

污水处理过程中微生物群落结构与功能的变化研究

陈明

江西益洁环保技术有限公司, 江西南昌, 330038;

摘要: 微生物群落是污水处理系统的核心功能单元, 其结构与功能的动态变化直接决定处理效能。本文围绕污水处理全流程, 探究微生物群落结构的演替规律及功能演变特征, 分析影响群落变化的关键因素。通过明确群落结构与功能的关联机制, 提出基于微生物群落特征的工艺优化策略。研究旨在为提升污水处理效率、优化工艺参数提供理论支撑, 对推动污水处理行业的技术升级与可持续发展具有重要实践意义。

关键词: 污水处理; 微生物群落结构; 微生物功能; 动态演替; 工艺优化

DOI: 10.64216/3104-9664.25.03.060

引言

随着工业化与城市化进程加快, 水资源污染问题日益突出, 污水处理成为保障水资源安全的关键环节。微生物在污水污染物降解、水质净化过程中发挥着不可替代的作用, 其群落结构与功能的稳定性直接影响处理系统的运行效果。目前, 国内外学者已开展大量关于污水处理微生物群落的研究, 但对全流程群落动态变化及结构与功能的耦合机制仍存在研究缺口。本文以此为切入点, 明确研究目标与技术路线, 系统探究污水处理过程中微生物群落的变化规律, 为工艺优化提供科学依据。

1 微生物群落基础特征

1.1 群落组成类型

污水处理系统中的微生物群落组成复杂, 涵盖细菌、真菌、古菌、原生动物等多种类群。其中, 细菌是群落的核心优势类群, 包括硝化细菌、反硝化细菌、聚磷菌等功能菌群, 不同细菌类群在污染物降解过程中承担不同角色。真菌类群多参与难降解有机物的分解, 其菌丝体还可促进微生物絮体的形成。古菌主要存在于厌氧处理阶段, 参与甲烷生成等厌氧代谢过程。原生动物则通过捕食细菌调节群落结构平衡, 间接提升水质净化效果。这些微生物类群相互协作, 构成稳定的生态系统, 保障污水处理过程的顺利进行。

1.2 表征指标与识别方法

微生物群落结构的表征指标主要包括群落丰度、多样性、均匀度及优势度等。群落丰度反映群落中微生物物种的数量, 多样性体现物种的丰富程度与差异度, 均匀度表征不同物种的分布均衡性, 优势度则用于描述优势物种在群落中的主导地位。目前, 常用的识别方法包

括传统培养法、分子生物学方法等。传统培养法通过培养基分离纯化微生物, 操作简便但局限性较大。分子生物学方法以高通量测序技术为核心, 可快速准确获取群落的物种组成与基因信息, 已成为微生物群落研究的主流技术, 广泛应用于污水处理系统的群落分析中。

1.3 环境影响机制

污水处理环境对微生物群落基础特征具有显著调控作用。pH值通过影响微生物酶的活性, 改变群落的物种组成与代谢能力, 中性或弱碱性环境更利于多数功能微生物的生长繁殖。溶解氧含量直接决定群落的好氧、厌氧功能分区, 好氧段以好氧微生物为主导, 厌氧段则富集厌氧及兼性厌氧微生物。温度通过影响微生物的生长速率, 调节群落的演替进程, 适宜的温度范围可提升群落的代谢效率。此外, 污水中的营养物质比例也会影响群落结构, 碳氮磷比例失衡会导致优势菌群发生转变, 进而影响处理效能。

2 群落结构动态变化

2.1 预处理阶段变化

预处理阶段主要包括格栅、沉砂、调节等工艺, 其核心作用是去除悬浮杂质、调节水质参数。此阶段微生物群落结构以耐冲击性较强的异养细菌为主, 物种丰度与多样性较低。随着污水进入预处理系统, 大量悬浮颗粒物被去除, 附着于颗粒物表面的微生物随之沉降, 导致群落组成发生初步筛选。同时, 水质参数的初步调节使适应能力较弱的微生物被淘汰, 优势菌群逐渐凸显。这一阶段群落结构的变化较为平缓, 主要为后续处理阶段的微生物群落构建奠定基础, 确保后续处理过程的稳定性。

2.2 核心处理阶段演替

核心处理阶段是污染物降解的关键环节,包括活性污泥法、生物膜法等主流工艺,此阶段微生物群落结构呈现显著的演替特征。初期,污水中大量污染物为微生物提供充足营养,异养细菌快速增殖,成为优势菌群。随着污染物浓度降低,硝化细菌、反硝化细菌等功能菌群逐渐富集,群落多样性显著提升。在活性污泥系统中,微生物通过聚集形成絮体,絮体内部与表面的微生物群落组成存在差异,形成复杂的微生态结构。生物膜系统中,微生物沿膜厚度方向形成梯度分布,好氧、厌氧菌群分层共存,群落结构的空间异质性明显。

