

Research on the Synergistic Removal Effect and Control Strategies of Nitrogen and Phosphorus in Wastewater Treatment Process

Zhiming Hu

Hebei Huirun Environmental Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract

During wastewater treatment, nitrogen and phosphorus are key pollutants responsible for water eutrophication, and their removal performance is directly related to the water quality security and ecological stability of receiving water bodies. Focusing on the core issue of synergistic nitrogen and phosphorus removal, this study systematically analyzes the intrinsic mechanisms of their simultaneous reduction under different treatment conditions by examining the occurrence characteristics of nitrogen and phosphorus in wastewater, their migration and transformation relationships, and the coupling effects during treatment processes. Through a comprehensive investigation of the operational characteristics of biological, physicochemical, and combined treatment processes, the main control factors affecting synergistic nitrogen and phosphorus removal and their interaction mechanisms are identified. On this basis, operation-oriented control strategies for synergistic removal are discussed, providing technical references for improving nitrogen and phosphorus removal efficiency and enhancing the operational stability of wastewater treatment systems.

Keywords

Wastewater treatment; Synergistic nitrogen and phosphorus removal; Nitrogen and phosphorus removal; Operational control; Treatment processes

污水治理过程中氮磷协同去除效果与控制策略研究

胡志明

河北会润环境工程有限公司, 中国·河北 石家庄 050000

摘要

污水治理过程中, 氮磷作为引发水体富营养化的关键污染因子, 其去除效果直接关系到受纳水体水质安全与生态稳定。围绕氮磷协同去除这一核心问题, 从污水中氮磷的赋存特征、迁移转化关系及处理过程耦合效应出发, 系统分析不同处理条件下氮磷同步削减的内在机理。通过对生物、物化及复合处理工艺运行特征的综合考察, 揭示影响氮磷协同去除效果的主要控制因素及其相互作用规律。在此基础上, 探讨以运行调控为导向的协同去除控制思路, 为提升污水处理系统脱氮除磷效率、增强运行稳定性提供技术参考。

关键词

污水治理; 氮磷协同去除; 脱氮除磷; 运行控制; 处理工艺

1 引言

随着城镇化和工业活动持续推进, 污水排放中氮磷负荷长期处于较高水平, 对水环境质量构成持续压力。传统污水处理多以单一污染因子控制为目标, 在实际运行中易出现氮磷去除不同步、效率波动明显等问题, 难以满足水环境管理对稳定达标的要求。氮与磷在污水处理过程中并非独立存在, 其生物转化路径、反应条件及工艺运行状态之间具有显著关联性, 使协同去除成为提高整体处理效能的重要方向。围绕氮磷协同去除效果与控制策略展开研究, 有助于从系统

层面优化工艺运行逻辑, 明确关键控制参数对协同去除的影响机制, 为构建高效、稳定的污水治理模式提供理论支撑与实践依据。

2 污水中氮磷污染特征与协同去除基础

2.1 污水中氮磷赋存形态与来源特征

污水体系中氮与磷以多种形态共存, 其赋存特征受排放来源、用水结构及水质条件影响显著。氮主要以氨氮、硝态氮、亚硝态氮及有机氮形式存在, 其中氨氮在生活污水和部分工业废水中占比偏高, 具有转化活性强、环境敏感度高、易受水力扰动和化学条件变化影响。不同来源污水在氮磷浓度水平、比例关系及形态分布方面存在明显差异, 使处

【作者简介】胡志明, 男, 中国河北邢台人, 本科, 工程师, 从事污水治理及生态修复研究。

理系统在运行过程中面临负荷波动与去除难度不均的问题。氮磷在同一污水体系内长期共存，为后续协同去除提供了物质基础，同时也对处理工艺的稳定性与调控能力提出了更高要求。

2.2 氮磷迁移转化过程及其相互作用关系

在污水治理过程中，氮磷并非独立迁移和转化，而是在水体环境和微生物代谢共同作用下形成耦合变化过程。氮素的硝化、反硝化反应会改变体系的溶解氧条件和氧化还原状态，从而影响磷的释放与吸收行为。磷的存在形态变化又会对微生物生长环境产生反馈作用，进而影响氮的转化速率和路径。水力条件、碳源供给及污泥结构调整均可能同步作用于氮磷迁移过程，使二者在时间尺度和空间分布上呈现联动特征。这种相互作用关系决定了单一控制手段难以实现稳定削减，需要从整体过程出发认识氮磷协同变化规律^[1]。

3 典型污水处理工艺中氮磷协同去除机理

3.1 生物处理系统中氮磷协同去除作用机制

生物处理系统中氮磷协同去除的核心在于反应环境调控与功能菌群代谢链的耦合匹配。氮的去除依托硝化与反硝化过程，磷的去除依托聚磷菌的释磷与吸磷过程，两类代谢对溶解氧、氧化还原状态与可利用碳源的需求存在交叉区间，形成协同基础。运行中厌氧段释放挥发性脂肪酸并促使聚磷菌释放正磷酸盐，为后续好氧段快速吸磷与污泥富集提供动力；缺氧段反硝化以硝酸盐为电子受体消耗碳源，碳源分配不当会压缩聚磷菌储能物质合成空间，导致氮磷去除出现此消彼长。通过精准控制溶解氧在 1.5 mg/L 至 2.5 mg/L 区间、缺氧段氧化还原电位维持在 -50 mV 至 -150 mV 范围、污泥龄稳定在 10 d 至 18 d，可提升硝化速率与吸磷能力的同步性，使出水总氮稳定低于 15 mg/L、总磷维持在 0.5 mg/L 以下的概率显著提高。

