

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.11.009

低温条件下BAF运行效能提升中试

盛亮¹, 胡朵云², 胡丹¹, 王宗平², 林浩¹, 苗蕾²,
黄峰²

(1. 武汉市城市排水发展有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 华中科技大学 环境科学与工程
学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 针对汤逊湖污水处理厂三期曝气生物滤池(BAF)在冬季运行效能不佳的问题, 搭建了三组平行的BAF中试装置, 在低温(16~18℃)条件下, 考察了碳源种类及投加量、气水比和碱度等关键工艺参数对脱氮效能的影响。结果表明, 复合碳源(主要成分为乙醇, 另含少量甲醇等物质)的效果优于乙酸钠, 其碳氮比控制在6时处理效果最佳。当气水比为4以及补充2倍碱度时, 总氮和氨氮去除率分别达到72.61%和92.97%。因此, 正确的碳源选择、合理的碳氮比调控、优化的气水比设定以及充足的碱度补充, 可显著提升BAF系统的反硝化效率和硝化稳定性。

关键词: 曝气生物滤池; 低温; 生活污水; 脱氮; 碳氮比; 气水比

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)11-0066-06

Pilot-scale Study on Performance Enhancement of BAF Operation under Low-temperature Conditions

SHENG Liang¹, HU Duoyun², HU Dan¹, WANG Zongping², LIN Hao¹,
MIAO Lei², HUANG Feng²

(1. Wuhan Urban Drainage Development Co. Ltd., Wuhan 430010, China; 2. College of
Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan
430070, China)

Abstract: To address the issue of poor performance in the biological aerated filter (BAF) of the third phase at the Tangxun Lake Wastewater Treatment Plant under low-temperature winter conditions, this study established three parallel pilot-scale BAF units to systematically investigate the impacts of key operational parameters including carbon source type, carbon source dosage, air-to-water ratio, and alkalinity on nitrogen removal efficiency during winter. The results demonstrated that a composite carbon source which was primarily composed of ethanol with trace amounts of other substances such as methanol outperformed sodium acetate, with optimal treatment efficacy achieved at a controlled C/N ratio of 6, and under this condition, an air-to-water ratio of 4 coupled with supplementation of two times the alkalinity enabled total nitrogen (TN) and ammonia nitrogen (NH₄⁺-N) removal efficiencies to reach 72.61% and 92.97%, respectively. Therefore, correct carbon source selection, reasonable carbon-to-nitrogen ratio regulation, optimized air-to-water ratio setting, and sufficient alkalinity supplementation can significantly improve the denitrification efficiency and nitrification stability of BAF systems.

通信作者: 黄峰 E-mail: 2782149593@qq.com

Keywords: biological aerated filter; low-temperature; domestic wastewater; nitrogen removal; carbon-to-nitrogen ratio; air-to-water ratio

曝气生物滤池(BAF)作为第三代生物膜法的代表工艺之一,结合了滤料的物理吸附和生物氧化分解功能,简化了操作流程,省去了沉淀池,使得占地面积较小。此外,它还具有不易受水质和水量波动影响、维护管理方便、运行费用低等优点^[1-3]。但在低温条件下,硝化菌及反硝化菌等关键功能微生物的增殖速率和活性将会降低,导致BAF出现脱氮效果不稳定、处理效果变差等问题^[4-5]。

武汉汤逊湖污水处理厂总规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其三期工程采用BAF工艺,处理规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,主要包括高密度沉淀池、前置反硝化生物滤池、硝化生物滤池、后置反硝化生物滤池、高速气浮等单元。在实际运行中受冬季低温影响,出水 NH_4^+-N 、TN浓度偶尔不达标。针对此现象,该厂通过降低处理水量来提高出水水质,但出水TN浓度还是偶尔高于 15 mg/L ,有时甚至达到 18 mg/L ;氨氮偶尔超过 1.5 mg/L ,有时甚至达到 3 mg/L 以上。分析原因可能为:低温条件下生物活性降低,硝化菌及反硝化菌无法在现有工艺参数下高效工作;碳源投加不足或者利用不充分,导致反硝化不彻底;曝气和碱度不足导致氨氮硝化不彻底。针对此问题,采用中试装置模拟汤逊湖污水处理厂三期BAF,通过改变外加碳源种类、碳氮比(C/N)、气水比和碱度等工艺参数,考察了对脱氮效果的改善情况,以期对存在类似问题的污水处理厂提供参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验装置及进水水质

