

高盐环境下微生物群落结构调控及其对有机物降解效能的影响研究

邢胜利, 邢进, 冯振平

(江苏合拓环境技术有限公司, 江苏 宜兴 214200)

摘要 本研究聚焦高盐环境下微生物群落结构调控及其对有机物降解效能的影响, 系统分析了影响盐浓度、有机物种类等微生物群落结构的因素, 重点探讨了耐盐菌的驯化、添加特定微生物等调控微生物群落结构的策略; 通过实验研究和案例分析, 揭示了微生物群落结构与有机物降解效能之间的关系, 旨在为高盐废水处理等领域提供有益参考。

关键词 高盐环境; 微生物群落结构; 有机物降解效能

中图分类号: X172

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.042

0 引言

工业扩张加剧高盐废水排放, 治理迫在眉睫。化工、制药、食品、油气等工业过程是高盐废水的主要来源^[1]。此类废水具有显著的高盐特性(盐分浓度 $> 5\%$), 同时含有多种难降解有机污染物, 包括苯系物、多环芳烃及卤代烃等。此外, 废水中还含有悬浮物、重金属离子、有毒化学物质以及营养盐等多种污染成分。高盐废水肆意排放, 严重威胁生态安全与环境健康, 导致土壤盐渍化、破坏水体生态平衡。因此, 有效的处理高盐废水, 去除其中的有机污染物, 对于生态环境的可持续发展至关重要。

微生物处理技术虽具备高效、环保和经济等优势, 但在高盐环境下仍面临显著挑战。当 Cl^- 或 SO_4^{2-} 浓度超过2%临界值时, 渗透压变化会破坏细胞膜脂质双分子层的稳定性, 同时导致胞内酶活性明显降低, 进而引发活性污泥絮体结构破坏、沉降性能下降, 系统脱氮除碳功能急剧衰退。

此外, 苯系物、多环芳烃等难降解有机物因其致密结构和较高电子云密度, 难以通过常规生物氧化途径分解。溶解性有机物(DOM)与高浓度盐离子在膜表面的协同吸附作用, 会加速凝胶层和污染层的形成, 使膜通量衰减率提高3~5倍, 显著缩短生物反应器的运行周期。这些多重抑制因素的叠加效应, 导致传统生化工艺在高盐环境中的处理效能和运行稳定性均受到严重影响。

1 影响高盐环境下微生物群落结构的因素

1.1 盐浓度

盐度是塑造微生物群落格局的“筛选筛”。低盐环境($< 0.5\%$)中, 普通异养菌如假单胞菌属、芽孢杆菌属占优; 而当盐度升至3%~8%, 嗜盐古菌(盐杆菌属)及耐盐细菌(海杆菌属、盐单胞菌属)逐步成为功能主导, 其胞内积累 K^+ 、相容性溶质(甜菜碱、ectoine)以平衡渗透压, 并重构膜脂组成增强稳定性。盐度每升高1%, 非耐盐类群丰度平均下降12~18%, 群落 α 多样性呈显著负相关。

1.2 有机物种类和浓度

有机物特性直接决定“谁能在高盐中活下来、干得好”。葡萄糖、乙酸等小分子底物可被广谱菌快速同化, 支撑基础代谢; 而萘、氯苯等顽固组分则高度依赖特定降解菌群(红球菌属降解多环芳烃、脱卤拟球菌属介导还原脱氯)。底物浓度过高($\text{COD} > 1\ 500\ \text{mg/L}$)易引发酸积累与氧耗激增, 造成局部厌氧胁迫; 过低($\text{COD} < 200\ \text{mg/L}$)则导致维持能不足, 优势功能菌丰度下滑, 群落功能冗余减弱。

1.3 温度和pH值

温度与pH并非孤立变量, 而是与盐度产生强耦合效应。35~40℃虽利于多数降解酶活, 但会加剧 Na^+ 跨膜渗漏速率, 放大盐胁迫; $\text{pH} < 6.5$ 或 > 8.5 时, 不仅削弱胞外聚合物(EPS)的电荷屏蔽能力, 更使关键脱氢酶(GDH、MDH)构象畸变, 导致电子传递链效

作者简介: 邢胜利(1981-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 污水处理。

率下降 40% 以上。实证表明：在 5% 盐度下，将温度由 30 °C 调至 37 °C、pH 由 7.2 稳控至 7.0，可使苯酚降解速率提升 2.3 倍，印证了精准调控的不可替代性^[2]。

1.4 其他因素

除了上述因素外，高盐环境下的溶解氧、氧化还原电位、重金属离子等因素也会对微生物群落结构产生影响^[3]。溶解氧的含量会影响微生物的呼吸方式和代谢途径，高溶解氧环境利于好氧微生物的生长与代谢，而低溶解氧环境则利于厌氧微生物的生存。氧化还原电位反映出环境的氧化还原状态，不同的微生物对氧化还原电位有着不同的要求。重金属离子具有毒性，会对微生物的生长和代谢产生抑制作用，甚至导致微生物死亡。所以，在高盐废水处理过程中，需要综合考虑这些因素的影响，优化处理工艺条件，以维持微生物群落的稳定与高效运行。

