

生物流化床反应器处理含氟高氮废水的试验研究

蒋雨, 黄乐庭, 潘建平*

德汶环能(成都)科技有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2026年3月9日; 录用日期: 2026年4月2日; 发布日期: 2026年4月13日

摘要

采用小试规模的圆柱形生物流化床反应器对含氟高氮工业废水进行处理, 载体采用粒径为8~30目, 比重1.2的悬浮载体颗粒。通过控制系统温度、溶解氧、pH、水力停留时间等敏感因子, 考察生物流化床在连续运行过程中对COD、NH₃-N、TN去除效果的稳定性和效率性。结果表明: 为保证COD、NH₃-N、TN均保持较高的去除率, 该流化床反应器最佳运行条件HRT范围为6~12 h, 温度20℃~25℃, 溶解氧2 mg/L~3.5 mg/L, pH值5.8~7.8。

关键词

生物流化床, 脱氮效率, 含氟高氮废水, 悬浮载体颗粒

Experimental Study on Treatment of Fluoride- and High-Nitrogen Wastewater by Biological Fluidized Bed Reactor

Yu Jiang, Leting Huang, Jianping Pan*

Devon Environmental Energy (Chengdu) Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: March 9, 2026; accepted: April 2, 2026; published: April 13, 2026

Abstract

A small-scale cylindrical biological fluidized bed reactor was used to treat industrial wastewater containing high levels of fluoride and nitrogen. The carrier was a suspended carrier particle with a

*通讯作者。

文章引用: 蒋雨, 黄乐庭, 潘建平. 生物流化床反应器处理含氟高氮废水的试验研究[J]. 水污染及处理, 2026, 14(2): 70-79. DOI: 10.12677/wpt.2026.142008

particle size of 8~30 mesh and a specific gravity of 1.2. The stability and efficiency of the biological fluidized bed in removing COD, NH₃-N, and TN were investigated during continuous operation by controlling sensitive factors such as system temperature, dissolved oxygen, pH, and hydraulic retention time (HRT). The results showed that to ensure high removal rates of COD, NH₃-N, and TN, the optimal operating conditions for the fluidized bed reactor were: HRT range of 6~12 h, temperature of 20°C~25°C, dissolved oxygen of 2 mg/L~3.5 mg/L, and pH of 5.8~7.8.

Keywords

Biological Fluidized Bed, Nitrogen Removal Efficiency, Fluoride and High-Nitrogen Wastewater, Suspended Carriers

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

好氧生物流化床反应器是以微粒状填料如砂、焦炭、活性炭、多孔球等作为微生物载体，以一定流速将空气或纯氧通入反应器内，使载体处于流化状态，通过载体表面上不断生长的生物膜吸附、氧化并分解废水中的有机物，从而达到对废水中污染物的去除[1]，且大规模应用于生物化工、燃煤、催化裂化等领域[2] [3]。近年来随着水处理技术的高效化发展，逐渐拓展至废水处理领域，尤其在生物脱氮除磷、难降解及高浓度有机废水处理等场景中展现出独特技术优势[4]-[8]；但目前生物流化床反应器用于光伏废水的脱氮报道很少，在已有的报道中，大多集中在先除氟后脱氮[9] [10]。

好氧生物流化床按床内气、液、固三相的混合程度的不同，以及供氧方式和床体结构、脱膜方式等的差别可分为两相生物流化床和三相生物流化床。本实验采用三相生物流化床工艺(如图 1)，其特点是反应器气、液、固三相共存[11]，污水充氧和载体流化同时进行，废水在载体生物膜的作用下进行生物降解，由于空气的剪切作用使生物膜及时脱落，故不需额外脱膜。但有小部分载体会从反应器中带出，需对载体进行回流。三相生物流化床中用得最多的是内循环三相生物流化床[12] [13]，反应区由内、外筒两个同心圆柱组成，在外筒底部装置一块多孔分布板作曝气装置，反应区内加入载体。混合液在内筒向上流、外筒向下流构成循环。

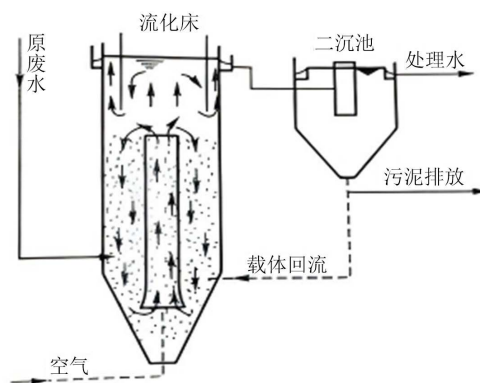


Figure 1. Three-phase biological fluidized bed
图 1. 三相生物流化床

生物流化床反应器脱氮工艺是在反应器中投加填料,使部分活性污泥变成带有载体的生物膜,因此它既具有活性污泥工艺的特点又具备生物膜法的优点,使工艺流程简化、减少占地面积、节省基建投资、操作管理上更方便。这些特征能够满足现阶段中小型污水排放源控制在技术上和经济上的要求,并具有重大的经济效益、社会效益和环境效益,对城镇小区污水深度处理技术具有较为重要的理论指导意义和实际应用价值[13],既适应我国简易、高效、低耗污水处理新技术的政策,同时也降低中小型污水处理厂运营管理成本。

