

生物强化技术在水污染治理中的应用措施研究

文 / 车喜燕 平度颐辰污水处理有限公司

摘要: 生物强化技术以其高效、经济、环保等优势,在水污染治理领域备受关注。系统分析表明,微生物因素、工艺参数和环境条件是影响其应用效果的关键。优化菌种筛选与驯化、群落构建与调控、参数优化和反应器设计,是强化污染物去除性能的重要举措。工程案例证实,生物强化技术可显著提高污染物去除率,同时降低运行成本,具有良好的应用前景。加快关键技术突破和成果转化,对于提升水污染治理水平,推动环保产业发展具有重要意义。

关键词: 生物强化技术;水污染治理;微生物群落;工艺优化;应用案例

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.107

引言

水污染问题日益严峻,已成为制约经济社会可持续发展的瓶颈。传统物化法难以有效去除复杂污染物,且成本高、易造成二次污染。生物强化技术作为一种新兴的水污染治理技术,通过优化微生物种群、强化降解功能,可显著提升污染物去除效率和系统稳定性,具有广阔的发展前景。然而,生物强化技术在实际应用中仍面临诸多挑战,影响因素复杂,亟须系统优化。

一、生物强化技术在水污染治理中的应用现状

(一) 生物强化技术原理及优势

生物强化技术是一种利用微生物的新陈代谢活动来去除水中污染物质的技术,其原理是通过优化微生物的生长环境和营养条件,促进特定功能菌群的富集和驯化,从而提高污染物的降解效率。与传统的物化方法相比,生物强化技术具有显著优势:其一是处理效果好,多种污染物可同步去除;其二是运行成本低,能耗小;其三是工艺流程简单,易于实现自动化控制;四是对环境友好,无二次污染。因此,生物强化技术凭借其独特的优势,在水污染治理领域展现出广阔的应用前景。

(二) 生物强化技术在不同类型水污染治理中的应用

针对不同类型的水污染问题,生物强化技术可灵活应用,发挥其独特优势。在工业废水治理方面,生物强化技术可通过驯化特定功能菌,高效去除重金属、持久性有机物等难降解污染物;对于生活污水,生物强化技术能有效脱氮除磷,控制有机物和氨氮排放;在农业面源污染治理中,植物-微生物协同强化技术可拦截化肥农药残留,修复受损土壤;对于富营养化水体,构建生态浮床系统,利用微生物-水生植物联合作用,可快速净化水质。

(三) 生物强化技术水污染治理效果评估

为客观评价生物强化技术在水污染治理中的应用效果,需建立科学完善的评估体系。污染物去除率是最直观的评价指标,COD、氨氮、总氮、总磷等常规指标去除率普遍可达80%以上,难降解污染物如重金属、持久性有机污染物去除率也可达60%以上。同时,评估还应关注处理水的达标排放情况、工艺稳定性、能耗物耗等。多个案例表明,生物强化工艺出水水质稳定达标,运行稳定可靠,能耗较常规工艺降低30%左右。此外,温室气体排放、污泥减量化、生态毒性降低等,也是生物强化技术的环境效益所在。综合评估结果显示,生物强化技术可为水污染治理提供高效、经济、绿色的解决方案。

(四) 生物强化技术水污染治理应用中存在的问题

尽管生物强化技术在水污染治理中显示出巨大优势和广阔前景,但其实际应用仍面临一些亟待解决的问题。第一,受制于微生物驯化周期长、复杂水质驯化难度大等因素,生物强化技术的推广应用进度偏慢;第二,生物强化过程机理尚不明确,菌种筛选、群落构建、生境优化等核心环节有待攻克,导致工程设计和运行控制难以优化;第三,后处理设施不完善,难以保障稳定达标排放^[1]。因地制宜开发高效驯化技术,加强过程机理与调控机制研究,完善工艺设计与运行监管,是下一步推进生物强化技术产业化应用的关键所在。

二、生物强化水污染治理关键影响因素分析

(一) 微生物因素

微生物是生物强化水污染治理技术的核心,其种类选择、群落结构、代谢功能以及驯化诱变策略的优化,直接决定了污染物降解效率和系统稳定性。其一,污染物降解菌种的筛选是基础,应综合考虑降解效率、环境适应性、群落互作等因素,优选高效低毒菌株。其二,合理调控微生物群落结构,构建多级营养结构和协同代谢网络,形成高效稳定的降解菌群,是提升生物强化性能的关键^[2]。其三,定向驯化与诱变是提高微生物污染物降解能力和环境适应性的有效手段,通过模拟实际污水条件进行驯化,筛选高效诱变菌株,可显著强化微生物降解功能。因此,微生物的优化选育与定向调控是生物强化技术应用的核心环节。