2 高盐环境下微生物群落结构调控策略

2.1 耐盐菌的驯化

在高盐废水处理中，可以将活性污泥置于含有一定盐浓度的培养基中进行培养，随着培养时间的延长，逐渐增加盐浓度，直到达到目标盐浓度。经过驯化后的耐盐活性污泥系统具有更强的抗盐能力和有机物降解能力。耐盐菌的驯化是一种常用的微生物群落结构调控策略。通过逐步提高盐浓度（0.5% ~ 5%/周），可以筛选出适应高盐环境的嗜盐菌和耐盐菌，构建耐盐活性污泥系统。在驯化过程中，微生物会逐渐适应高盐环境，调整自身的生理特性和代谢途径，提高对盐的耐受性^[4]。

2.2 添加特定微生物

中科院深圳先进院戴俊彪团队与上海交大唐鸿志团队联合构建出一株能同步代谢五类芳香烃污染物的多功能工程菌“微生物特种兵”VCOD-15。该菌株可实现联苯、苯酚、萘、二苯并呋喃和甲苯等五种典型芳香类有机污染物的同时降解，涵盖了从单环到多环化合物的广泛底物范围。在高盐废水处理中，添加这种工程菌株可以显著提高有机物的降解效率。添加特定微生物是另一种有效的微生物群落结构调控方法。可以选择具有特定功能的微生物（高效降解菌、耐盐菌等）添加到高盐环境中，以改善微生物群落结构，提高有机物降解效能。

2.3 优化环境条件

在高盐废水处理过程中，可以将温度控制在微生物的最适生长温度范围内，调节 pH 值至中性或微碱性，

保证充足的溶解氧供应等。还可以通过添加营养物质、调节氧化还原电位等方式来优化环境条件，提高微生物的活性与代谢能力。优化环境条件也是调控高盐环境下微生物群落结构的重要手段。通过控制温度、pH 值、溶解氧等环境因素，可以为微生物创造适宜的生长和代谢条件，促进微生物的生长和繁殖，提高微生物群落的稳定性和功能。

2.4 生物强化技术

生物强化是提升高盐废水处理效能的关键策略之一。其核心在于定向引入经人工选育的功能微生物或其活性代谢产物，如高效降解菌剂与微生物酶制剂。前者通过现代发酵与筛选技术，富集并扩增具备耐盐性及广谱降解能力的工程菌株；后者则以高度特异、高效的天然酶蛋白为载体，在不依赖活体微生物的前提下催化有机物、氮磷等污染物的快速转化。二者协同应用，可突破高盐环境对土著微生物的抑制瓶颈，精准补强系统功能短板。尤其在盐度波动大、毒性负荷高的工况下，生物强化不仅能加速群落功能重构，更能推动微生物由“被动适应”转向“主动响应”，显著提升系统稳定性与抗冲击能力。

3 微生物群落结构与有机物降解效能的关系

3.1 微生物群落结构对有机物降解效能的影响

微生物群落结构直接决定有机物转化效率。在高盐体系中，厌氧菌群承担着大分子有机物水解酸化与 pH 缓冲的关键作用，有效缓解盐胁迫；而好氧菌群则主导后续的深度氧化与矿化过程，实现难降解物质的彻底去除。群落中优势类群的功能属性尤为关键。当耐盐产酸菌、嗜盐脱氢酶菌或广谱芳香烃降解菌成为主导时，整体降解速率与去除率同步跃升^[5]。功能多样性远比物种数量更影响处理效能：不同菌属通过代谢互补、电子传递耦合与微生态位分异，形成多路径协同降解网络，大幅提升碳源利用效率与污染物覆盖广度。因此，优化群落并非追求“越多越好”，而是构建“能力匹配、分工明确、动态稳定”的功能性组合。

3.2 有机物降解过程中微生物群落结构的变化

在有机物降解过程中，微生物群落结构会发生动态变化。随着有机物的降解，微生物的营养物质供应发生变化，微生物群落会根据营养物质的变化进行调整。在有机物降解的初期，一些能够快速利用易降解有机物的微生物会大量繁殖，成为优势菌群；随着易降解有机物的减少，一些能够利用难降解有机物的微生物会逐渐生长和繁殖，微生物群落的结构也会相应

发生改变。环境条件的变化也会影响微生物群落结构的变化。例如：在高盐废水处理过程中，随着盐分的去除和有机物浓度的降低，微生物群落可能会从以耐盐微生物为主逐渐转变为以普通微生物为主。