中试使用三套平行装置,每套包含三根上向流碳钢滤柱,填充粒径为 $1 \sim 6 \text{ mm}$ 的陶粒滤料,配备气水反冲系统(见图1)。中试进水量为 $20 \text{ m}^3/\text{d}$,前置反硝化滤柱、硝化滤柱、后置反硝化滤柱规格均为 $\varnothing \times H = 0.325 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$,陶粒填料高度为 2.7 m ,鹅卵石垫层厚度为 0.3 m 。

BAF进水取自汤逊湖污水处理厂(三期)高密度沉淀池出水。长期监测显示,进水COD、 NH_4^+-N 、TN平均浓度分别为 215 、 35 、 41 mg/L ,pH为 $6.8 \sim 8.5$ (平均值为 7.2)。低温条件下,中试BAF出水COD、 NH_4^+-N 、TN浓度目标限值分别为 50 、 5 、 10 mg/L 。

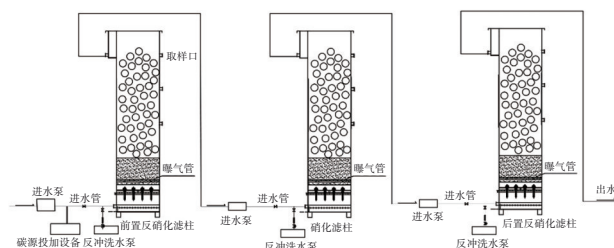


图1 中试装置示意

Fig.1 Schematic diagram of pilot-scale setup

1.2 挂膜启动及试验方法

1.2.1 挂膜启动

生成稳定的生物膜是曝气生物滤池正常运行的关键^[6]。生物驯化阶段,BAF进水温度为 $16 \sim 18^\circ\text{C}$,采用接种挂膜法启动,向滤柱内注入汤逊湖污水处理厂A²O工艺污泥与原水,静置 3 d 。第4天后开始小流量运行,保持水量为 $0.24 \text{ m}^3/\text{d}$,逐步提升水力负荷至设计值的 10% ($2 \text{ m}^3/\text{d}$),到第7天开始测定COD和TN浓度。当COD和TN去除率分别稳定在 70% 和 50% 以上时,遂认为生物驯化完成。

1.2.2 试验方法

试验共分为两个阶段。在第一阶段,考察了复合碳源和乙酸钠的反硝化脱氮效果,并确定两种碳源的最佳投加量。中试使用的复合碳源与汤逊湖污水处理厂三期工程一致,主要成分为乙醇,另含少量甲醇等物质。试验包含两个周期,每个周期运行 15 d ,三套中试装置(A、B、C)的碳氮比分别为 5 、 6 、 7 ,第一个周期均投加复合碳源,第二个周期均投加乙酸钠。气水比(2.5)和碱度与污水厂一致。

在第一阶段所确定的最佳碳源种类及投加量条件下进行第二阶段试验,探究改变气水比及碱度等参数对BAF运行处理效果的影响,确定BAF运行的最佳碱度及气水比。试验也分为两个周期,每个周期运行 15 d 。第一个周期在 1 倍碱度的条件下,调整三套中试装置的气水比分别为 3 、 4 、 5 ;第二个周期的气水比仍为 3 、 4 、 5 ,控制碱度为硝化所需碱度理论值的 2 倍。

1.3 分析项目及方法

COD:重铬酸钾法; NH_4^+-N :纳氏试剂分光光度法;TN:碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法;浊度:

