

Lü Y, Zhao F, Xiang K, *et al.* Research progress on biofilm carrier materials in aquaculture wastewater treatment [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(6): 062618. [吕洋, 赵峰, 向坤, 等. 水产养殖尾水处理中生物膜载体材料的研究进展 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(6): 062618.]

综述

水产养殖尾水处理中生物膜载体材料的研究进展

吕洋¹ 赵峰² 向坤^{1,3} 孙浩峰¹ 田晔¹ 韩志英¹ 叶章颖¹

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 山东锦鸿生态科技有限公司, 枣庄 277000;

3. 青岛蓝谷鲲鹏海洋科技有限公司, 青岛 266000)

摘要: 随着水产养殖向高密度和集约化发展, 养殖尾水中氨氮、硝酸盐氮及有机物累积问题日益突出。生物膜法因运行稳定、耐冲击负荷和能耗低等优势, 成为水产养殖尾水处理的重要技术, 其中生物膜载体材料在微生物附着、生物膜稳定性及净水效率中起关键作用。本文系统综述了水产养殖用生物膜载体材料的研究进展, 重点比较无机类、有机高分子类、生物基类及复合类载体在结构特征、工程适配性和污染物去除性能方面的差异, 并总结不同载体在氨氮、硝酸盐氮、化学需氧量及总氮去除方面的典型表现。在此基础上, 分析了涂覆、接枝和刻蚀等表面改性策略在提升亲水性、增强微生物定殖和抗剪切稳定性方面的作用机制。最后, 结合水产养殖尾水水量大、负荷波动强和长期运行的工程特点, 展望生物膜载体材料在多尺度结构设计、协同改性及低成本规模化应用方面的发展方向, 为高效、稳定的养殖尾水处理提供参考。

关键词: 水产养殖; 生物膜载体; 无机材料; 高分子材料; 复合材料; 表面改性

中图分类号: S959 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2026)06-062618-16

doi: 10.3724/1000-3207.2026.2025.0422 **CSTR:** 32229.14.SSSWXB.2025.0422



随着全球水产养殖业的快速发展, 养殖密度和生产强度不断提高, 特别是工厂化循环水养殖(RAS)、高位池养殖和深水网箱等集约化模式的普及, 使单位水体中饲料投喂量、代谢强度和生物量大幅增加, 随之带来的水环境污染问题日益突出^[1,2]。与市政或工业废水相比, 水产养殖尾水中富含未被摄食的饲料残渣、代谢产物和悬浮物(SS), 通常含有高浓度的氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、亚硝酸盐(NO_2^-)、磷酸盐(PO_4^{3-})及有机物(表1)。这些污染物排入自然水体后, 可引起富营养化、水华暴发以及底质恶化等一系列生态风险, 进而影响水生态系统平衡与养殖动物健康^[5-7]。此外, 投喂行为的昼夜节律、天气变化和换水操作常造成水质在短时间内急剧波动, 使

尾水处理过程必须兼顾负荷冲击与稳定性要求。

在众多水质净化技术中, 生物膜法因其处理效率高、运行稳定、能耗低而受到广泛关注。生物膜法是通过微生物在固体载体表面附着形成稳定的菌膜体系, 在好氧、缺氧或厌氧条件下实现有机物降解、氨氮硝化与反硝化转化的过程^[8,9]。与传统活性污泥法相比, 生物膜系统能够在更高的水力负荷条件下保持菌群稳定, 并因微生物附着生长而减少生物量流失, 具有污泥产量低、耐冲击负荷能力强、维护简便等优势^[10-12]。这一特性使生物膜系统尤为适合应对水产养殖尾水中水量大、浓度低、波动快的水质特点。生物膜系统的核心在于生物膜载体为微生物提供附着与保护空间, 微生物

收稿日期: 2025-12-20; **修订日期:** 2026-03-04

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD2001700); 国家现代农业产业技术体系专项——国家大宗淡水鱼产业技术体系项目(CARS45-24)资助 [Supported by the National Key R & D Program of China (2022YFD2001700); the National Modern Agriculture Industrial Technology System Special Project-the National Technology System for Conventional Freshwater Fish Industries (CARS45-24)]

作者简介: 吕洋(1998—), 男, 博士; 主要研究方向为设施水产养殖。E-mail: yanglyu@zju.edu.cn

通信作者: 叶章颖(1982—), 男, 教授; 主要研究方向为设施水产养殖。E-mail: yzyzju@zju.edu.cn

则完成氮磷循环与有机物降解,两者共同决定系统的净化效率和生态稳定性^[13-16]。

生物膜载体材料是生物膜技术的关键,其物理结构、表面性质、力学特性等性能直接影响微生物的附着、生长及污染物去除效果。理想的载体应具备较大的比表面积、良好的亲水性、生物相容性和力学稳定性,从而为微生物提供稳定的栖息与代谢空间并促进底物扩散与传输^[17,18]。近年来,为满足水产养殖废水处理需求,不同类型的生物膜载体材料被开发并应用,包括传统使用的无机材料、各类人工合成高分子材料、新型可生物降解的生物基材料,以及结合多种材料优势的复合材料等。

本文将按材料类型对水产养殖用生物膜载体的研究进展进行综述,分析各类材料的性能及应用效果,并介绍表面改性、功能组分引入等优化策略,以提升载体的挂膜性能、协同脱氮能力与耐冲击能力。最后探讨当前存在的问题并展望未来发展方向,为水产养殖尾水处理中生物膜载体材料的选择与新型高效载体开发提供理论参考(图1)。

1 生物膜载体材料分类

1.1 无机类载体材料

无机载体包括沸石、陶粒及活性炭等材料,是最早应用于水产养殖生物滤池的填料类型,在池塘养殖、工厂化车间与海水净化系统中均具有长期实践基础。这类载体通常具备结构稳定、耐生物和化学腐蚀等优点,成本低且易得,非常适合水产养殖尾水这种水量大、连续排放、污染物浓度中低但总负荷高的工况条件^[19]。

例如,沸石是一种多孔的铝硅酸盐矿物,晶格带负电荷,可有效吸附水中阳离子,在海水与淡水养殖尾水中均表现出良好的氨氮负荷缓冲能力。天然沸石价格低廉且来源广泛,在养殖废水和污水处理中被广泛应用^[20]。陶粒是一种人造烧结陶

质颗粒,内部孔隙丰富、机械强度高、耐酸碱与微生物侵蚀、长期运行稳定,已在生物滤池等水处理单元广泛运用^[21]。此外,活性炭亦可作为生物膜载体使用。活性炭具有发达的微孔和中孔结构,一方面能吸附水中有机污染物和有毒物质,降低底物浓度;另一方面其表面附着的微生物膜可以进一步降解污染物,从而实现较高的净化效率^[22,23]。研究表明,颗粒或生物活性炭滤层的多孔孔隙为污染物提供吸附位点,有利于附着生长的微生物膜维持代谢活性。在活性炭与液体的接触界面上,污染物通过吸附与生物降解呈协同耦合而被持续去除,同时缓冲水质波动与毒性胁迫、保持硝化菌与降解菌等功能群的活性与多样性,并支撑长期稳定运行^[24,25]。

从微生物定殖的角度来看,无机类载体材料粗糙峰谷和孔道可以提供大量微生物的附着位点并降低剪切脱落风险,提升早期黏附成功率。表面电荷与润湿性通过DLVO理论^[26]和酸碱相互作用调控细胞贴附与胞外聚合物(EPS)桥联,从而决定生物膜的致密度与扩散阻力。与此同时,沸石等无机相对 NH_4^+ 的离子交换富集会在近壁面形成稳定的氨氮边界层,使外层更易富集氨氧化细菌(AOB)并维持硝化通量。当膜厚与孔内扩散造成氧限制时,内部形成缺氧微区,促进外层硝化与内层反硝化或异化硝酸盐还原为铵(DNRA)并存的空间分工,成为同步硝化反硝化的结构基础^[27]。

然而,无机载体在负荷与水质波动频繁的水产养殖工况下,其局限性易显现。其颗粒密度较大,会抬升流化床最小流化速度 U_{mf} 并增加维持流化所

表1 我国海水养殖尾水典型指标浓度范围

Tab. 1 Typical concentration ranges of effluent indicators from marine aquaculture in China

典型指标 Typical index	海水养殖尾水 浓度范围 Concentration range (mg/L)	《海水池塘水 排放要求》 (SC/T 9103- 2007) I类 (mg/L)	《海水池塘水 排放要求》 (SC/T 9103- 2007) II类 (mg/L)
化学需氧量 COD	13.97±10.69	≤15	≤25
总氮TN	5.26±7.40	≤3.0	≤5.0
总磷TP	0.44±0.42	≤0.5	≤1.0
悬浮物SS	37.03±30.76	≤50	≤100
参考文献 Reference	[3]	[4]	[4]

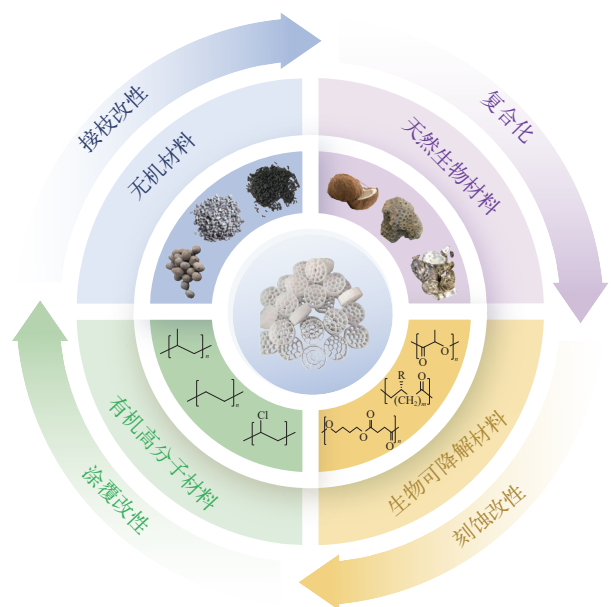


图1 图文摘要

Fig. 1 Graphical abstract

需水/气动力, 导致运行能耗上升^[28]。孔道受骨架结构约束, 有效比表面积与孔隙连通性不足, 难以构建高分子载体那样的三维微环境, 传质与微生物承载能力因此受限^[29]。在高悬浮固体与胶体条件下, 孔道与表面易沉积堵塞并引起压降增加, 需依赖反冲洗等维护措施^[30]。同时, 由于表面相对光滑且官能团不足, 其在低温、高盐度或氨氮冲击下的初期定殖往往更慢, 启动周期被拉长并表现出更强的条件敏感性^[31]。此外, 沸石类无机材料长期运行还可能发生离子释放, 带来潜在二次污染隐患^[32]。常见无机生物膜载体材料的性能如表 2 所示。