2. 实验材料及实验方法

2.1. 实验装置及工艺设计

(1) 本实验反应器采用总高 59 cm、直径 8 cm、有效高度 38 cm,有效体积约 2 L 的圆柱形[14],圆柱形有利于反应器内混合液处于良好的紊动、旋转并防止死角,使布水均匀,减小水头损失并使载体保持悬浮状态,减小因剪切造成的载体生物膜颗粒破解,并提高曝气设备的充氧速率。

(2) 生物膜填料的选择及特性填料是悬浮载体生物流化床反应器脱氮工艺的核心部分[15][16],它作为微生物的载体影响着微生物的生长繁殖和脱离过程,它的性能直接影响和制约着处理效果。本实验采用合成高分子填料,填料经过稀酸进行刻蚀,后经 NaOH 碱解后得到多孔聚合物生物载体成品,载体呈球形或椭球形颗粒,粒径 8~30 目,比重约 1.2,具有粗糙多孔的表面和相互连通的微米级多孔结构,表面富含羟基等亲水性官能团,表面水接触角趋于零。化学性质稳定;表面粗糙;比表面积大;便于生物附着;质轻、易流化,节省能耗。

(3) 填料投加量的确定有实验证明填料投加密度应在 30%左右[7][14],初期填料以 30%投加,随着进水浓度增加,处理效率变低,在采取投加填料的措施后,处理效率明显提高。因此,填料的投加量应与进水浓度相适应,过少会导致处理效果不佳。

(4) 曝气装置将装置底部的多孔曝气板与曝气泵用气量计相连,通过调整气量计的进气量来控制反应器中流化状态和溶解氧的量。

(5) 进水装置进水采用人工配水,通过调节蠕动泵转速将进水池中的污水保持一定流速泵入反应器。

2.2. 水质检测分析方法

本实验水质分析采用快速测定法,测定设备为 5B-6C (V8)型多参数水质测定仪,主要测定项目为 COD、氨氮、总氮。

2.3. 废水来源

本实验采用四川省某光伏工业园区含氟工业废水。该厂主要工艺流程为:进水→调节池→多级混凝沉淀池→生化池→二沉池→高效沉淀池→V型滤池→消毒出水。其中低浓度含氟工业废水(F浓度为 90 ± 8 mg/L)取自一级混凝沉淀池出水、高浓度含氟工业废水(F浓度为 900 ± 26 mg/L)取自调节池进水。

3. 流化床反应器脱氮效能的研究

3.1. 反应器的启动

微生物附着在惰性载体表面生长,由微生物及其产生的胞外多聚物和吸附在微生物表面的无机物和有机物等组成,形成具有较强的吸附和生物降解性能的生物膜结构,生物流化床是生物膜法的一种工艺

形式，载体颗粒在流化床内保持剧烈运动并相互摩擦，三相界面不断更新，附着步骤见图 2。

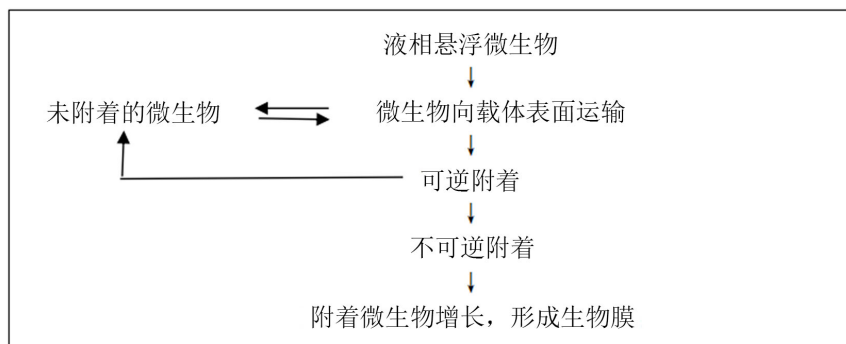


Figure 2. Steps of microbial attachment on the carrier surface

图 2. 微生物在载体表面的附着步骤

为缩短反应器启动时间，污泥培养驯化和填料的挂膜同时进行，即在反应器中加入接种污泥的同时向反应器加入载体填料。

3.1.1. 闷曝阶段

取污泥经稀释后 MLSS 约为 5000 mg/L 的浓度接种，向反应器中投加填料，调节进气阀使填料呈流化态，并控制反应器中溶解氧含量。初始曝气测得反应器内溶解氧含量约为 6.5 mg/L，设置水力停留时间为 6 h，闷曝 24 h 后测得溶解氧含量约 5.1 mg/L，停止曝气静置半小时后排出污泥，如此反复 2 次至污泥全部排出。

