

城市污水处理厂脱氮除磷工艺优化研究

史俊岗 甘颖 雷进 郭晓磊

翱华工程技术股份有限公司 内蒙古自治区 呼和浩特 010000

【摘要】：城市污水中氮磷污染物含量高，传统脱氮除磷工艺在高负荷和季节性变化下效率下降，出水水质不稳定。通过优化反应器结构与流程配置、调整曝气量、停留时间、碳氮比及回流比，并结合微生物群落调控，实现好氧、缺氧与厌氧阶段协同运转。优化措施显著提高总氮、总磷去除率，稳定出水水质，降低能耗和运行成本，并增强系统对负荷波动和环境扰动的适应能力，为城市污水处理厂实现高效、稳定、经济的氮磷去除提供了可行技术路径。

【关键词】：城市污水处理；脱氮除磷；工艺优化；水质稳定；能耗降低

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.077

引言

城市化进程加快导致污水排放量增加，氮磷超标成为水体污染的主要因素，严重威胁生态环境和水资源安全。现有污水处理工艺在高负荷波动和温度变化条件下常出现脱氮除磷效率下降、出水水质不稳定的现象，影响排放合规性和系统经济性。通过调整反应器流程、优化运行参数及调控微生物群落结构，可显著提升脱氮除磷效率，并降低运行成本和能耗，实现处理系统的高效稳定运行。这类优化措施在城市污水处理厂推广应用，可有效改善水环境质量，提升资源利用效率。

1 脱氮除磷工艺存在的问题及影响分析

1.1 污水中氮磷负荷波动对处理效率的影响

污水中氮磷负荷的波动直接影响脱氮除磷工艺的反应速率和去除效率，高负荷瞬时输入可能导致好氧、缺氧及厌氧阶段的微生物活性失衡，造成亚硝酸盐积累和磷释放不完全，降低总体处理效果。负荷波动还会引起混合液悬浮固体浓度变化，影响污泥沉降性能和回流系统的稳定性。工艺设计若未充分考虑氮磷负荷动态特性，容易出现短时间超标排放，增加出水不稳定风险。必须结合污水水质变化规律与高效控制策略，实现氮磷负荷适应性管理，提高脱氮除磷反应的连续性和可靠性。

1.2 现有工艺在不同季节和温度条件下的运行不稳定性

季节性温度变化显著影响微生物代谢速率及溶解氧需求，低温环境会延缓硝化、反硝化及厌氧除磷反应，造成总氮总磷去除率下降。工艺运行在高温或低温阶段时，反应器中的微生物群落结构和活性可能出现波动，引发沉淀和排泥异常，同时水力停留时间和氧化还原条件的变化进一步加大工艺不稳定性^[1]。传统控制策略难以应对季节性波动，容易形成出水水质波动和能源消耗增加。优化工艺必须综合考虑温度敏感性，调整曝气、回流及反应时间，实现全年运行的稳定性和能效优化。

1.3 微生物群落结构对脱氮除磷效率的限制

脱氮除磷过程依赖好氧、缺氧及厌氧微生物的协同作用，不同菌群的数量比例、代谢活性及竞争关系决定工艺效率。微

生物群落结构失衡会导致硝化菌、反硝化菌及聚磷菌活性下降，反应速率减缓，氮磷去除效率下降。同时，底物类型、负荷波动和溶解氧梯度的变化会改变群落多样性，降低系统对冲击负荷的适应能力。精细化调控微生物群落结构与代谢功能，结合智能监控与运行参数优化，可增强生物反应的稳定性，提升脱氮除磷过程对环境扰动的适应性和出水水质的一致性。

2 工艺流程优化设计及原理

2.1 反应器结构及流程配置优化方案

反应器结构的优化是脱氮除磷工艺提升效率的核心环节，通过科学划分好氧、缺氧和厌氧反应区，提高反应器内部水力停留时间的均匀性和微生物接触效率，可增强微生物对底物的利用率。流程配置优化不仅包括反应区的数量和顺序，还涉及回流系统设计、液流分配方式及搅拌与曝气的合理布局，从而形成高效的氧化还原梯度和底物分布。通过增加内循环流量或改进回流比，实现硝酸盐的高效利用和磷释放吸收的同步化，提高脱氮除磷反应的一体化运行能力。同时，反应器的空间结构优化可降低死区和短流现象，提高整个系统的水力效率，为微生物代谢提供稳定条件，确保氮磷去除率在负荷波动和水质变化情况下保持高水平。结构优化与流程配置协同作用，使脱氮除磷工艺在处理高氮高磷污水时具备更强的稳定性和可靠性。

2.2 不同处理单元组合对效率提升的作用

脱氮除磷效率不仅依赖单一反应器功能，还受多单元组合方式的影响。不同处理单元之间的组合可通过前后端反应区的协同作用增强总反应速率，例如厌氧区提前处理易降解有机物，提升聚磷菌活性，而缺氧区与好氧区的合理衔接可加速硝化和反硝化过程。组合设计需兼顾水力负荷均衡和微生物代谢匹配，确保反应单元间物质转移高效且能量消耗低^[2]。多单元组合还可以形成分级曝气和分段回流策略，使氮磷物质在不同环境条件下充分反应，最大化底物转化率。通过优化组合顺序与容量分配，可提高系统对负荷波动的缓冲能力，减少短时间高浓度负荷对出水水质的冲击。科学单元组合为脱氮除磷工艺