由表 2 可知, 从沸石、陶粒到活性炭, 堆积密度通常下降而比表面积显著上升, 对应的挂膜时间往往随可利用表面积与微孔粗糙结构增强而缩短, 即活性炭通常能更快形成并维持较高生物量的生物膜, 但其更快的挂膜速度高度依赖于孔结构能否被微生物与基质有效利用。相比之下, 沸石与陶粒虽比表面积较低、堆积密度较高, 但凭借更高的机械稳定性与更可控的孔道和外表面形貌, 往往在高负荷、强扰动工况下表现出更好的运行鲁棒性。

总体而言, 无机载体材料在水产养殖废水处理中发挥了重要作用, 但其传质与挂膜性能仍有待通过载体材料改性和生物膜法废水处理工艺参数优化得到进一步提高, 以适应高密度、易波动的现代水产养殖体系需求。

1.2 有机高分子类载体材料

有机高分子载体材料主要是各种合成塑料及橡胶类制品, 在水产养殖特别是RAS和高密度工厂化养殖中应用极为广泛。相比无机材料, 这类载体密度低、质地轻, 可在水体中实现良好的悬浮性, 且具备优异的加工可塑性, 可制成中空球、网状片、波纹管等多种几何形状, 以显著提升比表面积并增强微生物附着空间^[41, 42]。这些特性使其非常适合水产养殖尾水中大水量、连续运行、高流速冲刷、负荷波动大的工况要求。

常见的有机高分子载体包括聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、聚氨酯(PU)和聚氯乙烯(PVC)等。其中, PP和PE因其化学稳定性强、抗水解和抗腐蚀性能好、成本低廉, 被广泛用于移动床生物膜反应器

(MBBR), 尤其适合海水和淡水RAS中氨氮负荷偏高的硝化单元。近年来, 将再生/回收塑料(多为PP和PE)加工为高比表面积载体, 成为一种可行且低成本的替代方案, 已被证明在养殖尾水条件下具备良好的挂膜与净化性能^[43—45]。PU泡沫因其三维连通孔结构与弹性, 可作为理想的生物膜载体。多项近年研究在好氧(或兼氧、厌氧)生物膜法废水处理体系中观察到PU介质上快速挂膜并充填孔隙, 并伴随化学需氧量(COD)的降低与脱氮性能的提升, 特别适合处理尾水中含量波动较大的可生化有机物^[46]。此外, PVC材料常用于构建固定或悬挂式生物膜载体填料, 以PVC材料为载体的厌氧生物滤池, 与厌氧折流板反应器相比, 可提高生物量滞留能力并提升有机负荷去除率^[47]。

从微生物定殖的角度分析, 由于有机高分子类载体材料的表面能低、化学惰性强且偏疏水, 初始定殖更依赖水体中蛋白质与腐殖质形成的调理膜以及随后EPS自组织, 而不是直接化学吸附, 因此其启动期对润湿性和表面电性更为敏感。当通过表面改性策略引入亲水或带电基团后, 细胞与载体的黏附能提高, 碰撞后有效附着概率上升, 挂膜启动显著加快。与无机类载体材料类似, 在运行期, 有机高分子的几何结构决定了氧与底物的穿透深度, 载体外层形成硝化主导区, 内层形成缺氧反硝化区, 从而把代谢路径从单一硝化推向更稳定的同步硝化反硝化过程^[48]。

然而, 有机高分子载体材料在使用过程中也暴露出不足之处。首先, 这类材料的表面通常光滑且疏水, 微生物在其初始阶段的黏附困难, 导致挂膜启动期较长、生物膜堆积量偏低。研究表明, 在固定床生物膜反应器中, 相对疏水的PP、PVC等载体比亲水材料表现出更慢的微生物附着速率和较差的稳定性^[49]。其次, 有机高分子载体表面的疏水特性会限制营养物质与水体底物向生物膜内部的传输, 从而可能阻碍后续的微生物代谢反应, 从而降低硝化、反硝化与有机物降解效率^[50]。此外, 有机高分子材料在长期浸泡、高盐度、曝气冲击与微生物侵蚀条件下易发生老化与生物侵蚀, 并可能释放微塑料颗粒与添加剂。相关研究表明, 聚烯烃、

表 2 常见无机类生物膜载体材料的性能

Tab. 2 The properties of traditional inorganic carriers for biofilm

材料类型 Materials type	堆积密度 Stacking density (g/cm ³)	比表面积 Specific surface area (m ² /g)	挂膜时间 Membrane-forming time (d)	应用实例 Application example
沸石Zeolite	~0.83 ^[33]	~40 ^[33]	33 ^[36]	氨氮吸附与硝化载体, 常用于养殖尾水生物滤池 ^[38]
陶粒Ceramsite	0.78 ^[34]	5.54 ^[34]	33 ^[36]	替代砂石作生物滤池填料, 提高稳定性 ^[39]
颗粒活性炭GAC	0.44—0.50 ^[35]	900—1100 ^[35]	15 ^[37]	去除有机物与毒性物, 用于精养系统水处理 ^[40]

PVC等塑料可浸出多种增塑剂、稳定剂等化学物质,具有潜在水生毒性。微塑料携带的生物膜还可能影响微生物群落和病原残留。特别是在尾水中含有溶解性有机物、药物残留或重金属的情况下,老化载体的浸出效应会进一步增加系统的溶解性有机物负荷,带来二次污染风险^[51, 52]。最后,当这些有机高分子载体来自废旧塑料循环再利用时,其成分复杂、老化速率快、稳定性差,增加了养殖系统的运行风险及后期处置难度^[53]。常见的有机高分子生物膜载体材料的性能如表3所示。

由表3可知,PP和PE载体堆积密度最低,但单位体积比表面积达到600 m²/m³量级,系统启动进入稳定工况通常为2周左右。PU海绵类载体虽然同样低密度,但由于本体结构多孔,其体积比表面积可跃升至约9.4×10⁴ m²/m³,往往表现为更快的生物膜增长与更短的趋稳周期。PVC载体堆积密度显著更高,体积比表面积高于PP和PE,但远低于PU的比表面积水平,挂膜可在1周内完成,并且由于其高密度的特性往往需要更高的维持流化能耗与更强的水力条件依赖。总之,若以快速挂膜和高生物量承载为目标,PU通常优于PP和PE,PVC则处于面积与挂膜速度中等,但运行能耗和水力要求更高的折中位置。

综上所述,有机高分子类载体材料凭借其加工灵活性、力学稳定性及可扩展性,仍将在水产养殖尾水处理中占据主导地位。通过持续的表面改性、功能化设计与材料升级,可更好地满足现代水产养殖对高效、耐冲击、生态友好型生物膜填料的需求。

1.3 生物基类载体材料

生物基载体材料是指源自生物资源、可被微生物或环境条件降解的载体类型,包括天然材料和生物可降解高分子两大类。与传统有机高分子载体不同,生物基载体在服役结束后能够通过水解或生物降解转化为无害产物,因而可显著减少塑料载体老化后所带来的微塑料污染风险。随着绿色养殖与低碳渔业的发展,生物基载体凭借其可持续性、生态友好性和可资源化潜力受到广泛关注,并

被视为符合水产养殖尾水处理未来方向的关键材料之一。

天然生物材料 天然生物材料如椰壳、碎竹片、木屑、秸秆、牡蛎壳、珊瑚石等,由天然植物组织或生物矿物构成,早期已被尝试作为生物滤池介质。该类材料多具有粗糙、多孔、亲水性较高的天然界面,可促进菌群在其表面快速定殖。

例如,椰壳和碎竹片富含一定可降解有机质,可供异养菌附着并同时缓释部分有机碳源,以提升低C/N条件下的反硝化效率。研究表明,椰壳、碎竹片等本地生物基填料在中试RAS生物滤池中能够形成稳定生物膜,并实现与传统高分子填料相当或更优的氨氮去除效果,同时具备较低成本与可持续利用优势^[58]。此外,经过碱处理和表面结构改性的秸秆和木屑可实现有机碳的可控释放,显著提升反硝化速率和硝酸盐去除效率,并在长期运行中保持良好的脱氮稳定性。海水养殖中常用的牡蛎壳、珊瑚石等富含碳酸钙的材料可以在生物膜系统内提供矿物质、维持局部pH缓冲能力,并促进硝化、反硝化功能菌的富集。陈小红等^[59]比较多种填料后发现,牡蛎壳等天然生物材料对氨氮去除有一定贡献,但其整体脱氮效率通常不及经工程化改性的合成填料。相比之下,珊瑚石因表面粗糙多孔、富含矿物质,可有效富集硝化与反硝化功能菌群,在海水养殖尾水生物滤池中表现出较优的TN去除潜力,被视为较理想的天然生物填料之一。

从微生物的定殖和代谢角度来看,由于其表面通常具备更复杂的微纹理与含氧官能团,天然生物类载体材料易形成稳定的调理膜并促进EPS锚定,因而表现为更快的早期定殖与更高的群落多样性。此外,许多天然有机载体会释出可利用有机碳,使载体从附着界面升级为缓释电子供体平台,这会显著强化异养反硝化过程并提升*nirS*、*nirK*和*nosZ*的基因丰度。此时,氮的转化路径不仅由进水C/N控制,还会被载体释碳动力学与膜内氧化还原分层强约束,形成外层硝化稳定、内层反硝化强化的结构功能耦合^[60]。若载体为牡蛎壳、珊瑚石等碳酸盐类天然载体,还会通过碱度缓释抵消硝化致酸,

表3 常见有机高分子类生物膜载体材料的性能

Tab. 3 The properties of traditional organic polymer carriers for biofilm

材料类型 Material type	堆积密度 Stacking density (g/cm ³)	比表面积 Specific surface area (m ² /m ³)	挂膜时间 Membrane-forming time (d)	应用实例 Application example
PP	0.050 ^[54]	620 ^[54]	14 ^[54]	MBBR常用填料 ^[57]
PE	0.025 ^[54]	600 ^[54]	14 ^[54]	用于工厂化循环水养殖系统的悬浮球或颗粒载体 ^[57]
PU	~0.016 ^[55]	~94011 ^[55]	5—10 ^[55]	生物海绵载体,用于中小型养殖尾水好氧处理系统 ^[57]
PVC	~0.870 ^[56]	1800 ^[56]	7 ^[56]	厌氧生物滤池波纹板载体,用于水质净化 ^[50]