3.1.2. 连续进水阶段

系统开始连续进水，进行污泥的连续培养。初始阶段进水以葡萄糖、氯化铵、磷酸二氢钾作为营养物质进行人工配水，设置进水 pH 范围为 7.5~7.8，COD 浓度为 200 mg/L、氨氮浓度 10 mg/L。反应器运行 12 天后，水体黏度明显增加；运行至 20 天后反应器中水体出现微黄色；至 40 天反应器中悬挂大量生物膜，部分老化的生物膜脱落、更新；至 70 天时膜系统黏度持续变大，大量老化生物膜出现脱落、更新，水体 pH 值从开始脱落至更新完毕呈现先下降后升高至恢复的现象；后续约每月出现一次老化生物膜脱落、更新。

3.2. 反应器正式运行阶段效果分析

反应器正式运行分为两个阶段，实验测定 COD、氨氮、总氮，第一阶段进水以低浓度含氟工业废水进行培养；第二阶段以高浓度含氟工业废水进水，逐渐提高进水浓度。

3.2.1. COD 的去除效果及影响因素

第一阶段(如图 3)缓慢提升进水负荷，给微生物对环境的改变提供缓冲，该阶段提升负荷对 COD 去除率影响较小，去除率范围为 78%~93%，平均去除率 87%。

第二阶段(如图 4)整体进水负荷偏高，废水中存在某些难降解物质，去除率范围为 84%~95%，平均去除率 89.5%，处理效果较好，分析原因为微生物在该阶段生长情况良好、活性较大、生长环境适宜。

实验中，C/N 范围为 5~20，进水负荷的增大或减少对 COD 的去除影响不明显，表明具有较好的耐冲击负荷。

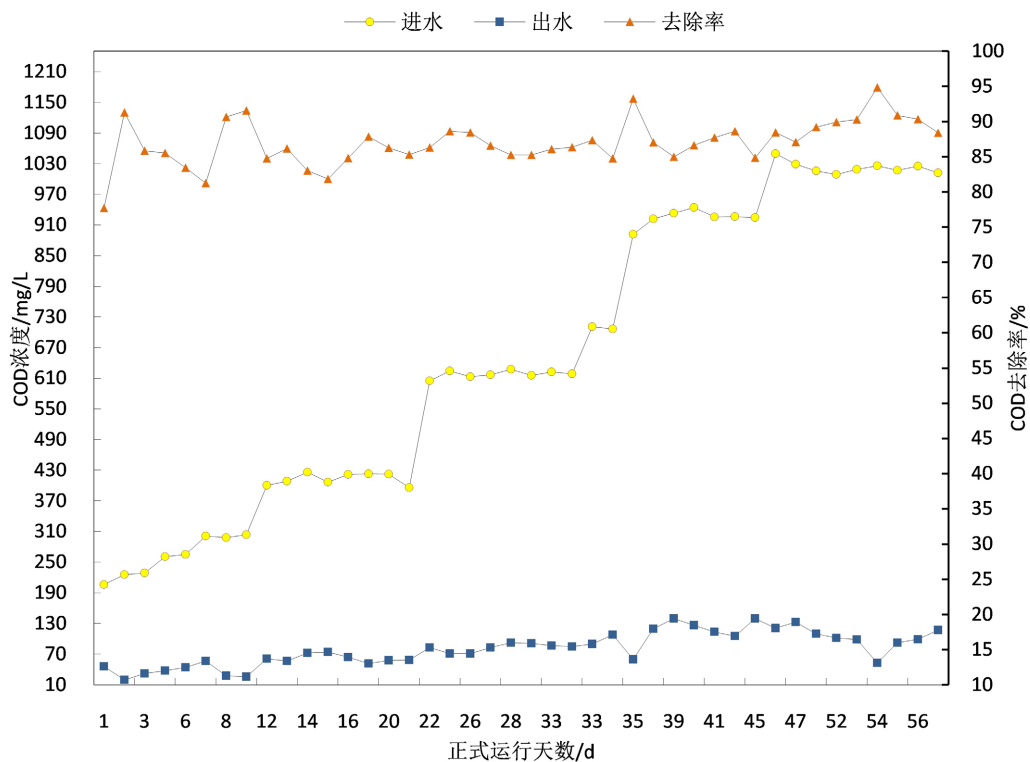


Figure 3. COD removal rate in the first phase of formal operation
图 3. 正式运行第一阶段 COD 去除率