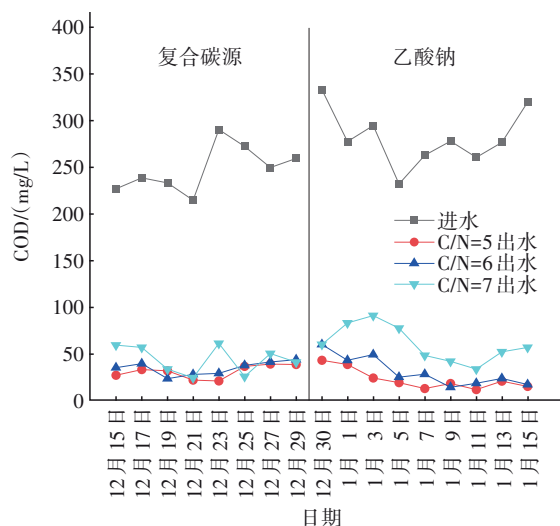
分光光度法。

2 结果与讨论

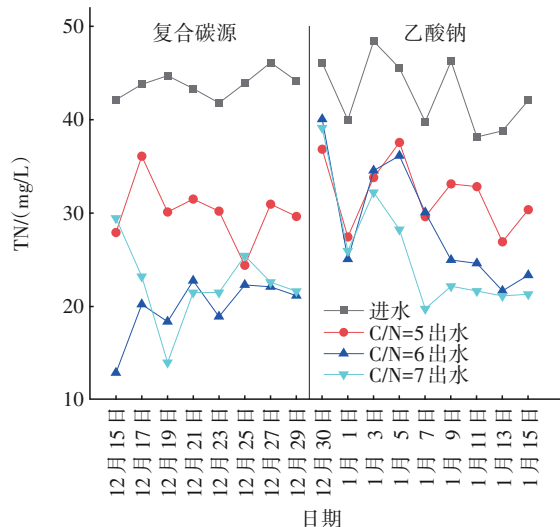
2.1 碳源种类及投加量对处理效果的影响

2.1.1 碳源的影响及C/N优化

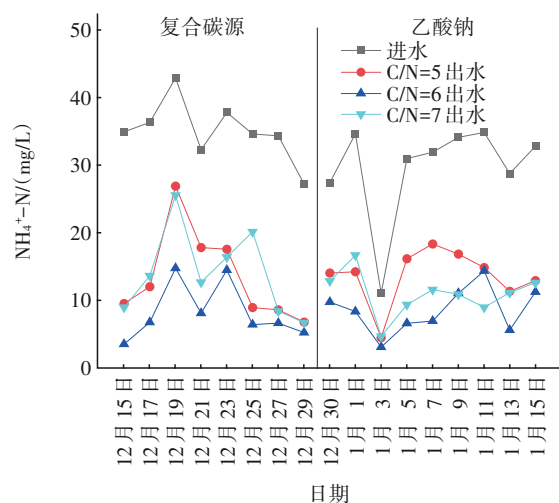
不同碳源及C/N条件下,BAF对COD、TN、 NH_4^+-N 的去除效果如图2所示。由图2(a)可知,当采用复合碳源时,在碳氮比分别为5、6和7的条件下,COD的平均去除率分别为87.37%、85.92%和82.19%。碳氮比由5增加到6时,COD去除率有所下降,过量投加碳源易导致出水COD浓度超标和不稳定^[7],如C/N为7时,部分出水COD超过50 mg/L,有碳源穿透风险。当以乙酸钠作为碳源时,在碳氮比分别为5、6、7条件下,COD平均去除率分别为92.04%、89.10%和78.27%。与投加复合碳源时类似,碳氮比为7时存在COD去除率明显下降的情况。



a. COD去除效果



b. TN去除效果



c. NH_4^+-N 去除效果

图2 不同碳源和C/N条件下的污染物去除效果对比

Fig.2 Comparison of pollutants removal under different carbon sources and C/N ratios