(二) 工艺参数因素

工艺参数的优化控制是实现生物强化过程高效稳定运行的关键。水力停留时间(HRT)直接影响污染物去除效果和污泥龄,合理控制HRT在保证出水达标的前提下,可显著提高处理效率,减少能耗。溶解氧(DO)是好氧微生物代谢的必需条件,DO浓度过低易引起污泥膨胀,过高则增加曝气成本,因此精准调控DO浓度对于平衡微生物活性和运行成本至关重要。碳氮比(C/N)影响微生物脱氮除磷效果,优化进水C/N可促进同步脱氮除磷,避免碳源不足或过剩。pH值影响微生物酶活性和污染物存在形态,维持pH稳定对于保障微生物活性和污染物去除效果非常重要。

(三) 环境因素

环境因素通过影响微生物生长代谢和污染物降解转化过程,进而影响生物强化水污染治理效果。温度显著

影响微生物生长速率和酶促反应速率，大多数污染降解菌在 20–37℃ 条件下活性最佳，因此控制合适的反应温度十分必要。废水盐度也是重要影响因素，高盐环境易引起质膜损伤，破坏微生物细胞结构，因此筛选耐盐菌种、优化驯化策略是应对高盐废水的关键。某些污染物本身具有生物毒性，可通过抑制酶活、破坏细胞结构等方式抑制微生物活性，严重时会导致生物强化系统崩溃。因此实时监测毒物浓度，及时调整进水条件或投加解毒剂，对于维持系统稳定运行至关重要（图 1）。

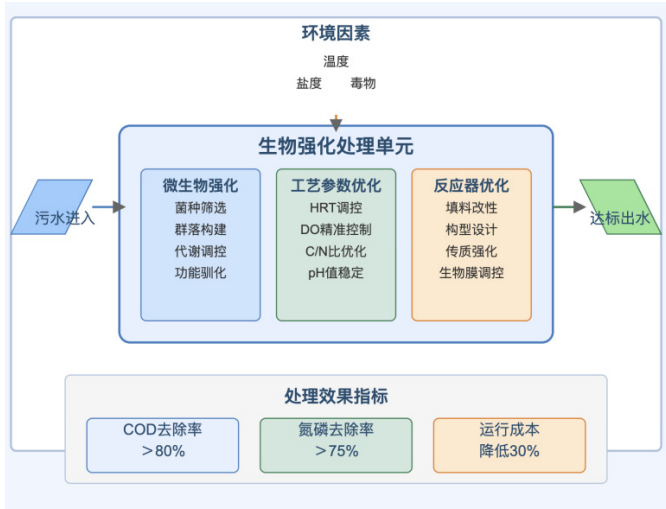


图 1 生物强化技术水污染治理系统集成模型

三、生物强化水污染治理应用措施优化

（一）基于微生物组学的菌种优选与改良

微生物组学技术的快速发展为生物强化水污染治理中的菌种优选与改良提供了新思路和新方法。高通量测序技术可深入揭示复杂微生物群落的物种组成和代谢潜力，为筛选高效污染降解菌株提供重要依据。宏基因组学分析可鉴定关键功能基因和降解途径，指导定向进化和基因工程改良，培育高效降解菌株^[3]。此外，宏转录组学、蛋白组学、代谢组学等多组学联用，可全面解析微生物群落代谢功能和调控机制，为优化菌剂配方和强化降解功能提供理论指导。例如，通过比较污染严重区和未污染区微生物群落结构和功能差异，筛选出高效耐受菌株；再利用诱变育种、基因工程等手段，定向改良降解功能和环境适应性，最终获得优良菌株资源和菌剂产品。因此，微生物组学技术的综合应用，可为生物强化水污染治理提供高效降解菌剂，提升污染控制与修复能力。

（二）基于生物反应动力学的工艺参数优化

工艺参数优化是提高生物强化污染治理效率的关键，传统的经验操作模式难以满足日益严格的达标排放要求。基于生物反应动力学的模型参数优化是一种更科学、更精准的策略。首先，通过对反应器中污染物降解动力学过程进行机理建模，估算关键动力学参数，如最大比增长速率、半饱和常数、衰亡系数等，即可预测不同工况下的出水水质，优化运行条件。其次，结合在线监测数据，采用参数辨识、灵敏度分析等方法，动态校正和更新动力学参数，使模型能够持续反映反应器的实际运行状态，指导工艺优化控制^[4]。如采用基于活性污

泥模型（ASM）的动态模拟，优化曝气量、进水流量等参数，可使污染物去除效率提高 20% 以上。再者，工艺参数动态优化还可显著降低药剂和能源消耗，如基于硝化反应动力学模型优化碳源投加比例，可减少 30% 以上的碳源使用量。