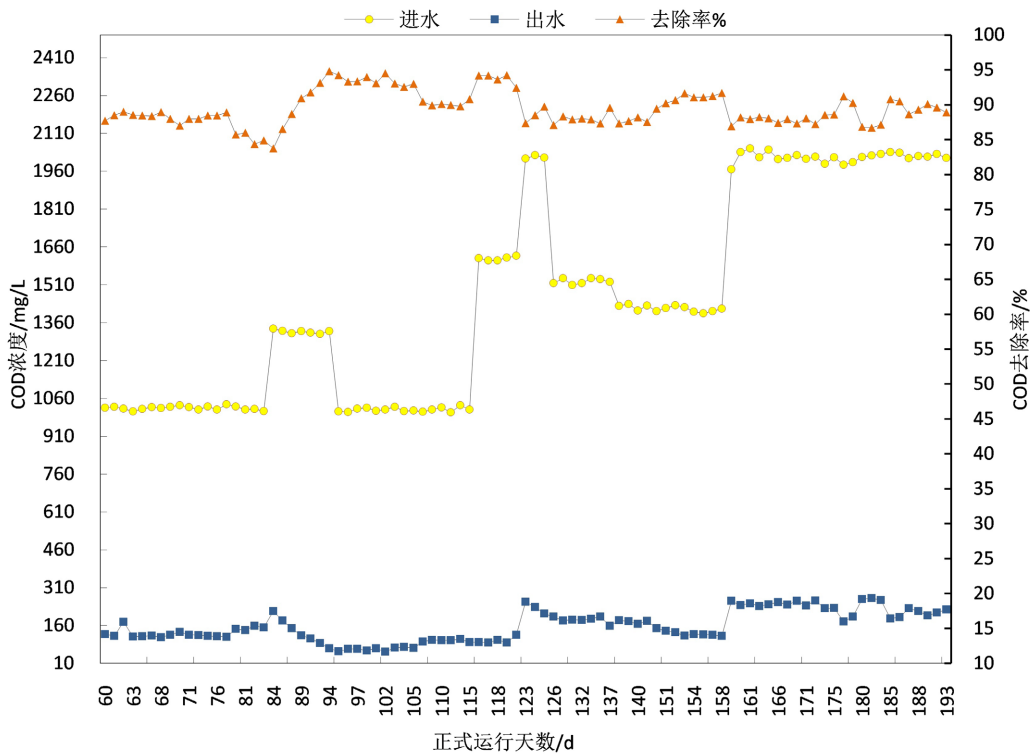


Figure 4. Formal operation phase II COD removal rate
图 4. 正式运行第二阶段 COD 去除率

3.2.2. 氨氮的去除效果及影响因素

第一阶段(如图 5)进水中总氮主要成分为硝态氮,无氨氮输入,不作去除率分析,但出水中含有氨氮,出水氨氮浓度随着进水总氮浓度的提高而增加,推测可能发生了硝酸盐还原反应将硝态氮还原为铵[17]。

第二阶段(如图 6),氨氮的去除受曝气量、生物活性及碳氮比[18]影响较大,当反应器中进气量不足,流化床流化效果较差、曝气不均匀,将会导致氨氮的去除受到严重影响致去除率降低。

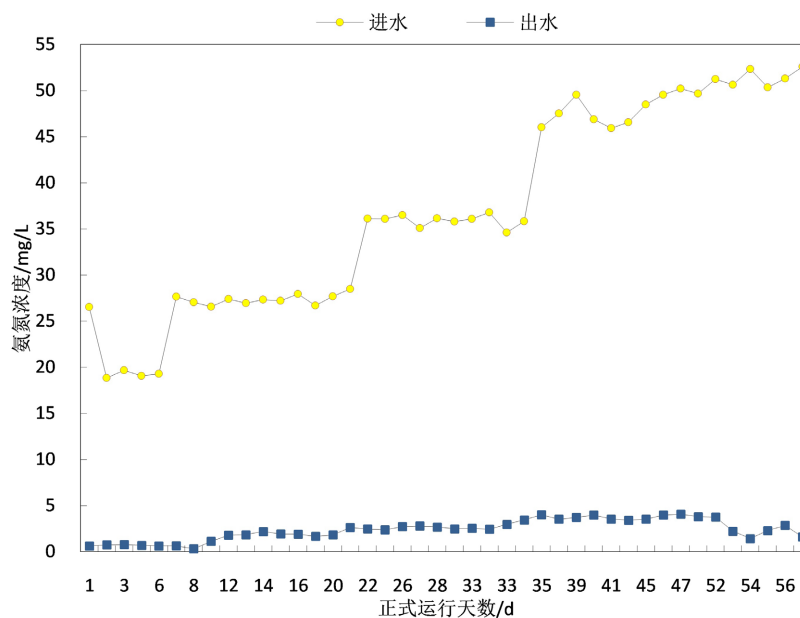


Figure 5. Ammonia nitrogen effluent concentration in the first phase of official operation
图 5. 正式运行第一阶段氨氮出水浓度