曝气生物滤池的总氮去除效果受碳氮比影响显著。由图2(b)可知,当投加复合碳源时,TN去除率随碳氮比的提高先升高后趋于稳定。当C/N=6时,TN平均去除率可达到52.93%,相较于C/N=5时的29.48%有显著提升,此结果与文献报道一致,即适量的碳源为反硝化菌提供了充足的电子供体,从而促进了反硝化作用^[8]。然而,当C/N进一步增至7时,TN去除率略微下降至48.00%,推测其原因是进水COD负荷过高,促使反应器内异养菌大量繁殖,抑制了自养菌的生长,进而导致硝化性能下降,氮氮向硝态氮的转化效率降低,最终影响了系统的整体脱氮效果。

在采用乙酸钠为碳源条件下,TN去除效果差异显著。随着碳氮比的提高,TN去除率增加。当碳氮比分别为5、6、7时,TN平均去除率分别为25.07%、32.72%和40.27%。这一现象主要归因于乙酸钠对反硝化过程的调控作用:当C/N=5时,碳源不足限制了反硝化菌的电子供体供应;当C/N=6时,碳氮比例趋于平衡,碳源供应能够充分满足反硝化过程的理论需求,使得反硝化效率显著提升;而当C/N=7时,过量碳源可能通过扩大生物膜内部缺氧区、增强异养菌同化作用或优化溶解氧分布,进一步提升了TN去除率。BAF的生物膜结构缓解了高碳氮比下硝化与反硝化过程的竞争,同时乙酸钠的快速降解特性也避免了碳源残留。因此,适当提高碳氮比至6~7,可提高BAF对总氮的去除率。

由图2(c)可知,投加复合碳源时,在碳氮比分别为5、6的条件下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率分别为59.53%和74.44%,而继续提高碳氮比至7时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率反而下降至59.26%。当投加乙酸钠时,在碳氮比分别为5、6、7的条件下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率分别为54.05%、71.31%和62.33%。不同碳氮比条件下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均保持了较高的去除率,以 $\text{C/N}=6$ 时为最优,且整体较为稳定。这说明持续曝气带来的好氧环境,有利于硝化菌和氨氧化菌的硝化作用,且受碳氮比变化影响较小,因为氨氧化菌为化能自养菌,其活性主要受曝气条件影响,而非碳源。

综上所述,投加适量的碳源有助于反硝化作用,提高TN去除率。然而,硝化菌属于自养菌,碳源过量可能会导致异养菌过度繁殖,进而通过竞争性作用抑制硝化菌的活性,破坏微生物种群平衡,最终降低 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效率。因此,碳氮比的优化对于维持高效的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除至关重要。根据试验结果, $\text{C/N}=6$ 时 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果最佳,达到74.44%,这表明在此条件下,曝气生物滤池中的硝化微生物种群和环境条件达到了最佳平衡。因此,在投加复合碳源的条件下,碳氮比为6时,曝气生物滤池在去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和COD方面实现了良好的平衡,同时保持了TN的高效去除,是相对理想的运行条件。

2.1.2 最佳参数下不同碳源的脱氮效能对比

由2.1.1节可知,对于TN的去除而言,采用复合碳源和乙酸钠的最佳 C/N 分别为6和7;对于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除而言,两种碳源条件下的最佳 C/N 均为6。在最佳 C/N 条件下,两种碳源对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的去除效果见图3。在运行初期,复合碳源的TN去除率显著优于乙酸钠,运行约7 d后二者逐渐持平。投加复合碳源与乙酸钠的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率均可达到60%以上。投加复合碳源时,TN平均去除率为52.93%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率为74.44%;投加乙酸钠时,TN平均去除率为40.27%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率为62.33%。这表明当采用复合碳源且碳氮比为6时,既能高效去除总氮,在氨氮去除率上也表现出一定优势。根据前期调研,复合碳源中存在小分子醇等其他营养成分,会被反硝化菌优先利用,且能提供更为全面的营养支持,使其更高效地进行反硝化反应^[9],与本试验结果一致。