提供多层次优化空间, 实现整体系统效率和稳定性的同步提升。

2.3 优化流程对负荷适应性的增强机制

优化流程设计在提升负荷适应性方面起到关键作用, 通过调整反应区顺序、回流比、停留时间及曝气策略, 实现对氮磷负荷波动的快速响应。改进的流程可在高负荷条件下增加缺氧和厌氧反应时间, 提高微生物对氮磷的处理能力, 同时通过均匀化水力分布和底物浓度梯度, 减少瞬时高浓度对系统的冲击。优化流程还通过强化内循环和分级控制, 提高硝酸盐利用效率及磷释放吸收的同步性, 从而实现反应的连续性和稳定性。结合在线监测与自动调节策略, 可对负荷变化作出即时响应, 微生物活性保持高水平运转。流程优化增强了系统缓冲能力和动态调节性能, 使脱氮除磷工艺在季节性和短期负荷波动下维持高效稳定运行, 同时降低能耗并保证出水水质一致性。

3 运行参数调整及控制策略

3.1 曝气量、停留时间及碳氮比优化

曝气量直接影响好氧区溶解氧水平, 进而决定硝化速率和反硝化底物供给, 合理控制可避免氧气浪费和能耗增加, 同时保证微生物活性稳定。停留时间调整则影响各反应区的反应充分性, 短停留时间易导致底物未完全转化, 长停留时间可能降低系统处理效率和经济性。碳氮比优化通过调控可降解有机碳供应, 确保缺氧区和厌氧区微生物获得足够碳源进行反硝化和聚磷吸收反应, 同时抑制亚硝酸盐和磷残留。三者的综合调控形成协同作用, 可提高氮磷去除效率, 增强系统对负荷波动的适应性, 并在保障出水水质稳定的前提下降低运行能耗, 实现经济性和环境效益的双重优化。

3.2 污泥回流及回流比调控对效果的影响

污泥回流可维持反应区微生物浓度和群落稳定性, 通过调节回流比可控制反应器内硝酸盐、亚硝酸盐及可利用有机碳的分布, 影响脱氮除磷效率。高回流比有助于将硝酸盐送入缺氧区, 提高反硝化速率, 但过高回流比可能引起水力短路和能耗增加, 降低整体系统经济性。低回流比易导致底物积累和微生物活性下降, 影响磷吸收和硝化反应^[3]。精细化控制回流比及回流路径, 使不同反应区底物梯度均匀分布, 实现好氧、缺氧及厌氧阶段协同运转, 保证微生物代谢连续性和系统处理稳定性, 同时优化能耗与运行经济性, 提升工艺适应负荷波动和水质变化的能力。

3.3 在线监测与控制系统在稳定运行中的应用

在线监测与控制系统通过实时采集溶解氧、氨氮、总氮、总磷及 pH 等关键指标, 实现对反应区工艺状态的即时反馈。基于监测数据, 可动态调节曝气量、停留时间、回流比及碳源投加, 实现脱氮除磷过程的自动优化与稳定控制。系统通过智能算法分析水质变化趋势, 可提前识别潜在负荷波动和操作异

常, 提高工艺响应速度和可靠性。在线控制不仅优化了微生物活性与代谢效率, 还能减少能源消耗和化学药剂使用, 提高整体运行经济性。通过连续数据采集与分析, 系统可形成闭环调控, 使脱氮除磷工艺在不同水质和负荷条件下保持稳定高效, 实现出水水质一致性和工艺管理智能化。

4 微生物群落调控与增强效果

4.1 关键脱氮菌与除磷菌的群落结构调节

脱氮除磷过程依赖硝化菌、反硝化菌与聚磷菌的协同作用, 群落结构的优化决定了微生物代谢效率与底物利用率。通过调控反应器厌氧、缺氧和好氧区的环境条件, 可选择性增强特定菌群活性, 实现关键微生物数量和功能的平衡分布。群落结构调整不仅提高硝化速率和反硝化能力, 还促进聚磷菌对可溶性磷的吸收效率, 减少亚硝酸盐和磷残留。微生物群落多样性维持能够增强系统对短期负荷波动和环境扰动的缓冲能力, 使脱氮除磷过程在不同水质条件下保持高效稳定, 保障反应器内部生态平衡和出水水质一致性, 支撑整个工艺的持续优化运行。