（三）基于生态位模型的微生物群落构建

微生物群落的合理构建是实现生物强化过程高效稳定运行的前提。生态位模型通过描述微生物与环境 and 微生物间的相互作用，可预测特定环境下微生物群落的组成和功能，为优化群落配置提供理论指导。例如，通过生态位重叠分析，可评估不同菌种对共同底物的竞争程度，估算群落的稳定性和多样性。在此基础上，可构建资源互补、协同代谢的微生物群落，提高底物利用效率和污染物降解能力。同时，生态位模型可模拟环境胁迫对微生物群落结构的影响，预测关键种群对 pH、温度、毒物等变化的响应，指导构建耐受性强、稳定性高的微生物群落。如采用生态位模型指导菌剂配方优化，构建产酸菌-硝化菌-反硝化菌协同脱氮群落，可使总氮去除率提高 30% 以上。此外，生态位模型还可评估外源菌株定植风险，优化菌剂投加策略。

（四）高效填料与生物膜反应器的优化设计

填料和反应器构型的优化设计对于充分发挥生物强化技术潜力至关重要。新型高效填料可显著增大比表面积，为微生物附着生长提供良好载体，提高生物量和降解负荷。如采用纳米材料改性填料，比表面积可提高 1–2 个数量级，使反应器容积负荷提高 50% 以上。同时，填料表面修饰亲水、亲菌基团，可加强微生物与载体的相互作用，促进生物膜的形成与稳定。优化填料比表面积、孔隙率、疏水性等特性，可显著强化传质过程，加速污染物降解与转化。例如，采用梯度孔结构填料，模拟生物膜内部浓度梯度，可使反应速率提高 30% 以上。在反应器构型设计方面，应结合污染物降解特点，优化水流分布和混合方式。如采用内循环生物流化床，强化三相混合，可使有机物去除率提高 20% 以上。采用复合垂直流人工湿地，模拟自然植物-微生物群落，可实现高效脱氮除磷。

（五）污染物降解途径与代谢网络解析

污染物降解途径与代谢网络解析是生物强化过程机理研究和工艺优化的关键。采用同位素示踪、核磁共振等先进分析技术，可示踪污染物在微生物体内的降解代谢途径，定量污染物矿化、转化、同化等归趋，揭示速控环节。在此基础上，构建污染物降解代谢网络，阐明关键酶促反应和中间产物，预测微生物群落对复杂底物的降解潜力。如采用 ¹³C 同位素示踪，结合代谢组学分析，揭示了苯酚降解菌的邻位裂解和间位裂解并存的新途径，解析了降解率与中间产物积累的关系。利用宏基因组数据，构建污染物降解分子生态网络，可评估关键功能菌在群落中的作用，优化菌剂配方^[5]。此外，代谢网络分析可探索污染物协同代谢降解机制，发现新的降解功能和细胞间互作关系。如构建菲降解代谢网络，揭示了多环芳烃降解过程中初始加氧和侧链酶解的协同降解机制，为定向强化污染物降解提供新策略（图 2）。