间接稳定硝化与后续反硝化过程^[61]。

然而,天然生物基载体虽然来源广、成本低,但在工程应用中常面临结构稳定性差与性能波动。椰壳和竹片中的纤维与孔隙源于天然组织,孔径与强度不均,在较高流速或水力剪切下易磨损、崩塌或堵塞,导致挂膜层不稳定与运行维护频次增加。以木屑、秸秆等农林副产物作为生物膜载体时,也可同时作为固相碳源,为废水生物反硝化脱氮提供碳源,但这类材料存在因可溶性有机物淋滤引起的COD升高与水体浑浊风险。若废水处理工艺条件控制不当,作固相碳源且来自农林副产物的生物膜载体还可能产生较严重的温室气体排放,这种温室气体产生排放需通过废水C/N与生物反应器水力停留时间(HRT)的精细化调控加以抑制。牡蛎壳等贝壳类钙质载体在酸性或高酸负荷条件下易发生溶蚀,并形成污泥与结垢,同时带来碳酸盐体系扰动,对硝化菌和系统碳平衡的耦合调控提出更高要求^[62]。珊瑚石虽有利于维持海水pH与挂膜,但其获取与使用受限于现行资源与保护政策的约束,其来源与规范化处置需审慎评估。常见天然生物材料类载体材料的性能如表4所示。

由表4可知,椰壳类载体和活性炭类似,典型特征是比表面积显著最高、堆积密度处于中低水平,因此单位体积可提供最多的附着与传质微环境,通常更有利于快速形成高负荷生物膜。木屑属于轻质天然多孔介质,堆积密度最低、易形成较大孔隙,水力负荷较低,但其有效比表面积与表面官能团可利用性受粒径、含水率及预处理影响显著,导致挂膜时间波动区间往往更宽。牡蛎壳与珊瑚石则属于高密度钙质材料,比表面积通常为低至中等,但是在不少系统中表现为启动期较长、成熟后更稳定的特征。综合对比,如果以快速挂膜为优先,椰壳往往更占优势。若以低能耗、低密度为目标,木屑更为适合,但不确定性更高。若以长期运行鲁棒性为核心,牡蛎壳和珊瑚石载体材料更适合,但需要在水力条件与启动管理上投入更多优化。

总体而言,天然材料易得、价廉且生态友好,

但其性能受材料来源、形态与批次差异影响较大,稳定性与效率的兼顾仍依赖于表面改性、复合化或工况优化等后续处理。

生物可降解高分子材料 生物可降解高分子载体是另一类生物基材料,通常由可被微生物酶解、水解或环境条件降解的聚合物制成,包括生物基塑料和天然高分子衍生物等。典型代表有聚乳酸(PLA)、聚羟基脂肪酸酯(PHA)、聚丁二酸丁二醇酯(PBS)等生物塑料,以及壳聚糖(CS)、海藻酸盐(SA)等天然高分子材料。PLA具有良好的机械强度和透明性,而PHA由微生物在碳源过剩条件下合成,具备较强的生物降解性,可在淡水或海洋环境中被微生物分解^[75]。PBS是一种来源于可再生资源的脂肪族聚酯,兼具柔韧性与可降解性,可与其他聚合物共混以改善加工性^[76]。此外,CS和SA等天然多糖类材料因含有氨基、羧基等官能团,表现出优良的生物相容性和多孔结构,可为微生物附着与代谢提供理想的界面^[77]。

这类载体材料在运行过程中会发生水解与生物降解,表面随时间出现粗糙化、孔蚀与极性增强,后期黏附位点密度增加,生物膜机械嵌合增强^[78]。同时其降解释放的有机碳使其成为固相缓释电子供体,直接把代谢路径推向固相反硝化主导^[79]。在低C/N或不便外加碳源的养殖尾水处理中,这种机制可在不连续投加碳源的条件下维持反硝化通量,并通过膜内氧梯度形成同步硝化反硝化或分段脱氮。

然而,生物可降解高分子类生物膜载体材料的力学与结构稳定性较差,随着水解和生物降解的进行易发生软化、开裂或颗粒化,在曝气剪切与载体碰撞条件下难以长期维持形态完整。生物可降解高分子类生物膜载体降解与释碳速率受温度、pH、溶解氧、盐度及微生物群落结构等多种因素影响,常出现初期碳源快速释放而后期碳供给不足的现象,导致脱氮效率波动及溶解性有机物累积^[80-83]。另外,多数生物可降解高分子材料表面偏疏水,缺乏足够的极性官能团与表面粗糙度,不利于微生物

表4 常见天然生物材料类生物膜载体材料的性能

Tab. 4 The properties of traditional natural carriers for biofilm

材料类型 Material type	堆积密度 Stacking density (g/cm ³)	比表面积 Specific surface area (m ² /g)	挂膜时间 Membrane-forming time (d)	应用实例 Application example
椰壳Coconut shell	0.545 ^[63]	1050 ^[63]	15 ^[69]	用于生物接触氧化池、传统曝气生物滤池 ^[60]
木屑Wood chip	0.293 ^[64]	~1.09 ^[67]	14 ^[70]	用于低C/N海水或淡水养殖尾水反硝化反应器,作为碳源型载体 ^[72]
牡蛎壳Oyster shell	1.460 ^[65]	2.13 ^[65]	45 ^[71]	用于海水养殖尾水硝化生物滤池,提高氨氮去除率 ^[73]
珊瑚石Coral stone	1.219 ^[66]	4.95 ^[68]	46 ^[59]	用于大型海水净化系统中作为高效生物膜载体 ^[74]

初期黏附与稳态生物膜形成,不同材料如PLA与PHA在生物膜群落结构与附着行为上也表现出明显差异^[84]。此外,这些材料的加工窗口窄、热稳定性与耐久性有限,在高温、高湿或盐度变化环境下的降解行为更难预测,导致运维与更换成本上升^[85-87]。常见生物可降解高分子类生物膜载体材料的性能如表5所示。

由表5可知,PLA、PHA、PBS载体材料的堆积密度通常处于中等水平,而比表面积的高低主要由孔结构与表面粗糙度决定,多孔化或纤维化后可显著提升附着位点,从而更利于缩短挂膜启动期并提高单位体积生物量。其中PLA和PHA更容易通过纤维、泡沫或多孔支架获得较高比表面积,通常挂膜时间更短,PBS则更常以相对致密或共混颗粒形态出现,比表面积与挂膜速度更依赖工程化造孔与表面改性。

相比之下,CS、SA载体材料多以凝胶或涂覆基体的方式作为载体,其材料本体密度不一定低,但有效比表面积往往受凝胶网络与外扩散边界层控制,表现为易于初期快速黏附、形成生物膜,但在长期运行中可能因溶胀、力学强度与降解速率不足造成结构稳定性不足,导致挂膜后期的厚膜维持与抗冲刷能力弱于生物塑料骨架型载体。总体而言,若目标是长期稳定性与可控的水力/耐磨性能,PLA、PHA、PBS等骨架型生物塑料更具优势。若目标是快速启动、提升初期黏附性与生物相容性,则CS和SA更有优势,但通常需要通过复合增强或表面交联来弥补耐久性抗冲刷短板。

目前,生物可降解高分子材料制成的生物膜载体在水产养殖尾水处理中仍处于从实验室向中试规模过渡的阶段,但其具备有效避免废旧生物载体二次污染的突出优点,使其成为生物膜载体研究的重要发展方向。总体而言,生物基类载体材料具备环境友好和功能灵活的优势,但其机械强度和稳定性相对较低,降解速率难以精确控制,应结合养殖尾水的水力条件、盐度环境与负荷波动,合理选择材料类型与载体结构。

1.4 复合类载体材料

复合材料载体是指通过物理或化学方法将两种及以上材料结合形成的生物膜载体,旨在发挥各组分材料的协同效应,弥补单一材料在比表面积、表面特性、力学稳定性或功能性方面的缺陷。这类载体的设计思路包括无机与有机材料复合、不同高分子材料共混等多种形式,已成为水产养殖尾水处理中极具发展潜力的载体方向之一。按照材料组成及结构特征,复合类载体主要可分为无机-有机高分子复合、有机高分子-生物基复合及磁性复合载体三类。

无机-有机高分子复合载体材料 无机-高分子复合体系是目前应用最广的复合类生物膜载体材料。研究人员在PP、PE等有机高分子载体材料制造过程中掺入沸石、活性炭粉末或TiO₂等无机颗粒,其中高分子基体提供低密度、易成型和优良流化性能,而无机颗粒赋予材料更高的亲水性、微粗糙结构和吸附能力。例如,Li等^[110]通过在PP基质中引入TiO₂-SiC复合颗粒,显著提高了载体的比表面积与耐磨性,使RAS中去除COD的效率提高了1.67倍,去除氨氮的效率提高了1.07倍。

有机高分子-生物基复合载体材料 高分子共混策略广泛应用于复合载体设计,通过将可降解聚合物与常规塑料共混,可制备部分可降解的复合填料,使载体兼具塑料的耐久性与生物基材料的亲水性、生物相容性及缓释碳源能力。例如,Phan等^[99]将可降解的聚乙烯醇(PVA)和常规有机高分子材料PU组合制备成一种复合生物膜载体。研究表明,基于PU-PVA凝胶载体的MBBR最大COD和TN去除率分别为92%和89%,高于仅使用PU载体的效率。

磁性复合载体材料 磁性复合载体通过将Fe₃O₄、 γ -Fe₂O₃、Fe-C颗粒或其他磁性纳米材料引入高分子或生物基基体中,使载体具备可控回收、可调流化行为和增强微生物附着的复合功能。磁性组分不仅提高表面的粗糙度与极性,还可能通过改变电子密度和局部表面能影响微生物黏附过程,使早期生物膜形成更加迅速。例如,Shitu等^[111]在

表5 常见生物可降解高分子类生物膜载体材料的性能

Tab. 5 The properties of traditional biodegradable polymer-based carriers for biofilm