4.2 工艺参数对微生物活性的影响

曝气量、停留时间、回流比及碳氮比等工艺参数对微生物活性产生直接影响。溶解氧水平决定硝化菌代谢速率, 碳源供应控制反硝化及聚磷菌的代谢能力, 而停留时间和回流比影响底物与微生物接触充分性^[4]。合理参数组合可增强微生物对底物的利用效率, 提高氮磷去除速率, 降低亚硝酸盐和残磷积累风险。同时, 参数优化可维持群落多样性和功能协同, 增强对环境波动和高负荷冲击的抵御能力。通过精准调控工艺参数, 实现微生物活性在各反应阶段的持续高水平运作, 为脱氮除磷工艺提供稳定、高效的生物学基础。

4.3 微生物调控对出水水质稳定性的提升

微生物群落结构和活性直接决定氮磷去除效果和出水水质稳定性。通过调控反应器内环境条件及工艺参数, 可增强硝化菌、反硝化菌和聚磷菌的协同代谢, 减少亚硝酸盐和可溶性磷残留, 实现氮磷同步去除。群落调控可优化底物利用路径, 提高系统对负荷波动、季节性温度变化及水质扰动的适应性, 保持出水总氮、总磷指标的稳定。稳定的微生物活性和功能分布还可降低沉淀物和污泥膨胀风险, 提升工艺连续运行能力。通过微生物调控, 脱氮除磷过程在高负荷和动态环境下能够保持高效运作, 实现水质指标达标和工艺经济性双重优化。

5 优化效果验证及综合评价

5.1 脱氮除磷效率提升及出水水质分析

优化后的脱氮除磷工艺在氮磷去除效率上表现出显著提升, 污水中总氮和总磷浓度降幅明显, 硝酸盐和亚硝酸盐积累得到有效控制。工艺改进通过反应器结构优化、流程调整及微

生物群落调控,使好氧、缺氧和厌氧阶段的底物利用率均衡,提高反硝化和聚磷吸收速率。水力停留时间和曝气策略的优化增强了反应充分性,使出水水质在不同负荷波动和季节性温度变化条件下保持稳定。微生物活性持续维持高水平,群落结构优化提升了氮磷转化效率,减少了底物残留和副产物形成。整体效果表明,工艺优化不仅提高了处理效率,还增强了系统对环境扰动的适应能力,保证出水水质符合排放标准,并为城市污水处理厂实现稳定运行提供了可靠的技术支撑。

5.2 运行能耗及经济性评估

优化措施在降低运行能耗方面表现突出,通过合理调整曝气量、回流比和停留时间,实现氧气供应与微生物需求的精准匹配,减少不必要的能源消耗。碳源投加与缺氧区调控优化了反硝化效率,降低了额外化学药剂使用,进一步提升系统经济性。反应器结构与流程组合优化减少了死区和短流现象,提高水力利用率,从而在高负荷情况下维持较低能耗水平^[5]。微生物群落调控与活性增强保证了氮磷去除效率高水平运转,避免因效率下降引发的能量和化学品补充。综合评估显示,优化后的工艺在保障出水水质稳定的前提下,实现了能源和运行成本的双向降低,为城市污水处理厂提供了兼顾效率、经济性与可持续性的工艺模式。

参考文献:

- [1] 和笑天,王宏武,李鹏飞,杨丽亚,张潇.AAO工艺大型城市污水处理厂春节期间脱氮优化技术[J].净水技术,2025,44(2):208-215.
- [2] 朱卓,但琼鹏,章雄飞,庞博,彭永臻.城市污水处理厂多级AO分段进水工艺的脱氮性能优化[J].环境工程,2025,43(9):1-8.
- [3] 王雁辉,吕晓丽.污水处理厂新型强化脱氮除磷生物处理工艺应用分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2025(7):043-046.
- [4] 高艳莉.城镇污水处理厂脱氮工艺技术研究与应用[J].化工管理,2025(17):64-67.
- [5] 可华艳.城市污水处理厂脱氮除磷工艺优化研究[J].中国科技期刊数据库工业A,2024(9):0001-0004.

5.3 优化措施的抗冲击能力与可推广性

优化后的脱氮除磷工艺在应对负荷波动、温度变化和水质扰动时表现出较强的抗冲击能力。通过反应器流程合理分配、微生物群落优化及参数精细调控,使系统能够快速响应短期高浓度负荷,维持底物转化效率和出水水质稳定性。工艺组合和控制策略保证了各反应区的协同作用,即便在突发负荷变化下也能避免亚硝酸盐和磷残留积累。优化措施具有模块化特征,结构和流程设计可根据不同规模污水厂进行调整,实现推广应用的可行性。结合在线监测与动态控制系统,工艺运行稳定性和适应性进一步增强,使优化方案在城市污水处理厂中具备广泛适用性,同时保证能效、处理效率和出水水质的一致性,满足环境管理和经济运行双重要求。

6 结语

对城市污水处理厂脱氮除磷工艺优化后的综合评价显示,各项优化措施显著提高了氮磷去除效率与出水水质稳定性,同时有效降低能耗与运行成本。在工艺流程、运行参数和微生物群落结构优化的联合作用下,系统对负荷波动与环境扰动的适应能力明显提升,为高标准排放要求下的污水处理提供了切实可行的技术路径,推动环境治理和资源高效利用的协同发展。