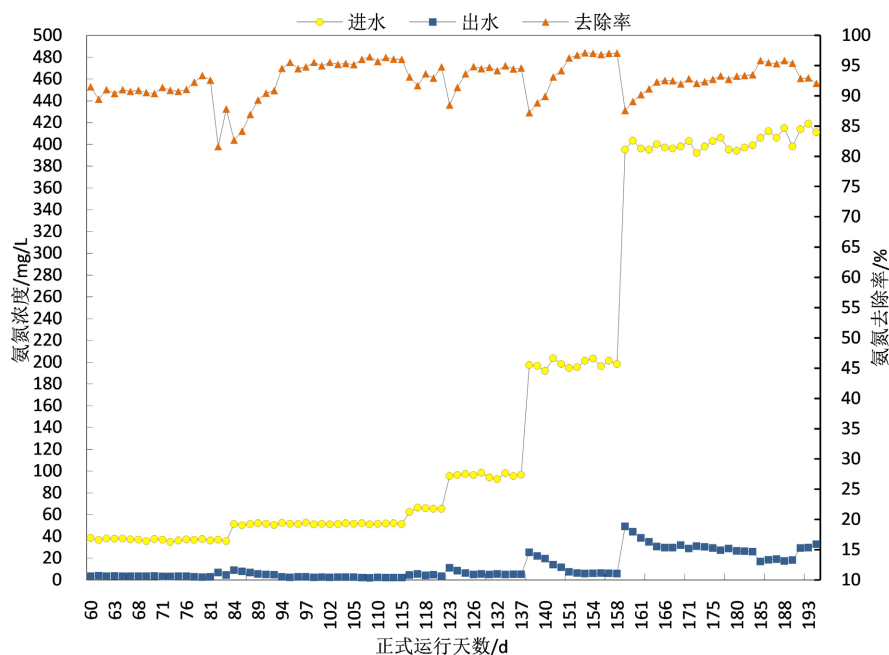


Figure 6. Removal rate of ammonia nitrogen in the second phase of official operation
图 6. 正式运行第二阶段氨氮去除率

3.2.3. 总氮的去除效果及影响因素

第一阶段(如图 7)总氮进水浓度范围为 18.8 mg/L~52.6 mg/L, 出水浓度范围为 3.5 mg/L~18.3 mg/L, 去除率在 54%~85%, 平均去除率 70%。进水总氮浓度波动较大, 反应器对总氮的去除效果在运行期间起伏变化比较明显。

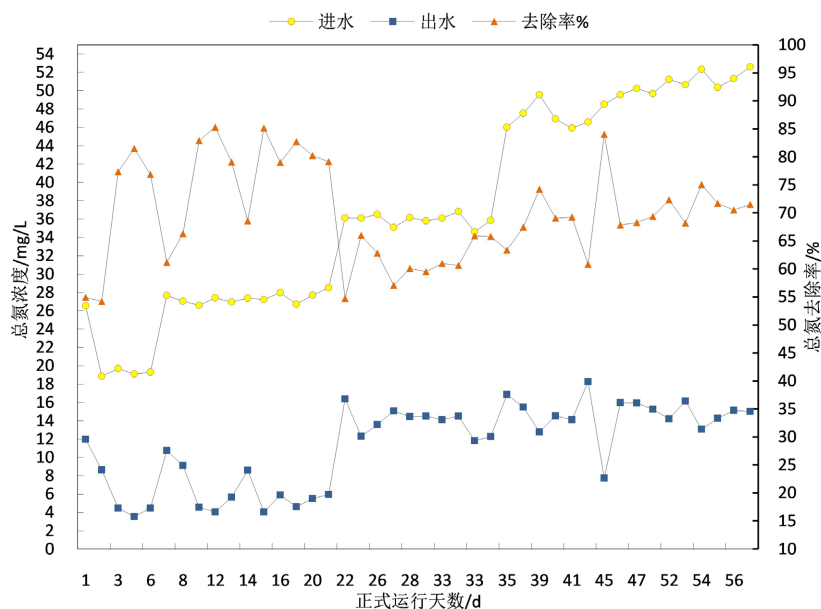


Figure 7. Total nitrogen removal rate in the first stage of formal operation
图 7. 正式运行第一阶段总氮去除率