材料类型 Material type	堆积密度 Stacking density (g/cm ³)	比表面积 Specific surface area (m ² /g)	挂膜时间 Membrane-forming time (d)	应用实例 Application example
PLA	0.75 ^[88]	55.2 ^[88]	4 ^[96]	可作为MBBR载体替代PP,用于RAS氨氮去除系统 ^[100]
PHA	0.40 ^[89]	55.0 ^[93]	30—60 ^[97]	用于高负荷反硝化系统或含有机碳源的循环水养殖反应器 ^[101]
PBS	0.70—0.85 ^[90]	~0.6 ^[90]	60 ^[91]	用于海水生物膜反应器及尾水净化系统中作为可降解替代填料 ^[102]
CS	0.15—0.30 ^[91]	~18.2 ^[94]	7 ^[98]	用于反硝化及有机污染物降解系统,常与无机载体复合使用 ^[103-106]
SA	0.70—1.00 ^[92]	~5.0 ^[95]	5—7 ^[99]	常用于微生物固定化与短程硝化反应器 ^[107-109]

利用NaOH负载生物炭与FeC₂O₄复合制备磁性载体, 结果显示氨氮去除率高达99.28%, 并在低温条件下仍保持稳定生物膜活性。

综上所述, 复合材料的制备为设计理想生物膜载体提供了广阔思路。通过合理组合不同材料, 可以在单一载体上实现多重优良性能。然而, 这类载体的制备工艺通常较复杂, 成本较高, 其长期稳定性和组分相容性亦需进一步研究。

2 载体材料综合性能对比

2.1 净水效率对比

在生物膜法水处理研究中, 不同载体材料因其结构特征与界面性质差异, 对微生物定殖行为及污染物去除路径具有显著影响, 相关研究普遍通过对比实验揭示载体类型与净水性能之间的内在关联。苑泉等^[112]系统评估了无机类和有机高分子类生物膜载体材料净水效率的差异。结果表明, 有机高分子类载体在NO₃⁻-N和TN去除方面整体优于无机载体, 表明其三维结构和较高的有效比表面积更有利于生物膜形成及反硝化微环境的构建(表 6)。PP和PE载体在TN去除率上可达46.9%和50.8%, 而PU虽具有更高的初始生物量承载能力, 但其内部结构在长期运行中易发生堵塞或传质受限, 导致综合净水效率未进一步提升。

此外, 生物基载体在多指标协同去除方面表现出一定优势, NO₃⁻-N和TN去除率分别达到73.2%和69.8%, 显示出生物基材料在低C/N条件下兼具载体与缓释碳源的双重功能。然而, 其NH₄⁺-N去除率相对有限, 反映出生物基材料在工程稳定性和运行可控性方面仍存在不足。

而复合类载体在净水效率上呈现出明显优势, 在NH₄⁺-N、COD和TN去除方面均显著提升。然而,

即便是性能较优的复合载体, 其净水效率在不同运行阶段和污染负荷条件下仍存在一定波动, 且部分体系对特定污染物的去除依赖于运行工况与微生物群落结构, 工程适应性仍有提升空间。因此, 从进一步强化生物膜形成稳定性、优化界面传质特性及调控微生物定殖行为的角度出发, 对载体表面进行针对性的改性仍然是提升净水效率与运行可靠性的关键途径。

2.2 工程类指标对比

在大规模养殖的工程实践中, 载体能否长期稳定服役、全生命周期投入是否可控、运维是否易于标准化同样影响着工艺单元的可持续运行与规模化复制。不同种类生物膜载体材料在大规模养殖系统中的长期运行稳定性、经济性和运维难度等方面的综合表现存在显著差异(表 7)。

由表 7数据可知, 无机类载体整体寿命长、年损耗低, 材料本体的长期稳定性最好, 载体破碎与补料压力较低, 适合追求多年连续运行且希望降低材料更换不确定性的系统。但无机颗粒在养殖水高悬浮物与胶体波动条件下更易发生沉积堵塞与压损上升, 稳定性优势通常需要更强的预处理固液分离和更频繁的水力维护, 因此其运维难度更多集中在防堵、清理和水力条件维持。经济性上, 无机类通常依赖长寿命摊薄成本, 单位体积采购价偏高时年化成本处于中等水平, 适用场景更多是对耐久性和材料风险敏感、同时具备较完善固液分离条件的工程。

有机高分子类载体是MBBR最成熟的主流路线, 寿命通常可达十年以上甚至二十年以上, 年损耗率处于可控范围, 且单位体积价格相对较低, 因此年化材料成本往往最低, 经济性优势最突出。长期运行稳定性不仅来自材料耐久, 还来自移动床翻

表 6 不同种类生物膜载体材料的净水效率对比

Tab. 6 Comparison of water purification efficiency of different types of biological membrane carrier materials

生物膜载体材料种类 Type of biofilm carrier material	载体材料名称 Name of carrier material	NH ₄ ⁺ -N去除率 NH ₄ ⁺ -N removal rate (%)	NO ₃ ⁻ -N去除率 NO ₃ ⁻ -N removal rate (%)	COD去除率 COD removal rate (%)	TN去除率 TN removal rate (%)	参考文献 Reference
无机类Inorganic 有机高分子类 Organic polymer	陶粒	—	57.5	44.1	38.2	[112]
	聚丙烯(PP)	—	76.3	40.7	50.8	[112]
	聚乙烯(PE)	—	74.7	42.6	46.9	[112]
	聚氨酯(PU)	—	68.2	38.9	46.1	[112]
生物基类Biobased	芦竹片	54.5	73.2	—	69.8	[113]
复合类Composite	PP-TiO ₂ -SiC	95.0	—	85.0	—	[110]
	PU-PVA	92.0	—	—	89.0	[99]
	生物炭-FeC ₂ O ₄	99.3	—	—	—	[111]

注: 表中数据均来自实验室级别研究, 且工艺条件均为移动床生物膜反应器(MBBR)工艺
Note: All the data in the table are from laboratory-level studies, and the process conditions are all MBBR processes

动带来的自清洁效应,使压损上升和堵塞风险相对更易控制,运维更侧重于曝气剪切、拦截网与载体逃逸管理等常规维护,整体运维强度低且工程可复制性强。因此,在大规模RAS中,有机高分子类通常是主体载体的优先选项,尤其适合成本敏感且需快速规模化复制的养殖场景。

生物基类载体为可降解介质,其寿命短、年损耗高,年化成本主要由持续补料驱动,长期运行稳定性依赖过程控制而非材料耐久性,运维难点在于投加、碳氮平衡与污泥增长等耦合调控,因此更适合用作特定功能单元或短周期强化手段,而不适合作为大规模MBBR主体承载材料。

复合类载体的整体特征是单位体积成本较高,但在寿命、低损耗或过程稳定性方面提供额外价值,属于用更高材料投入换取更强系统确定性的策略。其长期稳定性一方面体现在部分复合材料可实现较低磨损和较长寿命,另一方面体现在结构与表面工程可带来更高的有效生物膜利用率和更稳定的运行,从而降低因负荷波动、膜层异常或局部堵塞引起的故障性干预。经济性方面复合类载体往往不以最低年化材料成本取胜,而是以减少停机风险、降低人工维护与提高出水确定性来实现全生命周期成本优势,因此更适合超大规模、连续运行容错低、维护窗口受限或运维人力昂贵的养殖系统。

总体而言,无机类载体材料更注重材料耐久性,但水力维护更为关键,有机高分子类更偏向低年化成本和低运维门槛的主流方案,生物基类更适合作为功能性补充,而非主体载体,复合类则更适合在高可靠性需求下通过增加材料投入来降低运行风险与维护频次。

3 载体材料表面改性策略

生物膜载体材料的表界面性质直接决定了微

生物的附着效率、传质性能及长期运行稳定性。由于传统载体常存在亲水性不足、微结构单一或抗剪切能力有限等问题,难以满足高负荷与复杂流态条件下的生物膜生长需求,近年来各类表界面改性策略逐渐成为提升载体性能的关键途径^[119, 120]。其中涂覆、接枝与刻蚀改性是最典型且最具可控性的三类表界面改性策略,它们通过调控表面化学组成、微观粗糙度及孔结构形态,实现微生物定殖、传质界面和力学稳定性的整体提升。

3.1 涂覆改性

涂覆改性通过在载体表面沉积一层具有特定功能的薄膜,以快速调控界面性质。该策略主要针对载体表面化学惰性或疏水性导致的初始挂膜慢、表面电荷不利而引起的微生物黏附弱,以及表面吸附位点不足造成的污染物、胶体富集能力有限等问题。其作用重点在于快速界面调控,即在不改变基体主体与力学骨架的前提下,优先改善润湿性、表面电性和吸附功能,从而缩短启动期并提升早期附着效率。其核心作用包括提升亲水性、调控表面电荷、增加吸附能力或构建保护层等,从而促进微生物初始附着,并增强载体在复杂水力环境中的稳定性^[121]。因其操作简便、材料适配性广,在工业化生物膜载体中最为常见。

从界面微生物学视角看,涂覆改性策略本质上是先重构细胞接触到的第一层边界条件,再改变微生物在界面处的行为决策和群体表型。亲水性提升和表面电荷、吸附位点的重构,会显著改变可逆附着阶段的停留概率与不可逆黏附阈值,使细胞更易完成从游离态向定殖态的表型切换,并更早进入EPS高分泌与微菌落形成阶段,从而在启动期形成更均匀、更连续的覆盖^[122]。与此同时,涂层所引入的官能团与离子富集效应会影响基质组分的组装方式,尤其是EPS、蛋白和环境DNA (eDNA)等共同构成的基质网络的交联与黏弹性,进而改变生

表 7 不同商用产品生物膜载体材料工程类指标对比

Tab. 7 Comparison of engineering indicators of different types of commercial product biofilm carrier materials

生物膜载体材料种类 Type of biofilm carrier material	代表商用载体 Typical commercial carrier	寿命 Lifespan (年)	年损耗 Annual loss (%/年)	售价Selling price (USD/m ³)	年成本Annual cost [USD/(m ³ ·年)]	参考文献 Reference
无机类Inorganic	Filtralite-Nature P 0, 5-4	20—25	0—0.2	691	44—60	[114]
有机高分子类Organic polymer	AquaSust-MBBR19	>20	—	136—146	~6.8—7.3	[115]
生物基类Biobased	Saltwater Aquarium-Bio Pellets	~1	~100	~36981	73963	[116]
复合类Composite	Levapor	10—12	0.10—0.30	651	55—66	[117]
	Mutag-Biochip 30	>15	<0.1	1350	90	[118]

注: 1. 本表比较对象为大规模养殖系统RAS中采用MBBR的商用载体; 2. 年成本的计算公式为: 售价/寿命+售价×年损耗率

Note: 1. This table compares commercial carriers used in the MBBR in large-scale RAS; 2. The formula for calculating the annual cost is: Selling price/lifespan+selling price×annual loss rate