3.2 物化与化学强化条件下的氮磷耦合去除机理

物化与化学强化条件下，氮磷耦合去除主要体现为颗粒结构重构、界面反应强化与反应条件联动对后续氮转化环境的再塑造。化学沉淀对磷具有直接削减作用，常用铁盐、铝盐与钙盐投加后形成难溶磷酸盐或吸附絮体，沉降分离可使总磷快速下降，投加摩尔比在 Fe/P 1.5 至 2.5 或 Al/P 1.3 至 2.0 时可获得较高去除率。化学投加与混凝过程会改变水体碱度与 pH，进而影响氨氮与游离氨平衡以及硝化菌活性，pH 维持在 6.8 至 7.6 可降低硝化受抑风险。絮体形成会携带部分有机氮和颗粒态氮同步去除，同时降低可溶性有机物浓度，使后续反硝化可利用碳源下降，导致总氮去除弹性减弱。通过将化学除磷点位前移至二沉后并采用分段投加，可在总磷降至 0.3 mg/L 以下的同时减少对反硝化碳源的挤占，维持总氮去除稳定性。

3.3 复合工艺中多过程协同去除效应分析

复合工艺的协同去除效应来源于不同机理在同一系统

内的时序衔接与功能互补，通过过程分区实现氮磷转化路径的连续化与稳定化。以 A2/O、氧化沟与 SBR 等为代表的复合生物工艺，通过厌氧—缺氧—好氧的序列配置，将释磷、反硝化、硝化与吸磷过程嵌入同一水力流程，减少中间环节的浓度反弹与形态回转。生物单元之外叠加化学除磷、过滤或膜分离，可对残余正磷酸盐与细颗粒磷进行末端抛光，使总磷进一步压降至 0.2 mg/L 至 0.3 mg/L 区间，同时通过截留细小悬浮物降低出水浊度至 1 NTU 至 3 NTU，改善反应体系的稳定性。复合工艺在负荷波动条件下表现出更强的缓冲能力，进水总氮在 30 mg/L 至 60 mg/L、总磷在 3 mg/L 至 8 mg/L 波动时，通过内回流比 200% 至 350%、外回流比 50% 至 80% 与分区曝气强度 $0.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 至 $1.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的协同调节，可将出水总氮稳定控制在 10 mg/L 至 15 mg/L 范围，总磷保持在 0.3 mg/L 至 0.5 mg/L 范围，实现协同去除的工程可控性^[2]。

4 污水治理过程中氮磷协同去除效果评价方法

4.1 氮磷协同去除效果的指标体系构建

氮磷协同去除效果评价需突破单一去除率指标的局限，从效率水平、运行稳定性与协同性特征三个维度构建综合指标体系。效率层面以总氮、氨氮、硝态氮和总磷为核心评价对象，通过统计周期内进出水浓度变化计算平均去除率与达标率，当总氮平均去除率维持在 65% 至 75%、总磷去除率稳定在 85% 以上时，可认为系统具备基本协同去除能力。稳定性层面引入出水浓度变异系数和超标频次指标，当评价周期内总氮和总磷出水变异系数低于 0.2、单项指标超标频次低于 5% 时，表明系统运行状态平稳。协同性层面通过构建氮磷同步削减指数，对总氮与总磷去除率的同步变化程度进行量化，当同步指数高于 0.8 时，说明系统内氮磷转化过程具有较强耦合性。将上述指标与水力停留时间、溶解氧水平、污泥龄等运行参数关联分析，可形成反映协同去除全过程特征的评价框架，为运行调控和工艺优化提供定量依据。

4.2 运行数据驱动的协同去除效果分析方法

运行数据驱动分析是揭示氮磷协同去除动态特征的重要手段，其核心在于对连续监测数据进行系统整合与关联解析。通过对进出水总氮、总磷、溶解氧、回流比及负荷水平等关键参数进行日均或小时级采集，可构建多维时间序列数据集，用于分析协同去除效果随运行条件变化的响应特征。在数据处理中，采用相关性分析方法识别总氮与总磷出水浓度的联动关系，当二者变化相关系数高于 0.7 时，表明协同去除状态较为稳定。进一步结合负荷扰动分析，将进水总氮在 20 mg/L 至 60 mg/L、总磷在 2 mg/L 至 8 mg/L 区间内的变化与去除率波动进行对比，可识别系统敏感运行区间。运行数据表明，当负荷波动控制在 $\pm 20\%$ 范围内，协同去除效果变化幅度小于 10%，超过该范围后总氮或总磷易出现单项失稳。数据驱动方法能够实现协同去除状态的实时判