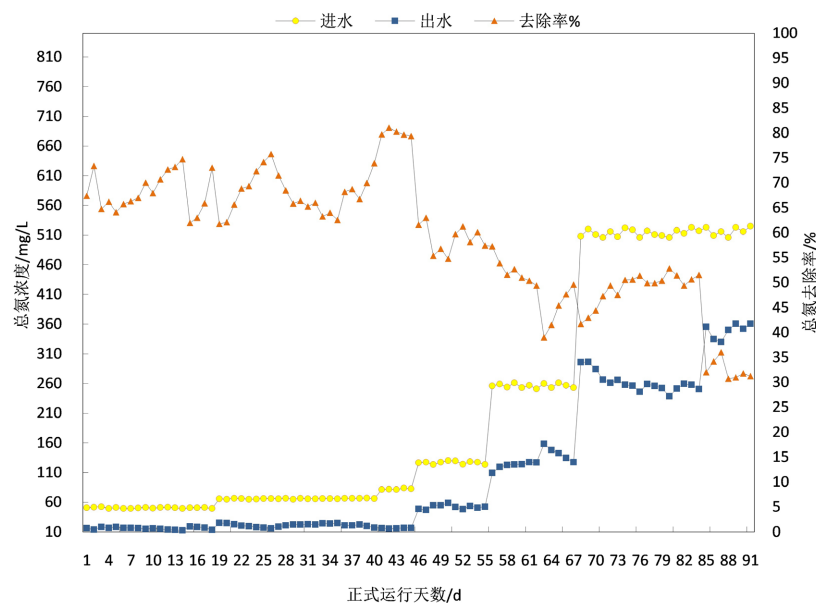


Figure 8. Total nitrogen removal rate during the second stage of formal operation
图 8. 正式运行第二阶段总氮去除率

第二阶段(如图 8)中在正式运行第 116~119 天出现一个去除率波峰, 经观察发现, 此时反应器上层出水区出现明显清水与填料的分层, 后续紧接着出现老旧膜脱落。当进水总氮浓度继续提升, 至 125 mg/L、

250 mg/L、500 mg/L，去除率依次下降。

由此可知，当进水总氮浓度在 35 mg/L 以下低负荷运行时，平均去除率能达 74.3%，当进水总氮浓度达 35 mg/L~65 mg/L 时，平均去除率基本能稳定在 60%左右，而进水浓度达到 125 mg/L，每增加负荷后，去除率呈现明显下降的趋势，分析原因为反应器中微生物数量及活性存在阈值，高负荷进水超出反应器最大处理能力。

(1) 温度去除率受温度影响大，当低温($<20^{\circ}\text{C}$)运行时，反应器对总氮去除率极低。试验结果表明(如图 9)，温度是影响硝化和反硝化的重要因素，当反应器内的温度降低时，硝化菌和反硝化菌的增长速度和代谢活性均降低，从而使总氮去除率下降。另一方面，出水总氮浓度随进水总氮浓度的变化而变化，说明反应器抗总氮冲击负荷的能力较差，为保证去除率，温度最好高于 20°C 。

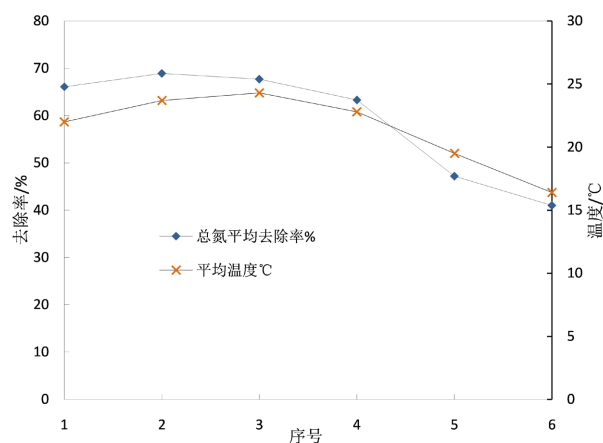


Figure 9. Effect of temperature on total nitrogen removal
图 9. 温度对总氮去除的影响

(2) 溶解氧总氮去除率与溶解氧浓度关系密切，选取稳定运行期间做测试，其中 8 月温度 24.0°C ~ 24.7°C 时探究 pH 的影响如图 10，可知，溶解氧浓度低于 2 时，总氮去除率将降低，高于 3.5 时总氮去除率也有降低趋势，分析原因为硝化菌和反硝化菌对溶解氧敏感，过高和过低的溶解氧都会对反应产生抑制作用，因此最适溶解氧浓度为 2.0 mg/L ~ 3.5 mg/L 。