物膜的抗剪切稳定性与脱落模式^[123]。在生物膜代谢层面,涂覆改性可以通过提升界面亲和性与局部富集效应提高菌体接触效率,促进异养降解与硝化功能的快速建立^[124]。

然而,在高水力剪切与颗粒摩擦频繁的RAS流态中,部分物理吸附型或弱界面结合型涂层易发生磨损或局部脱落,导致长期运行效果不及初期显著。对于密度较低、表面化学较稳定的有机高分子载体材料,涂覆改性更适用于对界面极性要求较高但环境剪切相对中等的生物接触氧化池、厌氧-缺氧-好氧(A²/O)或生物转盘(RBC)体系^[125]。对于可降解的生物基载体,涂覆层还能延缓水解、保持结构完整性,因此在低C/N养殖尾水中具有较强适配性,但涂层的长期稳定性仍受剪切与微生物酶降解双重影响。

3.2 接枝改性

接枝改性通过化学键将功能性基团永久固定在载体表面,使其获得更高的表面极性和持久亲水性,显著增强微生物黏附能力。该策略旨在解决涂覆改性中常见的涂层磨损和脱落导致界面功能衰减、基体长期润湿性不足导致的生物膜易脱附,以及复杂水质(高盐、富SS、有机胶体)下表面化学不稳定造成的黏附选择性差等问题。其作用侧重于长期化学稳固以及可设计性选择,即通过化学共价固定实现耐剪切、耐再生冲洗的持久界面,并通过官能团密度与类型调控实现对微生物群落的定向富集。其具有更强的表面化学稳固性,通过共价键连接显著提高极性、增强亲水性及微生物黏附能力,使其在MBBR或富含SS的海水养殖尾水中表现出更高的耐久性。接枝层不易被水流剥离,因此在长周期运行下仍能维持良好的生物膜附着性和再生能力^[126, 127]。此外,接枝改性可以精准调控官能团密度,使载体表面呈现对特定群落的选择偏好,例如强化硝化菌早期定殖或促进反硝化菌在低溶氧微环境中的附着,从而在氨氮负荷波动较大或氧分布复杂的反应器中表现出更高的启动速度与抗冲击能力^[128]。

从界面微生物学视角看,接枝改性策略提供了长期稳定且可编程的界面信号输入。由于官能团以共价方式固定,界面润湿性、电性与反应性更不易随时间漂移或被剪切重置,微生物在界面处的附着、增殖和基质合成过程更容易形成连续且可累积的定殖轨迹,从而促进成熟生物膜的稳态建立^[129]。更稳定的界面化学还能降低因频繁脱落和再附着导致的群落重组,使慢生长但功能关键的菌群更容易长期占位,并通过官能团密度与类型的精

细调控形成对特定功能群的持续选择压力^[130]。在生物膜结构层面,稳定界面通常对应更连续的基质网络与更高的整体韧性,生物膜更倾向于形成可再生、抗冲击的黏弹性结构而非脆性剥离^[131]。在代谢层面,则更倾向于提升长期稳态与抗波动能力,在氨氮冲击或溶氧分布波动时,生物膜不易被反复重置,有利于硝化/反硝化功能在空间上维持稳定分工,并缩短系统从扰动到恢复的功能回归时间^[132]。

接枝改性的不足主要在于工艺相对复杂、成本较高,并且对基体材料的化学相容性要求严格,因此更适用于对性能和长期稳定性要求高的工程系统,而不适用于成本敏感或一次性替换率高的养殖场景^[133]。

3.3 刻蚀改性

刻蚀改性通过化学、等离子体或物理方法去除表面部分材料,形成粗糙面、微孔或分级结构,以提升比表面积和生物膜的机械嵌合作用。该策略主要针对载体表面过于光滑导致的附着位点不足和有效比表面积偏低所导致的单位体积生物量受限,以及在曝气、气升等高剪切条件下生物膜易冲刷脱落的问题。其作用侧重于结构增效,即通过微纳尺度形貌重构提供更多驻留与庇护位点、增强机械锁定,从而提升抗剪切稳定性与长期有效生物量。其优势主要在于对微观结构的重构能力,通过形成分级粗糙面、微孔和沟槽等结构显著增加比表面积与微生物驻留位点,实现物理嵌合作用与机械锁定效应的增强。在MBBR、气升式反应器或高剪切曝气条件下,刻蚀增强的微结构使生物膜更不易被冲刷脱落,从而维持较高的有效生物量和长期稳定性。此外,刻蚀为后续涂覆或接枝创造了更高的表面活性与化学锚定位点,使其常作为复合改性的前处理策略。其适配性尤其体现在可降解生物基材料中,通过刻蚀形成的多孔结构不仅提升比表面积,还能调控水解速率,使材料提供缓释碳源的过程更可控,有利于建立硝化-反硝化协同的生物膜微生态^[134]。

从界面微生物学视角看,刻蚀改性策略会重写生物膜的空间生态位与扩散几何。粗糙面、微孔和沟槽会显著改变细胞在界面处的受力与停留时间。一方面,更多的附着位点与机械嵌合增强了初始附着的稳定性,使生物膜在高剪切环境中更倾向于以锚定、增厚的方式累积有效生物量。另一方面,微孔结构会放大生物膜内部的传质差异,使氧、底物与代谢产物更容易形成稳定梯度,从而强化生物膜的分层与生理异质性^[135]。在生物膜结构层面,通常表现为更明显的外层相对好氧高代谢、

内层相对缺氧慢代谢的空间分带,并伴随更强的通道化与局部堵塞风险并存。代谢层面则更容易形成外层硝化提供氧化态氮源,内层在缺氧与碳源可得条件下促进反硝化或其他还原过程,使硝化/反硝化协同更易在同一载体内实现。

然而,若刻蚀强度控制不当会导致孔内扩散受限过强,功能区可能由协同耦合转向传质受限,使硝化过程受抑制或有效体积利用率降低。还可能降低材料力学性能,尤其是在CS、SA等本就力学强度有限的生物基材料中,过度刻蚀易引发碎裂风险,因此其工业化应用常依赖精细化工艺控制^[136]。

总体来看,三类载体材料改性策略在实际应用中呈现明显差异。涂覆改性更适合作为快速且成本可控的界面功能化手段,但耐久性受限。从界面微生物学角度,其优势集中在启动期界面信号强化与早期生物膜快速成型,而弱点在于界面性质易漂移导致稳态功能难以维持。接枝改性可以提供最稳定的界面化学改性,适用于高剪切与长期运行的RAS系统。其关键价值在于以稳定且可设计的界面信号维持成熟生物膜的结构韧性与功能群长期占位,从而提升抗冲击恢复能力。而刻蚀改性通过结构调控增强生物膜物理稳定性,并常与其他策略协同提升复合载体的整体性能。其关键价值在于通过空间生态位与梯度塑造促进多过程耦合,但也需要与传质和堵塞风险控制同步优化。在未来的材料设计趋势中,单独使用某一种策略已难以满足高强度、高波动、复杂基质的水产尾水处理需求,而多策略协同的改性策略将成为实现高效、抗冲击、长寿命生物膜载体的核心路径。

4 展望

尽管生物膜载体材料在水产养殖尾水处理中已广泛应用且成效显著,但面对日益严格的环保排放标准和集约化养殖的提质增效需求,传统惰性载体在脱氮效率、流化能耗及长期环境安全性等方面仍存在局限。未来的研究应打破传统材料壁垒,向多功能化、精准定制和绿色可持续方向发展,应重点关注以下三个研究方向:

(1)开发功能耦合型生物可降解载体,突破低碳氮比尾水脱氮瓶颈。针对RAS尾水中碳源不足的痛点,未来的研究应深入探讨聚羟基脂肪酸酯(PHA)、聚己内酯(PCL)等共混改性聚合物或农业废弃物复合材料的碳源释放动力学。通过调控材料配比与加工工艺,实现碳源缓释速率与微生物反硝化速率的精准匹配,构建固相反硝化与生物膜附着双效合一的新型载体,从根本上解决外加碳源成

本高昂与二次污染风险的问题。

(2)结合流体力学模拟(CFD)与增材制造技术,推动载体构型的数字化精准设计。摒弃传统的经验试错法,未来研究可借助CFD技术优化载体的拓扑结构(如孔隙率、骨架厚度、长径比),以降低反应器内的流化能耗并消除内部传质死区。同时结合3D打印等增材制造技术,实现复杂新型构型的快速原型制造与性能验证,为特定反应器流态(如流化床、移动床)量身定制高效载体。

(3)引入全生命周期评价(LCA),关注载体材料的长期环境归趋与微塑料释放风险。在高强度水力剪切和长期曝气服役条件下,传统高分子微塑料载体(如PE、PP)老化碎裂产生的次生微塑料对水生生态系统的潜在威胁不容忽视。未来的研究亟须建立载体材料的耐候性评价标准,探明其在养殖水体微环境中的老化降解机制。同时运用LCA方法量化载体从生产、服役到废弃全过程的环境影响,为具备高机械强度、耐磨损的生态友好型载体材料的筛选与研发提供科学依据。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Naylor R L, Hardy R W, Buschmann A H, *et al.* A 20-year retrospective review of global aquaculture [J]. *Nature*, 2021, **591**(7851): 551-563.
- [2] Hu G Y, Zhang X, Chen C, *et al.* Response of microbial community to different section of mariculture wastewater treatment system [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(1): 161-171. [胡高宇, 张翔, 陈琛, 等. 海水养殖尾水处理系统中微生物群落对水处理阶段的响应 [J]. *水生生物学报*, 2021, **45**(1): 161-171.]
- [3] Wang Y T, Li Y Y, Xue Y, *et al.* Eco-environmental risk assessment of resource utilization of aquaculture effluents in Chongqing [J/OL]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2026: 1-13. [王宇韬, 李意瑶, 薛洋, 等. 重庆市水产养殖尾水资源化利用的生态环境风险评估 [J/OL]. *环境科学学报*, 2026: 1-13.]
- [4] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Water Drainage Standard for Sea Water Mariculture: SC/T 9103-2007 [S]. Beijing: China Standards Press, 2007. [中华人民共和国农业部. 海水养殖水排放要求: SC/T 9103-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [5] Tabrett S, Ramsay I, Paterson B, *et al.* A review of the benefits and limitations of waste nutrient treatment in aquaculture pond facilities [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2024, **16**(4): 1766-1786.
- [6] Carballeira Braña C B, Cerbule K, Senff P, *et al.* Towards environmental sustainability in marine finfish aquaculture [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021(8):