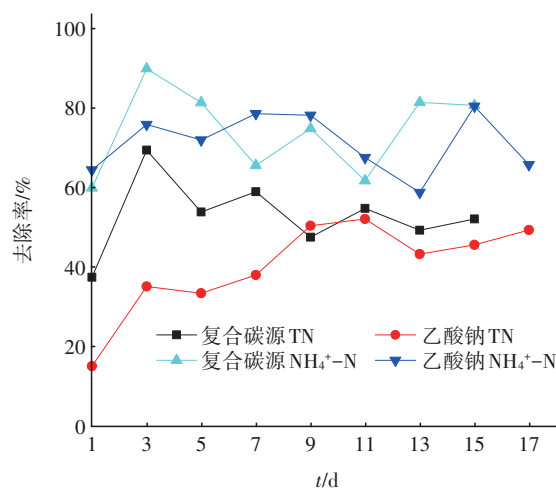


图3 最佳参数条件下不同碳源的TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果对比

Fig.3 Comparison of nitrogen removal performance under optimal operational parameters for various carbon sources

2.2 气水比与碱度的影响

基于2.1节确定的最佳碳源条件,即投加复合碳源并控制碳氮比为6,分别在1倍和2倍碱度(214、428 mg/L,以 CaCO_3 计)的条件下,设置气水比为3、4、5进行对比试验,考察其对TN及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除的影响。

2.2.1 1倍碱度下气水比对脱氮效能的影响

在1倍碱度下,不同气水比时的TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果对比见图4。从TN去除效果来看,随着气水比的提高,TN去除率先升后降。当气水比为3时,TN去除率为52.93%;当气水比升至4时,TN去除效果达到最佳,去除率为64.62%。周广吉等^[10]研究表明,气水比为4时,曝气生物滤池中溶解氧浓度适中,既能保证反硝化反应的顺利进行,也为硝化反应提供了适量的氧气,从而促进了TN的高效去除。而当气水比增加至5时,TN的平均去除率降低至60.37%,推测可能是气流的剪切、摩擦作用导致部分生物膜脱落,影响了微生物的附着和生长。同时,过高的氧气供应对反硝化过程有抑制作用,因为氧气作为更高效的电子受体,会优先消耗污水中的有机碳源(电子供体),导致反硝化菌缺乏足够的电子来还原硝酸盐,从而使脱氮反应受到影响。同时,分子态氧也会抑制硝酸盐还原酶的合成及其活性,从而使得TN去除率有所下降。

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除变化趋势与TN相似。当气水比为3时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为73.50%;当气水比提升至

4时去除效果最好,去除率达到了82.25%。这是由于当气水比增大时,提高了氧传递速率,硝化菌活性增强,硝化速率提高。当气水比为5时,去除率仅有69.63%,这表明气水比过高时,强烈的气流冲刷会影响硝化菌的附着和生长,进而降低 NH_4^+-N 的去除率。

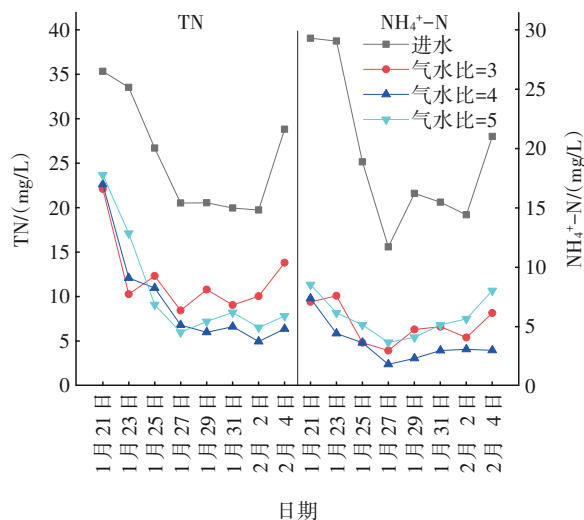


图4 1倍碱度下不同气水比的TN、 NH_4^+-N 去除效果对比

Fig.4 Comparison of TN and NH_4^+-N removal at varying air-to-water ratios under one time alkalinity

综合而言,在1倍碱度条件下,当气水比为4时,曝气生物滤池对TN和 NH_4^+-N 的去除效果达到最佳。这表明在实际污水处理过程中,需要根据水质条件和处理目标,精确调控气水比,以实现高效、经济的脱氮。然而,在此条件下,出水TN浓度仍在15 mg/L左右,存在不达标风险。因此,在后续将通过提高碱度来探究不同气水比条件下的去除效能。