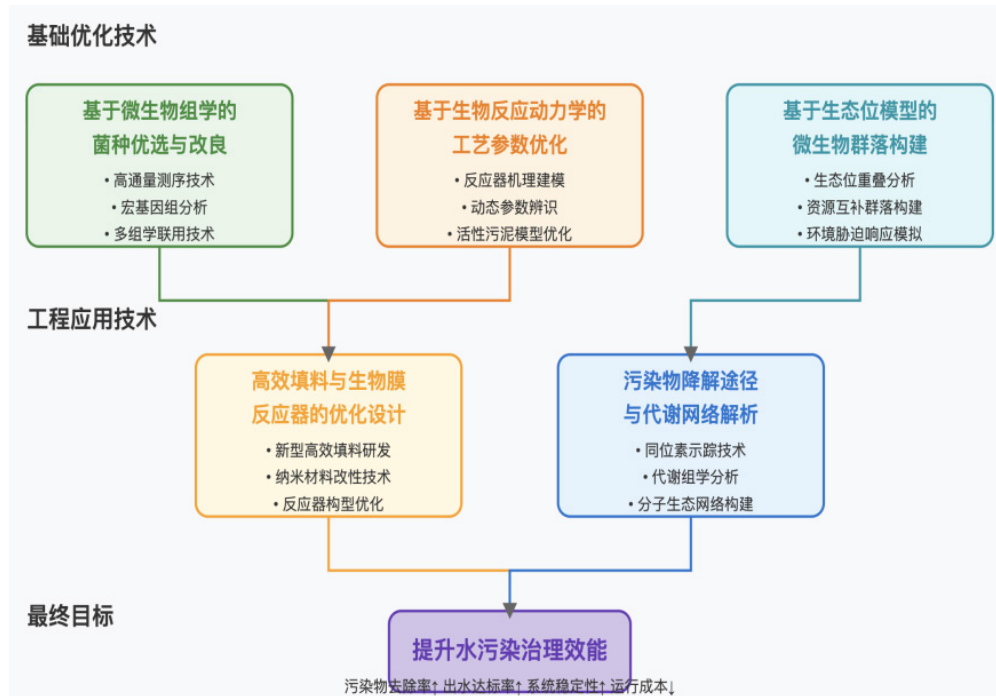


图 2 生物强化技术水污染治理应用措施优化路径图

四、生物强化技术水污染治理应用案例分析

（一）典型案例介绍

生物强化技术在国内外水污染治理中得到了广泛应用，取得了显著成效。以江苏省太湖流域污水处理厂为例，该厂采用了 MBBR-MBR 组合工艺，通过优化载体形式和微生物驯化方法，构建了高效脱氮除磷微生物群落，出水水质稳定达到地表水 IV 类标准，总氮、总磷去除率分别达到 75% 和 85% 以上。类似地，美国 Neuse 河流域水质净化中心采用生物强化技术改造传统活性污泥法，通过优化溶解氧分布和内循环流量，显著提高了脱氮除磷效率，使总氮、总磷浓度分别降低了 60% 和 80%，为当地水环境质量改善做出了重要贡献。由此可见，生物强化技术在实际水污染治理中展现出了巨大的应用潜力。

（二）技术效果与经济性评估

对典型案例的系统分析表明，生物强化技术在提高污染物去除效率、保障出水达标等方面具有明显优势。以南京市某污水处理厂为例，采用生物强化技术改造后，COD、氨氮、总氮、总磷的去除率分别提高了 20%、30%、25% 和 30%，出水稳定达到一级 A 标准。与此同时，运行成本也大幅降低。据测算，药剂费用减少了 40%，曝气量减少了 30%，综合运行成本降低了 35%。类似地，加拿大某污水处理厂采用生物强化技术，运行电耗降低了 25%，污泥产量减少了 30%，年运行成本降低了 40 万加元。因此，生物强化技术在显著提升污染治理效果的同时，也具有良好的经济效益，是一种高效、经济的水污染治理新技术。

（三）存在问题与改进建议

尽管生物强化技术在水污染治理中显示出诸多优势，但实际应用中仍存在一些问题和挑战。主要表现为缺乏标准化设计和操作规程，工程化、产业化应用进展缓慢；针对复杂废水的微生物驯化周期长，实际运行稳

定性和抗冲击能力有待提高；脱氮除磷效率与温度和进水水质波动密切相关，难以实现全天候稳定运行。未来应加强工艺设计和运行控制的标准化研究，建立设计规范和操作规程；加大关键功能菌驯化与定植技术研发力度，提高复杂环境适应能力；优化反应器构型和曝气方式，强化生物反应过程，提升脱氮除磷效率和运行稳定性。只有不断优化生物强化技术，加快成果工程化应用，才能更好地发挥其在水污染治理中的重要作用。

结语

微生物因素、工艺参数和环境条件的优化控制是提升生物强化效果的关键。未来应加强基础研究与技术创新，重点突破菌种筛选与定向驯化、微生物群落构建与调控、水质适应性强化、反应器构型优化等关键技术，加快成果转化与工程应用。同时，完善设计规范和操作规程，建立科学的评估体系和管理制度，为生物强化技术的规模化推广奠定基础。只有多学科交叉融合，产学研用紧密结合，才能不断拓展生物强化技术的应用空间，推动水污染治理模式的革新，为保护水环境、建设生态文明做出更大贡献。

参考文献

- [1] 边秀春. 生物强化技术在水污染治理中的应用实践分析 [J]. 清洗世界, 2024, 40 (03): 148-150.
- [2] 陈梅. 生物强化技术在水污染治理中的应用研究 [J]. 山西化工, 2023, 43 (05): 126-128.
- [3] 马海涛, 何乔明. 生物强化技术在水污染治理中的有效应用 [J]. 科技创新与应用, 2020, (21): 165-166.
- [4] 朱晓明. 生物强化技术及其在水污染治理中的应用 [J]. 环境与发展, 2020, 32 (04): 119+121.
- [5] 刘易平. 浅谈生物强化技术及其在水污染治理中的应用 [J]. 资源节约与环保, 2019, (04): 150.