3.3 提高有机物降解效能的微生物群落结构优化策略

提升有机物降解效率，关键在于主动塑造高效、稳定的微生物功能群落。这并非依赖单一手段，而需多维度协同干预：一方面，精准调控温度、pH、溶解氧及碳氮比等理化参数，为土著降解菌创造最适代谢窗口，抑制低效或竞争性菌群，从而自然筛选并富集功能优势种；另一方面，可定向引入经实验室验证的高效功能菌株（如耐盐型假单胞菌、嗜碱芽孢杆菌）或复合酶制剂，弥补原生群落的功能短板，实现“缺什么补什么”的靶向强化。尤其在高盐胁迫下，生物强化不应仅停留于添加，更需结合梯度盐度驯化策略，通过逐级提升盐浓度，驱动群落发生适应性演替，促使耐盐基因表达上调、胞内相容性溶质合成增强，最终构建出兼具耐受性与降解力的稳定菌群结构。

4 实验研究与案例分析

4.1 实验设计与方法

本研究围绕高盐废水处理场景，构建了三类对照实验体系：盐度梯度驯化组、功能菌投加组及环境参数优化组（控温 32 ± 1 °C、pH 7.2~7.8、DO 维持 4~6 mg/L）。所有组别均设三重平行，并以未干预组为基准。全程动态监测进/出水 COD、TOC、 Cl^- 及 Na^+ 浓度，同步采集活性污泥样本，采用 16S rRNA 基因 Illumina MiSeq 高通量测序解析群落组成与多样性变化。

4.2 实验结果与分析

结果证实：驯化组在 21 天后 COD 去除率由初始 58% 跃升至 89%，其群落中海杆菌属（*Marinobacter*）、盐单胞菌属（*Halomonas*）相对丰度合计提升至 41.3%，显著高于对照组（12.7%）；功能菌投加组在第 7 天即达峰值降解速率（ $0.86 \text{ g COD} \cdot \text{g}^{-1} \text{ VSS} \cdot \text{d}^{-1}$ ），且外源菌株在系统中成功定殖并持续贡献 > 30% 的降解活性；参数优化组虽未引入外来菌剂，但 Shannon 指数提高 0.9，硝化螺菌属（*Nitrospira*）与动胶菌属（*Zoogloea*）协同增强，使难降解大分子有机物转化效率提升 37%。三组均展现出优于传统工艺的抗冲击负荷能力，证明了微生物群落并非静态资源，而是可通过科学干预持续进化的“活体催化剂”。其结构优化本质是功能导向的生态重构，唯有让对的微生物，在对的时间、以

对的方式发挥作用，有机物降解效能的跃升才具备可持续根基。

4.3 实际案例分析

化工厂产生的高盐高 COD 废水，采用“化学沉淀→耐盐生物处理（MBR）→高级氧化（UV-AOP）→蒸发结晶”的工艺进行处理。通过化学沉淀降低硫酸盐负荷，缓解生物系统抑制；利用耐盐生物处理（MBR）构建耐盐活性污泥系统，强化有机物的降解；采用高级氧化（UV-AOP）进一步矿化难降解有机物；最后通过蒸发结晶实现盐分回收与零排放。处理后，盐分去除率高于 95%、COD 去除率高于 90%，出水水质满足回用或排放标准^[6]。

5 结束语

高盐环境对微生物的生存和代谢活动提出了严峻挑战，但通过合理的微生物群落结构调控可以提高微生物对高盐环境的适应能力和有机物的降解效能。耐盐菌株的筛选与应用、环境因素的调节、微生物群落的构建与优化等方法可以有效地调控微生物群落结构。微生物群落结构与有机物降解效能密切相关，不同的群落结构对有机物的降解能力不同，稳定的群落结构有利于提高有机物的降解效能。通过采用合适的研究方法和实验设计，可以深入研究微生物群落结构与有机物降解效能的关系。目前的研究成果在化工、海水淡化、电镀等行业的高盐废水处理中已经得到了应用，但仍面临一些挑战。未来需要进一步深入研究微生物群落的功能和代谢机制，开发新型的调控技术，拓展应用领域，为高盐废水处理及相关生态修复提供更有效的技术支持和理论依据。

参考文献：

- [1] 中国科学院城市环境研究所. 城市环境所在处理高盐废水研究中取得进展 [J]. 高科技与产业化, 2022, 28(07): 83.
- [2] 李萌, 刘如玲, 陈进进, 等. 高盐条件下 pH 对同步短程硝化反硝化脱氮性能及微生物群落的影响 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2023, 53(04): 67-76.
- [3] 王绪民, 王铖, 崔芮. 微生物在不同营养盐环境下矿化产物研究 [J]. 工业建筑, 2019, 49(10): 208-212.
- [4] 王茹. 耐盐微生物在不同盐度条件下的驯化及其性能研究 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021.
- [5] 张圣海, 喻婵, 韩一凡, 等. 微生物处理高盐工业有机废水工艺研究进展 [J]. 微生物学通报, 2023, 50(04): 1720-1733.
- [6] 孟凡旭. 高盐环境微生物的分离、鉴定及其在含盐废水处理中的应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.