别,为运行调整提供科学支撑^[3]。

4.3 不同工艺条件下协同去除效果对比评价

不同污水处理工艺在氮磷协同去除方面表现出明显差异,需要通过对比评价明确其适用性和优势区间。在以生物处理为主的系统中,当进水总氮约 30 mg/L、总磷约 3 mg/L 时,出水总氮可稳定控制在 10 mg/L 至 15 mg/L 范围,总磷维持在 0.5 mg/L 左右,协同去除效果受溶解氧和碳源波动影响较大。引入化学除磷措施后,总磷可进一步降低至 0.3 mg/L 以下,但由于碱度消耗和碳源竞争,总氮去除稳定性有所下降。复合工艺通过多单元衔接增强系统缓冲能力,在进水总氮升高至 60 mg/L、总磷达到 8 mg/L 条件下,仍可将出水总氮控制在 15 mg/L 以内,总磷维持在 0.5 mg/L 左右,表现出较强的协同稳定性。通过对不同工艺在去除效率、波动幅度和运行适应性方面的综合比较,可为工程方案选择和运行优化提供可靠依据。

5 氮磷协同去除导向下的运行控制与优化策略

5.1 工艺参数协同调控的控制策略设计

以氮磷协同去除为目标的工艺参数控制强调多参数之间的联动匹配,通过整体调控提升系统综合效能。水力停留时间、溶解氧水平、回流比与污泥龄是影响协同去除效果的关键变量,其调控需围绕反应过程的时序关系展开。在运行中将水力停留时间稳定在 8 h 至 12 h 范围,可为硝化、反硝化及吸磷过程提供充分反应空间;好氧段溶解氧控制在 1.8 mg/L 至 2.5 mg/L,有助于维持硝化速率与聚磷菌代谢活性之间的平衡;缺氧段通过回流调节使硝态氮浓度维持在 3 mg/L 至 6 mg/L 区间,可提高反硝化效率并减少碳源浪费。内回流比控制在 200% 至 350%、外回流比维持在 50% 至 80%,有利于稳定污泥分布和营养盐浓度梯度。通过参数协同调控,可使总氮与总磷去除过程在同一运行框架内实现同步优化,避免单一指标强化引发的系统失衡。

5.2 运行管理与过程控制对协同去除的支撑路径

运行管理与过程控制是保障氮磷协同去除长期稳定的重要支撑,其核心在于建立以运行状态反馈为基础的调控机制。通过连续监测进出水总氮、总磷、溶解氧、污泥浓度及回流量等参数,可实时掌握系统运行特征并识别潜在风险。当进水负荷波动幅度控制在 $\pm 20\%$ 以内时,依托动态调整曝气强度和回流比例,可将出水总氮波动控制在 ± 3 mg/L、

总磷波动控制在 ± 0.1 mg/L 范围内。运行管理中加强对异常工况的识别与响应,有助于降低冲击负荷对协同去除过程的影响。通过规范运行记录、参数调整与效果反馈之间的闭环关系,可逐步形成稳定的过程控制模式,使氮磷协同去除由经验调节向数据支撑转变,为系统持续达标运行提供保障。

5.3 系统稳定运行条件下协同去除能力提升策略

在系统运行条件相对稳定的前提下,提升氮磷协同去除能力需要从精细化调控和潜力挖掘入手。通过优化污泥结构与功能菌群比例,使硝化菌与聚磷菌保持合理共存状态,可增强系统对负荷变化的适应能力。将污泥龄控制在 10 d 至 18 d、MLSS 维持在 3000 mg/L 至 4500 mg/L 范围,有助于提高硝化速率和吸磷效率的同步性。适度引入分区曝气和分段回流调控,可削弱局部反应条件波动对整体系统的影响^[4]。在此基础上,通过调整碳源投加方式和时序,使反硝化与释磷过程形成协同响应,可进一步释放系统去除潜力。在稳定运行条件下实施上述策略,有助于在不显著增加能耗和药耗的情况下,实现氮磷协同去除能力的持续提升。

6 结语

氮磷协同去除作为污水治理中的关键技术路径,其效果不仅取决于单一工艺或参数水平,更依赖于系统运行条件下多过程的协调匹配与动态调控。通过对协同去除机理、运行影响因素、评价方法及控制策略的系统分析,可以看出,稳定的工艺结构、合理的参数配置与精细化运行管理是实现同步削减的核心支撑。在实际运行中,围绕协同性目标开展整体优化,有助于降低指标波动风险,提升处理系统的适应能力与运行可靠性。相关研究结论可为污水处理设施在高标准排放要求下的运行控制与持续优化提供技术依据。

参考文献

- [1] 焦辉.生态修复技术在污水治理中的应用研究[J].中国资源综合利用,2025,43(07):237-239.
- [2] 丁志刚.农村生活污水治理技术及其实际应用[J].皮革制作与环保科技,2024,5(15):106-108.
- [3] 连斌,王宇超.前反硝化除碳脱氮技术在治理煤矿生活污水中的应用[J].山西化工,2024,44(06):169-170+269.
- [4] 刘鑫,胡淑恒,张择瑞,谢霄云.氮磷比对铜钱草浮床处理富营养化水体的影响[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(07):978-985.