- 666662.
- [7] Luo S S, Zhuo Z S, Hu S K, *et al.* Research progress in aquaculture wastewater treatment technologies [J]. *Journal of Fisheries Research*, 2025, **47**(3): 378-394. [罗松松, 卓泽晟, 胡淞凯, 等. 水产养殖尾水处理技术研究进展 [J]. *渔业研究*, 2025, **47**(3): 378-394.]
- [8] Mahto K U, Das S. Bacterial biofilm and extracellular polymeric substances in the moving bed biofilm reactor for wastewater treatment: A review [J]. *Bioresource Technology*, 2022(345): 126476.
- [9] Saini S, Tewari S, Dwivedi J, *et al.* Biofilm-mediated wastewater treatment: A comprehensive review [J]. *Materials Advances*, 2023, **4**(6): 1415-1443.
- [10] Chattopadhyay I, Usman T M M, Varjani S. Exploring the role of microbial biofilm for industrial effluents treatment [J]. *Bioengineered*, 2022, **13**(3): 6420-6440.
- [11] Awad H, Mossad M, Mahanna H, *et al.* Performance and life cycle assessment of moving-bed biofilm and integrated fixed-film reactors to upgrade activated sludge systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024(449): 141624.
- [12] Chen X F, Li W X, Li M Q, *et al.* Advance on three common aquaculture tailwater treatment technologies [J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2023, **50**(3): 194-200. [陈小凤, 黎玮欣, 李敏倩, 等. 3种常见水产养殖尾水处理技术的研究进展 [J]. *水产科技情报*, 2023, **50**(3): 194-200.]
- [13] Murshid S, Antonysamy A J, Dhakshinamoorthy G P, *et al.* A review on biofilm-based reactors for wastewater treatment: Recent advancements in biofilm carriers, kinetics, reactors, economics, and future perspectives [J]. *Science of the Total Environment*, 2023(892): 164796.
- [14] Rosa-Masegosa A, Rodriguez-Sanchez A, Gorrasi S, *et al.* Microbial ecology of granular biofilm technologies for wastewater treatment: A review [J]. *Microorganisms*, 2024, **12**(3): 433.
- [15] Zan F X, Ma H R, Xiao C Y, *et al.* Moving-bed biofilm reactor for saline wastewater treatment: Different types of carriers, versatile nitrifying reactions, and functional microbial groups [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022(50): 103274.
- [16] Sauer K, Stoodley P, Goeres D M, *et al.* The biofilm life cycle: Expanding the conceptual model of biofilm formation [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2022, **20**(10): 608-620.
- [17] Al-Amshawee S, Yunus M Y B M, Lynam J G, *et al.* Roughness and wettability of biofilm carriers: A systematic review [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021(21): 101233.
- [18] Banti D C, Samaras P, Kostopoulou E, *et al.* Improvement of MBBR-MBR performance by the addition of commercial and 3D-printed biocarriers [J]. *Membranes*, 2023, **13**(8): 690.
- [19] Sandoval Herazo L C, Alvarado-Lassman A, Marín-Muñiz J L, *et al.* A critical review of mineral substrates used as filter media in subsurface constructed wetlands: Costs as a selection criterion [J]. *Environmental Technology Reviews*, 2023, **12**(1): 251-271.
- [20] Fu H L, Zhong L L, Yu Z Y, *et al.* Enhanced adsorptive removal of ammonium on the $\text{Na}^+/\text{Al}^{3+}$ enriched natural zeolite [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022(298): 121507.
- [21] Wang H X, Xu J L, Liu Y Q, *et al.* Preparation of ceramic site from municipal sludge and its application in water treatment: A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021(287): 112374.
- [22] Yang X Y, Yao M C, Li P, *et al.* Granular activated carbon (GAC)-driven microbial electron shuttle boosts denitrification and mitigates N_2O in cold and carbon-limited biofilm system [J]. *Microbiome*, 2025, **13**(1): 178.
- [23] Wang Z Q, Yang Y, Xiang W C, *et al.* Performance and mechanisms of greywater treatment in a bio-enhanced granular-activated carbon dynamic biofilm reactor [J]. *NPJ Clean Water*, 2022, **5**(1): 56.
- [24] Betsholtz A, Falås P, Svahn O, *et al.* New perspectives on the interactions between adsorption and degradation of organic micropollutants in granular activated carbon filters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, **58**(26): 11771-11780.
- [25] Yuan J, Fox F, Crowe G, *et al.* Is in-service granular activated carbon biologically active? An evaluation of alternative experimental methods to distinguish adsorption and biodegradation in GAC [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, **56**(22): 16125-16133.
- [26] Hermansson M. The DLVO theory in microbial adhesion [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 1999, **14**(1-4): 105-119.
- [27] Flemming H C, Wingender J. The biofilm matrix [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, **8**(9): 623-633.
- [28] Zhou J B, Liu D P, Ye M, *et al.* Data-driven prediction of minimum fluidization velocity in gas-fluidized beds using data extracted by text mining [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, **60**(37): 13727-13739.
- [29] Lago A, Rocha V, Barros O, *et al.* Bacterial biofilm attachment to sustainable carriers as a clean-up strategy for wastewater treatment: A review [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024(63): 105368.
- [30] Turan M. Backwashing of granular media filters and membranes for water treatment: A review [J]. *AQUA-Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 2023, **72**(3): 274-298.
- [31] Hasanzadeh R, Souraki B A, Pendashteh A, *et al.* Application of isolated halophilic microorganisms suspended and immobilized on walnut shell as biocarrier for treat-

- ment of oilfield produced water [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020(400): 123197.
- [32] Miramontes-Gutierrez E M, Ochoa-Rivero J M, Rubio-Arias H O, *et al.* Impact of cations (Na^+ , K^+ , Mg^{2+}) and anions (F^- , Cl^- , SO_4^{2-}) leaching from filters packed with natural zeolite and ferric nanoparticles for wastewater treatment [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18**(16): 8525.
- [33] Target Technologies International Inc. TTII cool-lite zeolite specification sheet [EB/OL]. (2019-04) [2026-02-03] <https://www.ttiionline.com/wp-content/uploads/2019/04/TTII-Cool-Lite-Zeolite-Spec-Sheet.pdf>.
- [34] Dong J X, Wang Y H, Wang L J, *et al.* The performance of porous ceramsites in a biological aerated filter for organic wastewater treatment and simulation analysis [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020(34): 101134.
- [35] Target Products Ltd. Granular activated carbon filter media [EB/OL]. (2019-06) [2026-02-03]. <https://www.targetproducts.com/PDFs/DS-granular.pdf>.
- [36] Sun X B, Sun Y F, Cui F Y, *et al.* Experimental study on start-up of biological aerated filter (BAF) with different fillers [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2011, **47**(S1): 163-166. [孙兴滨, 孙永峰, 崔福义, 等. 不同填料曝气生物滤池启动挂膜试验研究 [J]. *给水排水*, 2011, **47**(S1): 163-166.]
- [37] Mądrecka-Witkowska B, Komorowska-Kaufman M, Pruss A, *et al.* Microbial community during the initial stage of biologically active carbon filters' operation and its role in organic matter removal from water [J]. *Archives of Environmental Protection*, 2023, **49**(3): 67-77.
- [38] Ghasemi Z, Sourinejad I, Kazemian H, *et al.* Application of zeolites in aquaculture industry: A review [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2018, **10**(1): 75-95.
- [39] Zhang Y. Purification of swine wastewater using a biological aerated filter with non-sintered foundry dust based ceramsite [J]. *Academic Journal of Materials & Chemistry*, 2024, **5**(2): 46-54.
- [40] Taylor J H, Soltani S M. Carbonaceous adsorbents in the removal of aquaculture pollutants: A technical review of methods and mechanisms [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023(266): 115552.
- [41] Deena S R, Kumar G, Vickram A S, *et al.* Efficiency of various biofilm carriers and microbial interactions with substrate in moving bed-biofilm reactor for environmental wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2022(359): 127421.
- [42] Hwang J, Ejsmont A, Freund R, *et al.* Controlling the morphology of metal-organic frameworks and porous carbon materials: Metal oxides as primary architecture-directing agents [J]. *Chemical Society Reviews*, 2020, **49**(11): 3348-3422.
- [43] Sarosh S, Kulkarni R M, Varma E, *et al.* Recirculating aquaculture system and nitrification: A review [J]. *Journal of the Indian Institute of Science*, 2024, **104**(4): 869-892.
- [44] Shitu A, Liu G, Zhang Y D, *et al.* Enhancement of mariculture wastewater treatment using moving bed biofilm reactors filled with modified biocarriers: Characterisation, process performance and microbial community evaluation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021(291): 112724.
- [45] Pratap V, Kumar R, Kumar S, *et al.* Optimization of moving bed biofilm reactors for the treatment of municipal wastewater [J]. *Environmental Research*, 2024(241): 117560.
- [46] Zou J T, Yang J Q, Yu F F, *et al.* Understanding the role of polyurethane sponges on rapid formation of aerobic granular sludge and enhanced nitrogen removal [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023(460): 141670.
- [47] Ullah N, Sheikh Z, Badshah M. Municipal wastewater treatment with corrugated PVC carrier anaerobic baffled reactor [J]. *Water Science & Technology*, 2023, **87**(3): 660-671.
- [48] Nayeri D, Khamutian S, Shokoohizadeh M J. A review on the effect of biofilm thickness in moving bed bioreactor for the nitrogen compounds removal [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2025(323): 101385.
- [49] Cai H F, Wang Y, Wu K, *et al.* Enhanced hydrophilic and electrophilic properties of polyvinyl chloride (PVC) biofilm carrier [J]. *Polymers*, 2020, **12**(6): 1240.
- [50] Zimmermann L, Bartosova Z, Braun K, *et al.* Plastic products leach chemicals that induce in vitro toxicity under realistic use conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(17): 11814-11823.
- [51] Bhardwaj G, Wankhede L, Pulicharla R, *et al.* Microplastic-associated biofilms in wastewater treatment plants: Mechanisms and impacts [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025(72): 107582.
- [52] Madesh S, Sudhakaran G, Meenatchi R, *et al.* Interconnected environmental challenges: Heavy metal-drug interactions and their impacts on ecosystems [J]. *Drug and Chemical Toxicology*, 2024, **47**(6): 1282-1299.
- [53] Kuhn R, Bryant I M, Jensch R, *et al.* Applications of environmental nanotechnologies in remediation, wastewater treatment, drinking water treatment, and agriculture [J]. *Applied Nano*, 2022, **3**(1): 54-90.
- [54] Makisha N. Application of biofilm carrier in aerobic reactors as a method to improve quality of wastewater treatment [J]. *Hydrology*, 2021, **8**(2): 77.
- [55] Mattos de Oliveira Cruz L, Oliveira Menezes R, Salgado Duarte T, *et al.* Methods influence in surface area result from polyurethane used as support media [J]. *ACS omega*, 2024, **9**(13): 14766-14770.
- [56] Jaafari J, Mesdaghinia A, Nabizadeh R, *et al.* Influence

