

# 低温条件下改良 A<sup>2</sup>/O 工艺对城镇污水总氮去除效率的影响分析

蒋 盟

中国葛洲坝集团生态环保有限公司 湖北 武汉 430030

**【摘要】**：低温显著抑制传统 A<sup>2</sup>/O 工艺中微生物活性，导致城镇污水处理系统总氮去除效率下降，难以稳定达标。针对此问题，研究聚焦低温条件下改良 A<sup>2</sup>/O 工艺的优化路径，通过强化内循环、优化碳源分配、引入功能菌群及调整运行参数等手段提升脱氮性能。改良工艺在水温 8~12℃ 时总氮去除率较传统工艺提高 25% 以上，出水总氮稳定低于 15mg/L。系统分析了各改良措施对硝化、反硝化过程的促进机制，验证了其在寒冷季节运行的稳定性与可行性，为高寒地区城镇污水处理提供了有效技术方案。

**【关键词】**：低温条件；改良 A<sup>2</sup>/O 工艺；总氮去除；城镇污水；脱氮效率

DOI:10.12417/2811-0528.25.21.075

## 引言

冬季低温导致微生物代谢能力下降，传统生物脱氮工艺面临硝化不彻底、反硝化效率低等严峻挑战，出水总氮超标风险显著增加。如何在寒冷气候下维持高效稳定的脱氮性能，已成为城镇污水处理领域的技术瓶颈。改良 A<sup>2</sup>/O 工艺通过结构优化与运行调控，展现出应对低温冲击的潜力。本文旨在探讨其在低温环境中的脱氮机制与实际应用效果，为提升寒冷地区污水处理厂运行效能提供科学依据与工程参考。

## 1 低温对 A<sup>2</sup>/O 工艺脱氮性能的抑制机制

低温环境对 A<sup>2</sup>/O 工艺脱氮性能的抑制主要源于微生物生理活性的显著下降。在传统 A<sup>2</sup>/O 系统中，硝化过程由自养型硝化细菌主导，其最适生长温度通常在 25~35℃ 之间。当水温降至 15℃ 以下时，氨氧化菌 (AOB) 和亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 的比增长速率明显降低，导致氨氮氧化效率下降，硝化反应速率减缓。温度每降低 10℃，硝化反应速率可下降 50% 以上。在 8~12℃ 的典型低温区间，硝化段停留时间不足时，极易出现氨氮积累现象，直接影响后续反硝化过程的电子受体供应，进而削弱整体脱氮能力。

反硝化过程同样受到低温的严重制约，尤其是异养型反硝化菌的代谢活性和底物利用速率显著降低。在缺氧区，低温条件下微生物对有机碳源的利用效率下降，胞外聚合物 (EPS) 分泌减少，影响菌胶团的凝聚与传质性能，导致反硝化速率降低。低温还可能改变污泥的沉降性能和混合液回流比的匹配关系，进一步影响系统内氮素的转化路径。聚磷菌 (PAOs) 在低温下的释磷和吸磷能力也会减弱，间接干扰厌氧段的挥发性脂肪酸 (VFA) 分配，使反硝化菌在碳源竞争中处于劣势，加剧了脱氮除磷的耦合失衡问题。

为应对上述挑战，改良 A<sup>2</sup>/O 工艺通过优化水力停留时间 (HRT)、调整污泥回流比 (R) 与混合液内回流比 (IR)、

补充外加碳源 (如乙酸钠、甲醇) 以及投加耐冷菌剂等手段进行适应性调控。部分工程实践还采用分段进水、多点回流或生物膜耦合方式增强系统抗低温能力。这些措施旨在改善微生物生存环境，提升功能菌群丰度与活性，从而在低温条件下维持较高的总氮去除率，保障出水水质稳定达标。结合在线监测与智能控制系统，实现对溶解氧、碳源投加量及回流参数的精准调控，进一步提升系统运行的稳定性与抗冲击负荷能力，降低能耗与药耗，推动污水处理工艺向高效低碳方向发展。

## 2 改良 A<sup>2</sup>/O 工艺的构建及其低温脱氮强化路径

为应对低温环境下传统 A<sup>2</sup>/O 工艺脱氮效能下降的问题，改良型 A<sup>2</sup>/O 工艺在结构配置与运行策略层面进行了系统性优化。通过增设预缺氧区、实施多点进水模式、优化池容比及调整回流路径，增强了系统对碳源的合理分配与利用效率。在寒冷地区实际工程中，常采用分段进水 A<sup>2</sup>/O 工艺，将原水按比例分配至厌氧、缺氧及预缺氧段，既避免了易降解有机物在厌氧段被聚磷菌过度消耗，又保障了缺氧区反硝化所需的充足电子供体。提高混合液内回流比至 200%~300%，可有效增加硝酸盐氮向缺氧区的输送量，缓解因硝化减弱导致的电子受体不足问题，提升整体反硝化能力。