2.2.2 2倍碱度下气水比对脱氮效能的影响

在2倍碱度条件下,随着气水比的提高,TN去除率先升后降。当气水比为3、4、5时,TN平均去除率分别为58.02%、72.61%和62.64%,变化趋势与1倍碱度条件下的一致,原因同为强烈气流冲刷导致的生物膜脱落。 NH_4^+-N 的去除同样如此,其平均去除率分别为82.39%、92.97%和81.56%(见图5)。综上所述,在2倍碱度条件下,当气水比为4时,BAF对TN和 NH_4^+-N 的去除效果达到最佳,且整体优于1倍碱度的。在该条件下,出水TN可稳定在10 mg/L以下, NH_4^+-N 稳定在1.5 mg/L左右,均符合一级A标准。

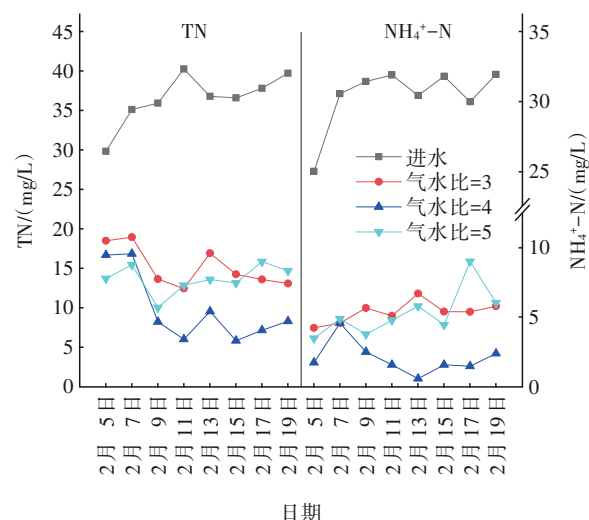


图5 2倍碱度下不同气水比的TN、 NH_4^+-N 去除效果对比

Fig.5 Comparison of TN and NH_4^+-N removal at varying air-to-water ratios under two times alkalinity

2.3 中试优化工艺与污水厂运行效果对比

中试装置在优化后的最佳工况下运行,即投加复合碳源并维持碳氮比为6,控制气水比为4,同时补充2倍碱度。此运行模式能够有效强化系统的脱氮性能,并确保有机物的有效去除。复合碳源的选择及碳氮比的优化提高了碳源利用效率,优化的气水比确保了充足的溶解氧供应以支持好氧硝化,并有助于生物膜内部形成缺氧微环境。充足的碱度补充则有效缓冲了硝化过程对pH的影响,为微生物创造了更为稳定的生长环境。

相比较而言,汤逊湖污水处理厂三期出水COD浓度通常能稳定维持在较低水平(一般低于20 mg/L),满足一级A排放标准,表明现有工艺对有机物的去除效果良好。然而,其出水TN浓度整体偏高,偶有接近15 mg/L限值的情况,存在超标风险,反映出实际工艺在脱氮环节可能面临碳源不足或反硝化不彻底等问题;其出水氨氮浓度稳定在2 mg/L左右,达到一级A标准,说明硝化作用较为充分,但仍有进一步提升空间。

在最佳工况下,中试装置出水COD平均浓度为27.26 mg/L,略高于同时期汤逊湖污水处理厂三期出水(平均浓度为10.59 mg/L),但仍能稳定达到一级A标准,表明中试装置对有机物的去除效果与现有工艺相当。而在关键的脱氮性能方面,中试装置表现出显著优势:运行稳定后,出水TN浓度稳定在10 mg/L以内,显著低于污水厂三期水平,且无超标

风险;出水氨氮浓度进一步降低至1.5 mg/L左右,优于污水厂三期水平。这一结果证明了优化后的BAF工艺在强化脱氮方面是有效的,其关键在于正确的碳源选择、合理的碳氮比调控、优化的气水比设定以及充足的碱度补充,这些措施的协同作用,显著提升了BAF系统的反硝化效率和硝化稳定性。