- of upflow velocity on performance and biofilm characteristics of Anaerobic Fluidized Bed Reactor (AFBR) in treating high-strength wastewater [J]. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2014, **12**(1): 139.
- [57] Mnyoro M S, Munubi R N, Pedersen L F, *et al.* Evaluation of biofilter performance with alternative local biomedica in pilot scale recirculating aquaculture systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022(366): 132929.
- [58] Zhao C R, Sun N, Chen N, *et al.* Study on the remediation of groundwater nitrate pollution by pretreated wheat straw and woodchips [J]. *Environmental Research*, 2024(263): 120226.
- [59] Chen X H, Xu Y B, Lin Y Q, *et al.* Analysis of denitrification capacity and microbial community of biofilms with different fillers in mariculture wastewater [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2024, **39**(1): 9-19. [陈小红, 许贻斌, 林永青, 等. 不同填料生物膜对海水养殖尾水的脱氮效能及微生物群落分析 [J]. 大连海洋大学学报, 2024, **39**(1): 9-19.]
- [60] Wu W Z, Yang L H, Wang J L. Denitrification performance and microbial diversity in a packed-bed bioreactor using PCL as carbon source and biofilm carrier [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, **97**(6): 2725-2733.
- [61] Tong S, Stocks J L, Rodriguez-Gonzalez L C, *et al.* Effect of oyster shell medium and organic substrate on the performance of a particulate pyrite autotrophic denitrification (PPAD) process [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **244**(1): 296-303.
- [62] Lin J A, Volkenborn N. Nitrate removal in woodchip-based bioreactors and greenhouse gas formation trade-offs between under-and over-treatment [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2025(13): 1543143.
- [63] H2O Distributors. 1/2 Bag of coconut shell granular activated carbon (0.5 Cu ft) [EB/OL]. [2026-02-03]. <https://www.h2odistributors.com/product/gac1240-aw-coconut-shell-filter-media-half-bag>.
- [64] Minnesota Stormwater Manual. Wood chips and applications of wood chips in stormwater [EB/OL]. [2026-02-03]. https://stormwater.pca.state.mn.us/wood_chips_and_applications_of_wood_chips_in_stormwater.
- [65] Xu X, Liu X F, Oh M, *et al.* Oyster shell as a low-cost adsorbent for removing heavy metal ions from wastewater [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019, **28**(4): 2949-2959.
- [66] Dong K, Jiang K, Ruan W J. The strain rate effects of coral sand at different relative densities and moisture contents [J]. *Materials*, 2023, **16**(12): 4217.
- [67] Ibrahim J E F M, Tihiti M, Goemze L A. Environmentally-friendly ceramic bricks made from zeolite-poor rock and sawdust [J]. *Construction and Building Materials*, 2021(297): 123715.
- [68] Sasri R, Wahyuni N, Utomo K P. Filtration Treatment of Processing Kapuas River's Water by Coral Sands/Kaolinite/Activated Carbon [C]//Fatim I (Eds.), International Conference on Chemistry, Chemical Process and Engineering 2017, 15-16 November 2016, Yogyakarta, Indonesia. AIP Conference Proceedings, 2017, **1823**(1): 020030.
- [69] Feng L, He Q S, Wen J P. A bioaugmentation agent allowing the advanced treatment of refractory refinery wastewater in a biological aerated filter and analysis of its microbial community [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2020, **95**(4): 1258-1269.
- [70] von Ahnen M, Pedersen P B, Dalsgaard J. Start-up performance of a woodchip bioreactor operated end-of-pipe at a commercial fish farm-A case study [J]. *Aquacultural Engineering*, 2016(74): 96-104.
- [71] Lin H R, Hou Q Y, Luo Y, *et al.* Reutilization of waste oyster shell as filler for filter for drinking water pretreatment: feasibility and implication [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022(315): 115142.
- [72] Naser A Z, Deiab I, Darras B M. Poly (lactic acid)(PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHAs), green alternatives to petroleum-based plastics: A review [J]. *RSC Advances*, 2021, **11**(28): 17151-17196.
- [73] Lindholm-Lehto P C, Pulkkinen J T, Kiuru T, *et al.* Efficient water treatment achieved in recirculating aquaculture system using woodchip denitrification and slow sand filtration [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(46): 65333-65348.
- [74] Huang X K, Xiao G Q, Zhang X, *et al.* Effects of oyster shell addition on shrimp aquaculture and the dynamic succession of surface biofilm microbial communities [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024(11): 1495938.
- [75] Al-Amshawee S K A, Yunus M Y B M, Alalwan H A, *et al.* Experimental investigation of biofilm carriers of varying shapes, sizes, and materials for wastewater treatment in fixed bed biofilm reactor: a qualitative study of biocarrier performance [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2022, **97**(9): 2592-2606.
- [76] Bedor P B A, Caetano R M J, Souza F G, *et al.* Advances and perspectives in the use of polymers in the environmental area: a specific case of PBS in bioremediation [J]. *Polimeros*, 2020, **30**(2): e2020023.
- [77] Perera K Y, Jaiswal A K, Jaiswal S. Biopolymer-based sustainable food packaging materials: Challenges, solutions, and applications [J]. *Foods*, 2023, **12**(12): 2422.
- [78] Wu W Z, Yang F F, Yang L H. Biological denitrification with a novel biodegradable polymer as carbon source and biofilm carrier [J]. *Bioresource Technology*, 2012(118): 136-140.
- [79] Boley A, Müller W R, Haider G. Biodegradable polymers as solid substrate and biofilm carrier for denitrification in recirculated aquaculture systems [J]. *Aquacul-*

- tural Engineering*, 2000, **22**(1-2): 75-85.
- [80] Yao X, Yang X, Lu Y S, *et al.* Review of the synthesis and degradation mechanisms of some biodegradable polymers in natural environments [J]. *Polymers*, 2024, **17**(1): 66.
- [81] Marín A, Feijoo P, de Llanos R, *et al.* Microbiological characterization of the biofilms colonizing bioplastics in natural marine conditions: a comparison between PHBV and PLA [J]. *Microorganisms*, 2023, **11**(6): 1461.
- [82] Yu H, Ye X, Feng L J, *et al.* Dynamics of denitrification performance and denitrifying community under high-dose acute oxytetracycline exposure and various biorecovery strategies in polycaprolactone-supported solid-phase denitrification [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021(279): 111763.
- [83] Lin Z Y, Ling Y, Yan G K, *et al.* Release, denitrification performance, and generated waste utilization of alkali-modified lignocellulosic materials as denitrification carbon sources [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023(52): 103557.
- [84] Zhang X Y, Song X F, Cheng X J, *et al.* Enhanced denitrification of biodegradable polymers using *Bacillus pumilus* in aerobic denitrification bioreactors: Performance and mechanism [J]. *Bioresource Technology*, 2024(394): 130240.
- [85] Zhang C J, Pei K, Sheng T Y, *et al.* Metal oxides engineering: toward sustainable superhydrophobic surfaces [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025: e12239.
- [86] Kotcharoen W, Wada N, Kakikawa M, *et al.* Rapid biodegradation assessment of biomass plastics using closed recirculating aquaculture systems: A novel approach for environmental sustainability [J]. *Marine Biotechnology*, 2025, **27**(2): 1-16.
- [87] Jha S, Akula B, Enyima H, *et al.* Biodegradable biobased polymers: A review of the state of the art, challenges, and future directions [J]. *Polymers*, 2024, **16**(16): 2262.
- [88] Choudhary R, Bulygina I, Lvov V, *et al.* Mechanical, structural, and biological characteristics of polylactide/wollastonite 3D printed scaffolds [J]. *Polymers*, 2022, **14**(19): 3932.
- [89] MatWeb. Telles Mirel™ I6003rp biobased PHA polymeric modifier [EB/OL]. [2026-02-03]. <https://apm.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=aeab59b941f74ffcb7eabb7bba580160&ckck=1>.
- [90] Wacker Chemie AG. VINNEX® resins for heat-resistant biopolyester films and sheets [EB/OL]. [2026-02-03]. <https://www.wacker.com/h/en-br/medias/7281-EN.pdf>.
- [91] Liu D Z, Li J W, Li C W, *et al.* Poly (butylene succinate)/bamboo powder blends as solid-phase carbon source and biofilm carrier for denitrifying biofilters treating wastewater from recirculating aquaculture system [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 3289.
- [92] British Standards Institution, Comité Européen de Normalisation. Chemicals used for treatment of water intended for human consumption - Sodium alginate: BS EN 1405: 2023 [S]. London: BSI Standards Ltd., 2023.
- [93] Kundrat V, Matouskova P, Marova I. Facile preparation of porous microfiber from poly-3-(R)-hydroxybutyrate and its application [J]. *Materials*, 2019, **13**(1): 86.
- [94] Jamka Z N, Mohammed W T. Assessment of the feasibility of modified chitosan beads for the adsorption of nitrate from an aqueous solution [J]. *Journal of Ecological Engineering*, 2023, **24**(2): 265-278.
- [95] Fila D, Hubicki Z, Kołodyńska D. Applicability of new sustainable and efficient alginate-based composites for critical raw materials recovery: General composites fabrication optimization and adsorption performance evaluation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022(446): 137245.
- [96] Yu N, Zhang D J, Lei Y, *et al.* Innovative coating-etching method of biocarrier fabrication for treating wastewater with a low C/N ratio [J]. *Polymers*, 2022, **14**(15): 3010.
- [97] Yang L, Guo L K, Ren Y X, *et al.* Denitrification performance, biofilm formation and microbial diversity during startup of slow sand filter using powdery polycaprolactone as solid carbon source [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, **9**(4): 105561.
- [98] Shitu A, Zhang Y, Danhassan U A, *et al.* Synergistic effect of chitosan-based sludge aggregates CS@NGS inoculum accelerated the start-up of biofilm reactor treating aquaculture effluent: Insights into performance, microbial characteristics, and functional genes [J]. *Chemosphere*, 2022(303): 135097.
- [99] Phan T A, Pham T N, Nguyen H M. Novel carrier for seafood wastewater treatment using moving bed biofilm reactor system [J]. *Environmental Engineering Research*, 2023, **28**(5): 220508.
- [100] Aalto S L, Letelier-Gordo C O, Pedersen L F, *et al.* Effect of biocarrier material on nitrification performance during start-up in freshwater RAS [J]. *Aquacultural Engineering*, 2022(99): 102292.
- [101] Wang Z, Lai W J, Shao Y Y, *et al.* Denitrification performance and microbial community using polyhydroxyalkanoate as carbon source and biofilm carriers in fluidized bed bioreactor [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2025(241): 111566.
- [102] Ding J F, Chen B, Zhang Y N, *et al.* Effects of poly (1, 4-butanediol succinate) carrier on the nitrogen removal performance and microbial community of sequencing batch reactors [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021(291): 125279.
- [103] Bensalem S, Henni A, Chouana T, *et al.* Removal of pollutants from aquaculture wastewater using chitosan/bentonite composite beads [J]. *Journal of Environmen-*

