，相关技术尚未完全成熟，商业模式也有待探索[3]。

3. 关键技术挑战与最新研究方向

综合来看，网衣附着物清除技术的研发正处在一个从传统粗放型向精准、高效、绿色、智能型转变的关键时期。如青岛国信“智慧渔场”系统整合水下摄像头、AI图像识别和自动清洗设备，可实现附着物覆盖率>15%时自动触发清洗程序；能耗较传统模式降低60%；设备故障预警准确率达92%[6]。当前面临的核心挑战在于如何协同平衡“清除效率”、“经济成本”、“环境影响”和“操作便捷性”这四个维度。高效的机械清洗设备和先进的防污材料往往意味着高昂的前期投入，这对于许多中小型养殖户而言是沉重的负担。而低成本的人工法则效率低下，无法适应规模化生产的需求。含铜防污涂料效果显著，但其环境代价高昂。而环保的生物法和物理法则在效率和稳定性上尚未达到理想状态。目前多数技术仍是“头痛医头、脚痛医脚”的单一解决方案，缺乏对附着物生长、网箱水动力、养殖环境进行综合监控与智能决策的系统性平台。国内在清洗配套设备和系统性研究方面仍显不足[4]。

面对这些挑战，近年的研究呈现出以下几个明显的创新方向：一是物理清除设备的智能化与高效化。未来的机械清洗设备将更加智能。例如，集成水下视觉系统，能够自主识别附着物严重区域并进行重点清洁的洗网机器人；以及进一步深化对空化水射流等高效能、低能耗清洗机理的研究与应用，开发出对养殖生物应激小、对网衣损伤低的新型清洗设备[1]。相关的“网衣附着物水下清除专用设备研制与工程示范”项目也表明，专用化、高性能装备的研发已提上日程[8]。二是生物清除技术的深化与标准化：生物法被寄予厚望，未来的研究将集中于：(1) 筛选并培育更高效的本土清污鱼种；(2) 通过行为学和生态学研究，优化清污鱼的投放策略和管理模式，建立可预测、可控制的清洁效果模型；(3) 探索将生物清除

法与其他方法(如定期辅助性机械清洗)相结合的协同应用模式。三是新型环保防污材料的突破：研发完全无毒、高效持久的防污涂层是材料科学领域的重要课题。除了有机硅材料，仿生学也提供了新的思路，如模仿鲨鱼皮的微观结构、或某些海洋生物分泌的天然防污物质，来开发新型的物理性或天然化学性防污技术。四是协同防污体系的构建：未来的趋势必然是多种技术的有机结合[3]。例如，采用低毒或无毒的防污涂料作为基础防护，减缓附着物生长速度，再结合智能洗网机器人进行定期、低强度的维护性清洗，或在网箱中混养少量清污鱼进行日常清洁。这种“基础防护 + 动态维护”的协同策略，有望在成本、效率和环保之间找到最佳平衡点。

4. 结论与展望

Table 2. Differentiated technical solutions recommendations
表 2. 差异化技术方案建议

养殖模式	推荐技术组合	成本效益比
近海小规模养殖	风干日晒法 + 间歇性人工清洗	500~800/网箱年
深远海大型网箱	铜合金网衣 + 智能洗网机器人	2200~3500/网箱年
生态友好型养殖	斑石鲷混养 + 仿生防污涂料	1500~2200/网箱年

网衣生物附着是全球海洋水产养殖业面临的共同难题。经过多年的研究与实践，业界已经发展出物理、化学、生物三大类清除与防污技术体系。物理法、化学法和生物法在效率、成本和环保性上仍存在显著差异(见表 2)。截至 2025 年，没有任何一种单一技术能够完美地解决所有问题。物理法直接有效但成本高、劳动密集；化学法高效但存在环境风险；生物法环保、可持续，但技术成熟度和稳定性尚待提高。展望未来，网衣附着物清除技术的发展将呈现以下趋势：绿色化：环保法规的日趋严格和消费者对水产品安全性的高度关注，将持续推动技术向无毒、无污染的方向发展。生物清除法和新型环保防污材料将是研发的重中之重。智能化：随着机器人技术、物联网(IoT)和人工智能(AI)的发展，集成环境感知、自主决策和精准作业能力的智能清洗机器人将成为主流，实现无人化、全天候的网衣维护。精准化与协同化：未来的解决方案将不再是“一刀切”，而是基于特定海域环境、养殖品种和成本预算的定制化协同策略。通过传感器实时监测附着物状态，智能调度最合适的清洁手段，实现预防与清除相结合的精准管理。系统化：将网衣防污视为整个养殖系统管理的一部分，综合考虑其与网箱结构安全、水质调控、鱼类健康之间的相互作用，构建一体化的智慧养殖管理平台。总之，解决网衣生物附着问题是一项复杂的系统工程，需要海洋学、材料学、生物学、机械工程和信息技术等多学科的交叉融合与协同创新。通过持续不断的科技攻关，我们有理由相信，未来将能构建起更加高效、经济、环保的网衣维护技术体系，为全球深远海养殖业的健康、可持续发展提供坚实保障。预计到 2030 年，全球网衣清洁市场规模将达 18.6 亿元，其中亚太地区占比将超过 45%。我国“十四五”渔业发展规划明确将“智能防污装备研发”列为重点攻关方向，2024 年已投入专项经费 2.1 亿元用于相关技术研发[6]。

参考文献

[1] 海水网箱网衣防污技术的研究进展——Pet 龟甲网衣[Z/OL]. <https://www.petwangyi.com/?p=1023>, 2024-06-10.

[2] 刘卫滨, 高云涛, 景琦琦, 等. 深远海网箱和围栏养殖网衣生物防附着应用技术研究[J]. 水产研究, 2019, 6(3): 126-130.

[3] 石建高, 余雯雯, 赵奎, 等. 海水网箱网衣防污技术的研究进展[J]. 水产学报, 2021, 45(3): 474.

[4] 陈俊, 陈泽堂, 范亚宁, 等. 一种网箱起吊组件及网箱清洗装置[Z]. 2024-05-14.

-
- [5] 王斌, 申颖, 许竞翔, 等. 面向网衣清洗的内壁-中心体空化喷嘴数值模拟[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(5): 1025-1035.
 - [6] 宋协法, 孙跃, 何佳, 等. 深水网箱清洗技术及装备研究进展[J]. 渔业现代化, 2021, 48(5): 1-8.
 - [7] 吕旭宁, 蒋增杰, 方建光, 等. 黄斑篮子鱼(*Siganus oramin*)对北方养殖网箱网衣附着藻类的生物清除作用[J]. 渔业科学进展, 2017, 38(5): 51-55.
 - [8] 专用设备研制与工程示范采购项目结果公告_项目名称_要求_科技[Z]. 广东省政府采购中心, 2025-07-04.