2.3 深度处理阶段稳定

深度处理阶段的目标是去除残留污染物,提升出水水质,此阶段微生物群落结构趋于稳定。经过核心处理阶段的筛选与演替,群落中的优势菌群已完全适应处理环境,物种丰度与多样性保持稳定。此阶段的微生物群落以降解低浓度污染物的功能菌群为主,如硝化细菌、反硝化细菌及少量降解难降解有机物的菌群。群落结构的稳定性确保了深度处理效果的一致性,减少出水水质的波动。同时,由于污染物浓度较低,微生物的生长代谢速率减缓,群落的更新换代速度降低,进一步强化了群落结构的稳定性。

3 群落功能定位与演变

3.1 核心功能

微生物群落的核心功能是参与污水中污染物的降解与转化,包括碳源、氮源、磷源等营养物质的去除。碳源去除主要通过异养微生物的代谢作用,将有机碳转化为二氧化碳和水。氮源去除依赖硝化与反硝化过程,硝化细菌将氨氮转化为硝酸盐氮,反硝化细菌将硝酸盐氮还原为氮气释放到大气中。磷源去除则通过聚磷菌的过量吸磷作用,在厌氧条件下释放磷,好氧条件下吸收磷,最终通过污泥排放实现磷的去除。此外,微生物群落还可降解部分难降解有机物,如酚类、芳烃类化合物,进一步提升水质净化效果。

3.2 功能动态转变

随着污水处理流程的推进,微生物群落的功能呈现明显的动态转变。预处理阶段,群落功能以初步分解大分子有机物、适应环境为主,污染物降解效率较低。核心处理阶段,群落功能聚焦于高效降解各类污染物,碳氮磷去除功能全面激活,异养代谢、硝化反硝化、聚磷等功能协同作用,实现污染物的高效去除。深度处理阶

段,群落功能转向去除低浓度残留污染物,功能菌群的代谢活性针对性增强,重点降解核心处理阶段未完全去除的难降解有机物。这种功能转变与群落结构的演替过程紧密相关,结构的变化驱动功能的动态调整。

3.3 结构与功能关联

微生物群落的结构与功能存在密切的关联机制,群落结构的组成与分布决定功能的实现效率。优势菌群的种类直接决定群落的核心功能,功能菌群的丰度越高,对应的污染物降解功能越强。群落多样性的提升可增强功能的稳定性与抗干扰能力,丰富的物种组成可确保在环境变化时仍有相应的功能菌群发挥作用。群落的空间结构也会影响功能实现,如生物膜系统中菌群的分布,使好氧、厌氧功能同时进行,提升氮源去除效率。此外,群落内部的种间协作关系,如共生、互养等,进一步强化了群落功能的协同性,促进污染物的高效降解。

4 关键影响因素

4.1 水质参数调控

水质参数是影响微生物群落结构与功能的重要因素,主要包括污染物浓度、营养物质比例、pH值等。污染物浓度过高会对微生物产生毒性抑制,影响群落的生长代谢,导致功能下降;浓度过低则无法为微生物提供充足营养,群落丰度降低。碳氮磷比例失衡会破坏群落的营养平衡,导致优势菌群转变,如氮源不足会抑制硝化细菌的生长,影响氮去除功能。pH值的变化会改变微生物的生存环境,偏离适宜范围会导致部分功能菌群失活,进而影响群落结构的稳定性与功能实现。因此,合理调控水质参数是维持群落稳定与处理效能的关键。

4.2 工艺运行参数影响

工艺运行参数直接影响微生物群落的生长环境,进而调控群落结构与功能。溶解氧含量是关键运行参数之一,好氧处理阶段需维持适宜的溶解氧浓度,确保好氧功能菌群的生长代谢;厌氧阶段则需严格控制溶解氧,避免抑制厌氧菌群的活性。水力停留时间会影响微生物与污染物的接触时间,停留时间过短,微生物无法充分降解污染物,群落结构尚未稳定就被排出;停留时间过长,会增加处理成本,且可能导致群落结构过度演替。污泥龄也会影响群落结构,不同功能菌群的世代周期不同,合理控制污泥龄可选择性富集目标功能菌群,提升处理效能。