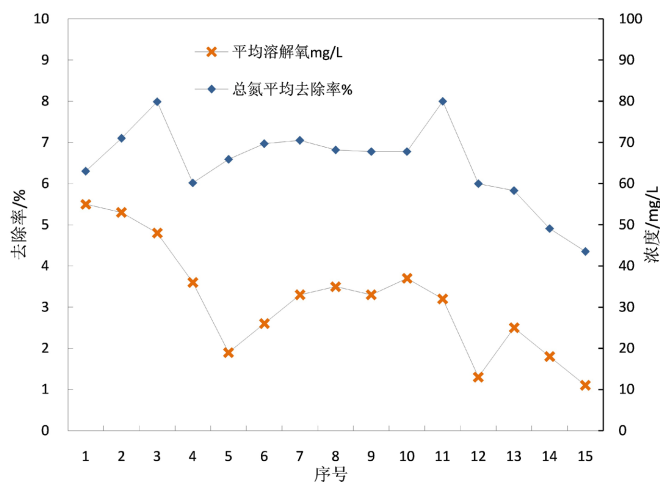


Figure 10. Effect of dissolved oxygen on total nitrogen removal
图 10. 溶解氧对总氮去除的影响

(3) pH 值从图 11 中可知, 该反应器 pH 值在 5.8~7.8 中具有较强的去除效果, 当 pH 值 < 5.8、>8.5 时反应降低, 去除率降低。总氮去除率的下降一方面是由硝化能力引起的, 另一方面是由于不适宜的 pH 值影响到反硝化菌的活性[19], 使反硝化反应受到抑制, 因此可得出结论, 在生物流化床反应器中, pH 值呈中性和略偏碱性时对总氮的去除率较高, 最适 pH 值为 5.8~7.8。

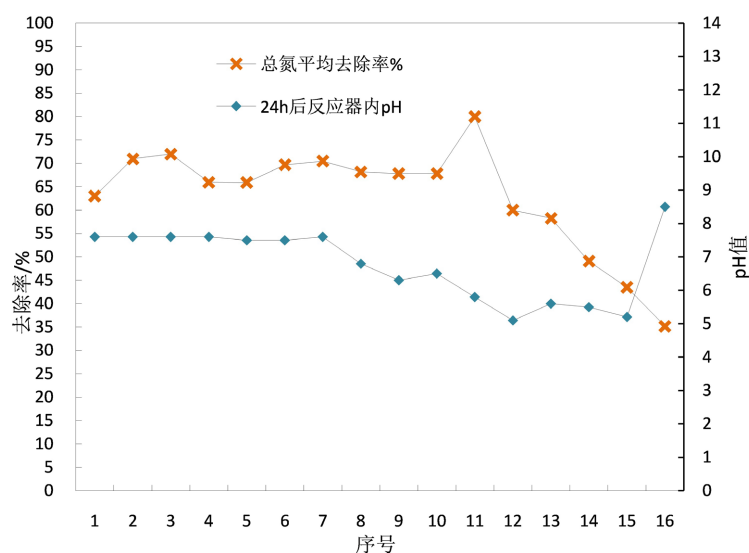


Figure 11. Effect of pH on total nitrogen removal
图 11. pH 对总氮去除的影响

(4) 水力停留时间取 6 h、12 h、18 h 各运行一周, 运行期间平均去除率如图 12, HRT 在 6 h~12 h 中去除率较好, 当 HRT 过长, 有机物含量减少, 过度曝气加快生物膜老化脱落, 导致总氮去除率降低, 同时也会增加系统能耗; 过短则可能由于处理不充分导致处理率低, 适当延长 HRT 有利于提高去除率, HRT 在 6~12 h 最佳。

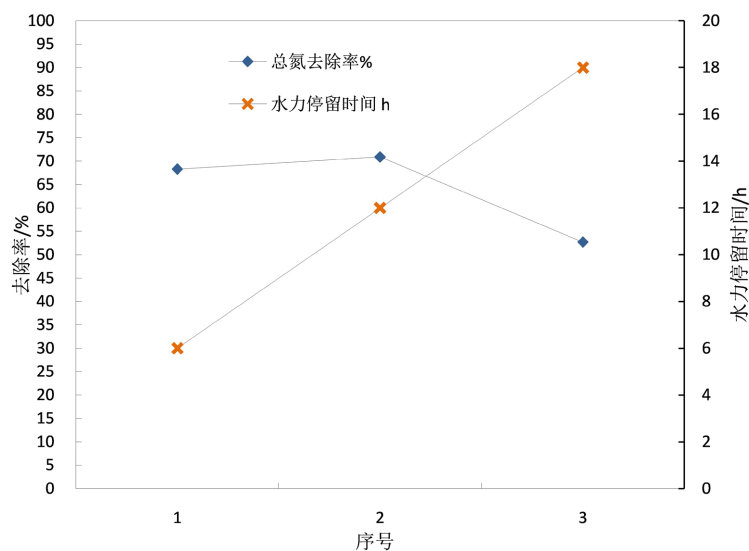


Figure 12. Effect of hydraulic retention time on total nitrogen removal
图 12. 水力停留时间对总氮去除的影响