- tal Engineering and Science*, 2024, **19**(3): 189-199.
- [104] Das A, Ghosh S, Pramanik N. Chitosan biopolymer and its composites: Processing, properties and applications-A comprehensive review [J]. *Hybrid Advances*, 2024(6): 100265.
- [105] Atangana E, Ajiboye T O, Mafolasire A A, *et al.* Adsorption of organic pollutants from wastewater using chitosan-based adsorbents [J]. *Polymers*, 2025, **17**(4): 502.
- [106] Yang S, Li D, Zhu Y J, *et al.* Chitosan-modified quartz sand accelerates the start-up of biofilter: insights into performance, microbial characteristics, and functional genes [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025(374): 133743.
- [107] Just P N, Slater M J, Müller C, *et al.* Effects of two delivery matrix components, alginate and polyethylene glycol, on the intestinal tract and inflammatory response of juvenile rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, Walbaum [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2024, **55**(1): 202-222.
- [108] Rodriguez-Leal S, Silva-Acosta J, Marzalletti T, *et al.* Lab-and pilot-scale photo-biofilter performance with algal-bacterial beads in a recirculation aquaculture system for rearing rainbow trout [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2023, **35**(4): 1673-1683.
- [109] Sarkheil M, Ameri M, Safari O. Application of alginate-immobilized microalgae beads as biosorbent for removal of total ammonia and phosphorus from water of African cichlid (*Labidochromis lividus*) recirculating aquaculture system [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(8): 11432-11444.
- [110] Li J X, Hong Z, Ouyang J Y, *et al.* Mechanism study on the effect of surface electrical property on microbial membrane formation efficiency of TiO₂-SiC composite filler in recirculating aquaculture system [J]. *Materials*, 2024, **17**(14): 3501.
- [111] Shitu A, Chen W, Tadda M A, *et al.* Enhanced aquaculture wastewater treatment in a biofilm reactor filled with sponge/ferrous oxalate/biochar composite (Sponge-C₂FeO₄@NBC) biocarriers: Performance and mechanism [J]. *Chemosphere*, 2023(330): 138772.
- [112] Yuan Q, Wang H Y, Liu K, *et al.* Comparison of the MBBR denitrification carriers for advanced nitrogen removal of wastewater treatment plant effluent [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(3): 713-721. [苑泉, 王海燕, 刘凯, 等. 污水厂尾水MBBR反硝化深度脱氮填料比较 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(3): 713-721.]
- [113] Li L, Yan G K, Wang H Y, *et al.* Denitrification and microbial community in MBBR using *A. donax* as carbon source and biofilm carriers for reverse osmosis concentrate treatment [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019(84): 133-143.
- [114] Filtralite. Filtralite® Nature P 0, 5-4r [EB/OL]. [2026-02-03]. <https://www.filtralite.com/en/products/filtralite-nature/filtralite-nature-p-05-4>.
- [115] AquaSust. K3 MBBR bio media for high-performance wastewater treatment [EB/OL]. (2026-02-03) [2026-02-03]. <https://www.aquasust.com/pid18458714/High-Efficiency-K3-MBBR-Media-for-Wastewater-Treatment-Plants.htm>.
- [116] Saltwater Aquarium. Bulk bio pellets nitrate reducer (6 lbs-1 Gallon) [EB/OL]. [2026-02-03]. <https://www.saltwateraquarium.com/bulk-bio-pellets-nitrate-reducer-6-lbs-1-gallon/?srsltid=AfmBOorOwUqXIbCUyNyn-WXks2XHAgLPfpnSmO0JqkOtlICPzZs1K7H77>.
- [117] Levapor Biofilm Technologie. FAQ [EB/OL]. [2026-02-03]. <https://levapor.com/faq>.
- [118] Mutag. Upgrade your RAS system with Mutag biochip [EB/OL]. (2025-09-01)[2026-02-03]. <https://www.mutag.com/story/boost-your-ras-system-with-smarter-biofiltration>.
- [119] Zhao Y X, Liu D, Huang W L, *et al.* Insights into biofilm carriers for biological wastewater treatment processes: Current state-of-the-art, challenges, and opportunities [J]. *Bioresource Technology*, 2019(288): 121619.
- [120] Zhang X Y, Zhou X T, Xie Y J, *et al.* A sustainable bio-carrier medium for wastewater treatment: Modified basalt fiber [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019(225): 472-480.
- [121] Sarjit A, Tan S M, Dykes G A. Surface modification of materials to encourage beneficial biofilm formation [J]. *AIMS Bioengineering*, 2015, **2**(4): 404-422.
- [122] Karim M A, KianvashRad N, Cabo Jr M, *et al.* Cell adhesion and biofilm development via force-sensitive mechanisms: A perspective [J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2026, **12**(1): 3-12.
- [123] Buzzo J R, Devaraj A, Gloag E S, *et al.* Z-form extracellular DNA is a structural component of the bacterial biofilm matrix [J]. *Cell*, 2021, **184**(23): 5740-5758. e17.
- [124] Jo J, Price-Whelan A, Dietrich L E P. Gradients and consequences of heterogeneity in biofilms [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2022, **20**(10): 593-607.
- [125] Morgan-Sagastume F. Biofilm development, activity and the modification of carrier material surface properties in moving-bed biofilm reactors (MBBRs) for wastewater treatment [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2018, **48**(5): 439-470.
- [126] Purohit P, Bhatt A, Mittal R K, *et al.* Polymer grafting and its chemical reactions [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2023(10): 1044927.
- [127] Drobota M, Ursache S, Aflori M. Surface functionalities of polymers for biomaterial applications [J]. *Polymers*, 2022, **14**(12): 2307.
- [128] Chang T T, Liu Y H, Jheng Y J, *et al.* Enhance adhesion of ammonia-oxidizing bacteria on biocarriers based on

- surface free energy characteristics [J]. *Sustainable Environment Research*, 2025, **35**(1): 24.
- [129] Park S, Sauer K. Controlling Biofilm Development Through Cyclic di-GMP Signaling [M]//Filloux A, Ramos J L (Eds.), *Pseudomonas aeruginosa: Advances in Experimental Medicine and Biology*. Cham: Springer, 2022: 69-94.
- [130] Li S S, Bi C W, Xiang B Q, *et al.* The role of cyclic di-GMP in biomaterial-associated infections caused by commensal *Escherichia coli* [J]. *PLoS One*, 2025, **20**(8): e0330229.
- [131] Sharma D K, Rajpurohit Y S. Multitasking functions of bacterial extracellular DNA in biofilms [J]. *Journal of Bacteriology*, 2024, **206**(4): e00006-e00024.
- [132] Chai Z M, Tian Z C, Zheng M S, *et al.* The functional dominance and metabolic diversity of comammox *Nitrospira* in recirculating aquaculture systems [J]. *Water Research*, 2025(273): 122949.
- [133] Vega-Hernández M Á, Cano- Díaz G S, Vivaldo-Lima E, *et al.* A review on the synthesis, characterization, and modeling of polymer grafting [J]. *Processes*, 2021, **9**(2): 375.
- [134] Zhu Y N, Wang J F, Liu Q J, *et al.* Principles for quorum sensing-based exogenous denitrifier enhancement of nitrogen removal in biofilm: A review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2023, **53**(14): 1404-1429.
- [135] Scheidweiler D, Peter H, Pramateftaki P, *et al.* Unraveling the biophysical underpinnings to the success of multispecies biofilms in porous environments [J]. *The ISME Journal*, 2019, **13**(7): 1700-1710.
- [136] Ge-Zhang S J, Yang H, Ni H M, *et al.* Biomimetic superhydrophobic metal/nonmetal surface manufactured by etching methods: A mini review [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2022(10): 958095.

RESEARCH PROGRESS ON BIOFILM CARRIER MATERIALS IN AQUACULTURE WASTEWATER TREATMENT

LÜ Yang¹, ZHAO Feng², XIANG Kun^{1,3}, SUN Hao-Feng¹, TIAN Ye¹, HAN Zhi-Ying¹ and YE Zhang-Ying¹

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Shandong Jinhong Ecological Technology Co., Ltd., Zaozhuang 277000, China; 3. Qingdao Blue Valley Kunpeng Marine Technology Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: With the development of aquaculture toward high density and intensification, the accumulation of ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, and organic matter in aquaculture effluent has become increasingly prominent. The biofilm method, due to its advantages such as stable operation, resistance to shock loads, and low energy consumption, has become an important technology for the treatment of aquaculture effluent. Among them, the biofilm carrier material plays a key role in microbial adhesion, biofilm stability, and water purification efficiency. This paper systematically reviews the research progress of biofilm carrier materials for aquaculture, focusing on comparing the differences in structural characteristics, engineering adaptability, and pollutant removal performance among inorganic, organic polymer, bio-based, and composite carriers. It also summarizes the typical performance of different carriers in the removal of ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, chemical oxygen demand, and total nitrogen. On this basis, the underlying mechanisms through which surface and interface modification strategies such as coating, grafting, and etching in improving hydrophilicity, enhancing microbial colonization, and shear resistance stability are analyzed. Finally, in combination with the engineering characteristics of large water volume, strong load fluctuation and long-term operation of aquaculture effluent, the development direction of biofilm carrier materials in multi-scale structure design, collaborative modification and low-cost large-scale application is prospected, providing a reference for efficient and stable aquaculture effluent treatment.

Key words: Aquaculture; Biofilm carriers; Inorganic materials; Polymer materials; Composite materials; Surface modification