4.3 外界环境因子作用

外界环境因子对微生物群落的稳定性具有重要作用,主要包括温度、光照、重金属离子等。温度通过影响微生物的酶活性与生长速率,调控群落的演替进程,适宜的温度范围可提升群落的代谢效率,温度过高或过低都会抑制微生物生长。光照主要影响光合微生物的生长,在部分采用光合细菌处理的系统中,光照强度与时间会直接影响群落结构与功能。重金属离子具有毒性,会破坏微生物的细胞结构与酶系统,抑制微生物的生长代谢,高浓度重金属还会导致大量微生物死亡,严重破坏群落结构的稳定性,降低处理效能。

5 工艺优化策略

5.1 基于群落稳定的参数调整

基于微生物群落结构稳定性的需求,可通过精准调整工艺参数优化污水处理过程,保障系统长期高效运行。首先,根据群落结构的实时监测结果,动态调控溶解氧浓度,针对不同功能菌群的需氧特性,确保好氧、厌氧功能菌群的平衡生长,维持群落结构稳定。其次,科学优化水力停留时间与污泥龄,严格匹配优势功能菌群的世代周期,避免因参数不匹配导致群落结构过度波动。同时,通过预处理环节调节进水水质参数,精准控制污染物浓度与碳氮磷营养物质比例,为微生物提供适宜的生长环境,减少环境胁迫对群落结构的不利影响。此外,可采用分段调控的方式,针对预处理、核心处理、深度处理不同阶段的群落特征,设置差异化的运行参数,进一步提升群落结构的稳定性与整体处理效能。

5.2 强化功能群落的优化路径

强化功能微生物群落是提升污水处理效能的重要优化路径,可通过多种手段定向调控菌群组成。可通过接种功能菌群的方式,直接向处理系统中添加经过驯化的高效降解菌,快速提升目标污染物的降解能力,缩短系统启动与稳定周期。同时,优化反应器内部结构,构建有利于功能菌群生长的微环境,如在生物膜反应器中优化载体材料的孔径与比表面积,提升生物膜的附着能力与稳定性,促进功能菌群的快速富集与增殖。此外,可采用选择性培养基筛选优势功能菌群,通过梯度驯化培养提升菌群的环境适应性及降解效率,再将驯化后的高效菌群定向投加至处理系统中,强化群落的核心功能。还可通过精准调控营养物质供应比例,定向富集功能菌群,提升群落的功能针对性与污染物降解效率。

5.3 群落调控的应用方向

微生物群落调控在污水处理效能提升中的应用方

向广泛,可适配不同类型污水与处理场景的需求。在工业废水处理中,针对高浓度、难降解工业废水成分复杂、毒性强的特性,通过群落调控定向富集高效降解功能菌群,提升工业废水的处理效率与达标率。在低温污水处理中,通过低温驯化培养耐低温功能菌群,结合运行参数的优化调整,有效解决低温环境下微生物活性降低、处理效能下降的行业难题。在深度处理领域,利用群落调控技术强化低浓度残留污染物的去除,进一步提升出水水质,满足日趋严格的排放标准。此外,群落调控还可应用于污水处理系统的故障修复,当系统出现效能下降、污泥膨胀等问题时,通过定向调整群落结构,恢复系统的正常运行功能,保障处理过程的长期稳定性与可靠性。

6 结论

本文系统探究了污水处理过程中微生物群落结构与功能的变化规律。研究表明,污水处理全流程中,微生物群落结构呈现显著的阶段性演替特征,从预处理阶段的低多样性、耐冲击菌群为主,到核心处理阶段的高多样性、功能菌群富集,再到深度处理阶段的结构稳定。群落功能随结构演替呈现动态转变,核心功能为污染物的降解与转化,结构与功能存在紧密的关联机制。水质参数、工艺运行参数及外界环境因子是影响群落变化的关键因素。基于上述研究,提出的基于群落稳定的参数调整、强化功能群落等优化策略,可有效提升污水处理效能。本研究丰富了污水处理微生物生态的理论研究,为实际污水处理工艺的优化与升级提供了科学依据,具有重要的理论与实践价值。

参考文献

- [1] 李晓琳, 李晓良, 茹秋瑾, 等. 膜曝气生物膜工艺处理低碳氮比农村生活污水的研究[J/OL]. 灌溉排水学报, 1-9[2025-12-25].
- [2] 丛佩瑶, 王敏, 艾锐, 等. 污水处理厂碳核算与减排路径的研究进展[J/OL]. 工业水处理, 1-26[2025-12-25].
- [3] 管君. 微生物降解技术在污水处理中的性能比较试验[J]. 粘接, 2025, 52(12): 67-70.
- [4] 卢春. 膜生物反应污水处理技术在污水治理中的应用研究[J]. 标准生活, 2025, (08): 308-310.
- [5] 杜鸿杰, 吴亚岚, 王多兵, 等. 环境污水处理中微生物技术的实施探析[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(21): 5-6+18.