4. 总结

由本次实验可推出, 为保证总氮、COD 和氨氮均保持较高的去除率, 该流化床反应器最佳运行条件 HRT 范围为 6~12 h, 温度 20℃~25℃, 溶解氧 2 mg/L~3.5 mg/L, pH 值 5.8~7.8。

(1) 在流化床实验中, 影响总氮去除率的敏感因子较多, 低温、不适宜的 pH 值, 过高(或过低)的溶解氧、温度以及水力停留时间等都将对总氮的去除造成较大的影响, 而 COD 和氨氮受影响较小, 为保证系统整体良好的去除率, 首要条件应考虑总氮。

(2) 该流化床对总氮的最大处理能力为 0.5 kg/(m³·d), 当进水浓度 > 125 mg/L 时, 微生物对总氮的去除率开始降低; 目前 COD 的最大处理能力为 4.0 kg/(m³·d), 进水浓度 2000 mg/L 仍未达到处理极限; 氨氮的去除所需条件较为宽松。

(3) 当进水浓度提高, 曝气量相应提高以维持适当的溶解氧; 同时投加适量的碱保持反应器内 pH 值稳定并有足够的碱度, 反应器内碱度不足, 去除率将会降低。

参考文献

- [1] Michael J. Nelson, George Nakhla, Jesse Zhu. 流化床生物反应器在污水处理中的应用研究和进展综述[J]. 工程, 2017, 3(3): 114-140.
- [2] Werther, J., Hartge, E. and Heinrich, S. (2014) Fluidized-Bed Reactors—Status and Some Development Perspectives. *Chemie Ingenieur Technik*, **86**, 2022-2038. <https://doi.org/10.1002/cite.201400117>
- [3] Menéndez, M., Herguido, J., Bérard, A. and Patience, G.S. (2019) Experimental Methods in Chemical Engineering: Reactors—Fluidized Beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **97**, 2383-2394. <https://doi.org/10.1002/cjce.23517>
- [4] Nelson, M.J., Nakhla, G. and Zhu, J. (2017) Fluidized-Bed Bioreactor Applications for Biological Wastewater Treatment: A Review of Research and Developments. *Engineering*, **3**, 330-342. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.03.021>
- [5] 葛杰, 宋永会, 王毅力, 等. 流化床工艺在水处理中的应用研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2014, 4(1): 46-52.
- [6] Cai, Q.Q., Lee, B.C.Y., Ong, S.L. and Hu, J.Y. (2021) Fluidized-Bed Fenton Technologies for Recalcitrant Industrial Wastewater Treatment—Recent Advances, Challenges and Perspective. *Water Research*, **190**, Article ID: 116692. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116692>
- [7] 高艳玲. 悬浮载体生物流化床反应器脱氮试验研究[D]: [博士学位论文]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [8] 李程文. 流化床结晶法处理高浓度含氟废水[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [9] 李棒棒. 某光伏产业园污水处理厂工程实例[J]. 工业用水与废水, 2025, 56(3): 87-91.
- [10] 许婷. 光伏废水处理技术方法的研究进展[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(1): 21-23.
- [11] 林海波, 祝京旭, 蓝朝逊. 气液固三相流化床层膨胀特性实验分析[J]. 化学工程, 2017, 45(6): 44-49.
- [12] 晏波, 蒋文举, 谢嘉. 三相好氧生物流化床污水处理技术研究应用进展[J]. 四川环境, 2001, 20(3): 5-9.
- [13] 郑礼胜, 施汉昌, 钱易. 内循环三相生物流化床处理生活污水[J]. 中国环境科学, 1999, 19(1): 51-55.
- [14] 臧玲丽, 高鹏, 徐敏, 等. 流化床反应器构型设计对废水处理效能的影响综述[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(5): 1697-1703.
- [15] 李平, 吴海珍, 韦朝海. 生物流化床反应器生物膜特性研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(9): 75-79.
- [16] 疏明君, 李友明, 谢澄, 等. 三相生物流化床处理中段废水时挂膜实验的研究[J]. 黑龙江造纸, 2002, 30(1): 1-4.
- [17] 张新艳, 彭党聪, 万琼, 鞠凯, 王娜, 张岩. 活性污泥中硝酸盐异化还原成铵(DNRA)过程及其影响因素[J]. 环境保护前沿, 2018, 8(2): 95-105.
- [18] 席晨晨, 程文, 焦梦, 任杰辉, 张杏, 万甜. 碳氮比对好氧流化床生物膜反应器氮去除机制研究[J]. 水处理技术, 2022, 48(5): 76-80.
- [19] 酆朝晖, 崔兵, 宣建锋. 曝气生物流化床反应器深度处理印刷电路板废水脱氮效能研究[J]. 能源环境保护, 2014, 28(5): 13-15, 38.