在生物强化方面，投加耐冷型功能菌群成为提升低温脱氮性能的重要技术路径。筛选具有低温适应性的硝化菌群 (如 *Nitrosomonas cryotolerans*) 和高效反硝化菌 (如 *Pseudomonas stutzeri*) 进行生物增效，可显著改善系统在 8~15℃ 条件下的氮素转化速率。部分污水处理厂还引入移动床生物膜反应器 (MBBR) 与 A<sup>2</sup>/O 工艺耦合，在好氧区投加悬浮填料以富集耐冷硝化菌，形成“活性污泥-生物膜”复合体系，增强硝化段的抗低温冲击能力。通过精准控制溶解氧 (DO) 浓度，维持厌氧区 <0.3mg/L、缺氧区 0.5mg/L 左右、好氧区 2.0~3.0mg/L，优化氧化还原电位 (ORP) 梯度分布，有利于各功能区微生物的协同作用。

化学与智能调控手段的引入进一步提升了改良工艺的运行稳定性。针对原水碳氮比偏低的城镇污水,适时补充乙酸钠或葡萄糖等外加碳源,可有效提高缺氧区的反硝化潜力,确保总氮达标。结合在线水质监测与模型模拟(如ASM系列模型),实现对回流比、曝气量、加药量的动态调控,提升系统在低温季节的自适应能力。通过上述多维度强化措施,改良A<sup>2</sup>/O工艺在冬季低温条件下仍能维持较高的脱氮效率,为寒冷地区城镇污水处理提供了可靠的技术支撑。智能控制策略的应用显著降低了药剂浪费与过度曝气带来的能耗,提升了运行管理的精细化水平,增强了系统应对水质水量波动的能力,推动污水处理向智慧化、低碳化方向发展。

### 3 改良工艺在低温城镇污水处理中的效能验证

为系统评估改良A<sup>2</sup>/O工艺在低温条件下的实际运行效果,多项中试及工程示范项目在北方寒冷地区城镇污水处理厂开展,监测周期覆盖冬季低温时段(水温8~14℃)。相较于传统A<sup>2</sup>/O工艺出水总氮普遍在18~25mg/L的水平,改良工艺通过优化内回流比、补充乙酸钠作为外碳源并结合MBBR填料投加,在相同进水负荷下水总氮稳定控制在12~15mg/L以下,平均去除率提升至75%以上,部分工况可达80%以上。氨氮去除率维持在90%以上,硝化液回流中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度得到有效控制,缺氧区反硝化脱氮量显著增加,系统氮平衡分析证实外加碳源的利用率提高,未出现明显副产物积累现象。

在污泥特性与微生物群落层面,改良工艺展现出更强的低温适应性。低温运行期间,改良系统污泥沉降性能(SVI值)保持在80~110mL/g,未出现明显膨胀,而传统系统SVI常升至130mL/g以上,影响固液分离效率。改良工艺中氨氧化菌

(AOB)如Nitrosomonas相对丰度提高至2.5%以上,明显高于传统系统的1.2%;反硝化菌属如Denitratisoma和Thauera在缺氧区的占比也显著上升,表明功能菌群得到有效富集。生物膜载体表面形成稳定的硝化生物膜,其胞外聚合物(EPS)中蛋白质/多糖比值升高,增强了低温下的生物膜结构稳定性与传质效率。这些微生物学特征的变化为脱氮性能的提升提供了内在支撑。

长期运行稳定性与能耗分析进一步验证了改良工艺的工程可行性。在连续6个月的低温运行中,改良A<sup>2</sup>/O系统出水水质达标率超过95%,抗冲击负荷能力明显增强,即使进水TN波动在40~60mg/L之间,系统仍能维持出水稳定。虽然外加碳源和增强曝气导致运行成本略有上升,但通过智能控制系统优化曝气量(DO反馈调节)和碳源投加点(基于ORP和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N在线监测),实现了药耗与能耗的精细化管理。改良工艺在保障出水总氮达标的具备良好的可操作性与环境适应性,已在多个北方城镇污水处理厂成功应用,为寒冷地区污水处理设施的提标改造提供了成熟可靠的技术路径。

### 4 结语

本文系统探讨了低温条件下改良A<sup>2</sup>/O工艺对城镇污水总氮去除效率的影响机制与技术路径。通过分析低温对硝化反硝化过程的抑制作用,构建了以优化运行参数、强化碳源利用和生物功能菌群调控为核心的改良工艺体系,并通过实际运行数据验证了其在寒冷季节的脱氮效能与稳定性。改良A<sup>2</sup>/O工艺能有效缓解低温带来的脱氮瓶颈,显著提升总氮去除率,保障出水水质稳定达标,具有良好的工程应用前景,为高寒地区污水处理厂的提标改造提供了可靠的技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 刘志宏,陈晓蕾.低温条件下改良A<sup>2</sup>/O工艺脱氮性能及微生物群落特征[J].中国给水排水,2022,38(12):45-51.
- [2] 孙文博,黄雅婷.外碳源投加策略对低温污水反硝化过程的影响研究[J].环境工程学报,2021,15(7):2312-2319.
- [3] 赵振宇,林雪梅.MBBR耦合A<sup>2</sup>/O工艺在北方污水处理厂低温运行中的应用[J].给水排水,2023,49(4):68-74.