3 结论

① 低温条件下,优化碳源种类及碳氮比能有效提高BAF的脱氮性能。采用复合碳源并控制碳氮比为6时BAF的脱氮效果最佳,TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为52.93%和74.44%,显著优于乙酸钠。

② 在最佳碳源及碳氮比条件下,进一步优化气水比与碱度。控制气水比为4时脱氮效果最佳,但仅补充1倍碱度时,出水TN浓度仍在15 mg/L左右,存在超标风险;提升至2倍碱度后,其出水浓度可稳定达标,此时TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别达到72.61%和92.97%。

③ 通过中试确定BAF在低温条件下的最优运行参数组合如下:投加复合碳源并维持碳氮比为6,控制气水比为4,并补充2倍碱度。此时对TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果最好,出水COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均可达到一级A标准。

参考文献:

- [1] 郑俊,吴浩汀.曝气生物滤池工艺的理论工程应用[M].北京:化学工业出版社,2005.
- ZHENG J, WU H T. Theory and Engineering Applications of Biological Aerated Filter Process [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005 (in Chinese).
- [2] WU S Q, QI Y F, YUE Q Y, et al. Preparation of ceramic filler from reusing sewage sludge and application in biological aerated filter for soy protein secondary wastewater treatment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 283: 608-616.
- [3] ABOU-ELELA S I, FAWZY M E, EL-GENDY A S. Potential of using biological aerated filter as a post treatment for municipal wastewater [J]. Ecological Engineering, 2015, 84: 53-57.
- [4] 唐文锋,胡友彪,何晓文,等.曝气生物滤池生物预处理微污染水试验[J].环境工程,2014,32(9): 26-31.
- TANG W F, HU Y B, HE X W, et al. Study on

biological aerated filter used for pretreatment of micro-polluted water [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(9): 26-31 (in Chinese).

- [5] 柴宝华,王玥凝,黄小钟,等.温度对厌氧氨氧化生物滤柱处理低氮废水的影响[J].中国给水排水,2025,41(7):89-94.
- CHAI B H, WANG Y N, HUANG X Z, et al. Impact of temperature on treatment of low nitrogen concentration wastewater using an Anammox biofilter [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(7): 89-94 (in Chinese).
- [6] 王志祥,白宇,甘一萍,等.前置反硝化生物滤池的启动研究[J].中国给水排水,2012,28(1):11-14.
- WANG Z X, BAI Y, GAN Y P, et al. Study on start-up of pre-denitrification biofilter [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(1): 11-14 (in Chinese).
- [7] 赵卫芳.反硝化脱氮在污水深度处理的运行控制要点[J].节能与环保,2022(8):65-66.
- ZHAO W F. Operation control points of denitrification and denitrification in the application of advanced sewage treatment [J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2022 (8): 65-66 (in Chinese).
- [8] MILLER M N, ZEBARTH B J, DANDIE C E, et al. Crop residue influence on denitrification, N_2O emissions and denitrifier community abundance in soil [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(10): 2553-2562.
- [9] 胡国山,张建美,蔡惠军.碳源、C/N和温度对生物反硝化脱氮过程的影响[J].科学技术与工程,2016,16(14):74-77.
- HU G S, ZHANG J M, CAI H J. Effect of carbon source, C/N ratio and temperature on biological denitrification process [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(14): 74-77 (in Chinese).
- [10] 周广吉,张兰河,叶振起,等.气水比对曝气生物滤池处理城市中水效能的影响[J].生态与农村环境学报,2019,35(2):264-271.
- ZHOU G J, ZHANG L H, YE Z Q, et al. Effect of air-water ratio on reclaimed water treatment in a biological aerated filters [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(2): 264-271 (in Chinese).

作者简介:盛亮(1986—),男,湖北武汉人,大学本科,主要研究方向为污水处理厂运行管理。

E-mail:861230@qq.com

收稿日期:2025-10-22

修回日期:2025-12-08

(编辑:李德强)