

低温好氧反硝化菌群强化生活污水脱氮效能

庞长洸^{1,2}, 陈 翰¹, 李 昂¹, 马 放^{1,2}

(1.城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 150090 哈尔滨;

2.哈尔滨工业大学 宜兴环保研究院, 214200 江苏 宜兴)

摘 要: 为强化低温脱氮效能,通过快速富集驯化得到一组低温好氧反硝化菌群,其在 10 ℃ 好氧环境下可实现氨氮、总氮和有机物的高效同步去除.低温好氧反硝化菌群与聚氨酯载体结合后投加进行生物强化,氨氮去除率提升 10.31%~16.89%,总氮去除率提升 25.07%~32.44%,且各项指标出水均达一级 A 标准;停止强化 10 d 后,强化反应器较未强化反应器氨氮、硝氮、总氮和 COD_{Cr}出水质量浓度仍分别下降 2.43, 3.07, 6.02 和 3.63 mg/L,说明低温好氧反硝化菌群强化具有显著高效和持续时间长的优点.

关键词: 低温;生活污水;脱氮;生物强化;好氧反硝化

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)12-0045-08

Performance of bioaugmented nitrogen removal by aerobic denitrification consortium for treating the domestic sewage at low temperatures

PANG Changlong^{1,2}, CHEN Han¹, LI Ang¹, MA Fang^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment(Harbin Institute of Technology), 150090 Harbin, China;

2. HIT Yixing Academy of Environmental Protection, 214200 Yixing, Jiangsu, China)

Abstract: Low temperature inhibits the performance of nitrogen removal efficiency during the biological treatment of municipal wastewater. Therefore, the effluent could hardly meet the emission standard. To enhance the performance of nitrogen removal at low temperature, a psychrotolerant aerobic denitrification consortium by fast enrichment and domestication was obtained, which could remove the ammonia, nitrate and organic matter simultaneously and efficiently in aeration environment under 10 ℃. The results showed that the removal efficiency of ammonium and total nitrogen by bioaugmentation was improved by 10.31%–16.89% and 25.07%–32.44%, respectively. It made the effluent quality meet the grade1A level of national discharge standard. After bioaugmentation terminating for 10 days, the remained consortium could still improve the reactor that the effluent of ammonium, nitrate, total nitrogen and COD_{Cr} concentrations was decreased about 2.43, 3.07, 6.02 and 3.63 mg/L, respectively. The results indicated that bioaugmentation performed well and persistently.

Keywords: low temperature; domestic sewage; nitrogen removal; bioaugmentation; aerobic denitrification

污水中氮素污染物已逐渐取代传统有机污染物成为水污染防治的首要目标,生物脱氮因具有高效、经济等优势而成为应用最广泛的脱氮方

法^[1].然而,北方高纬度地区的冬季污水进水温度一般低于硝化及反硝化功能菌群的适宜生长温度,导致冬季生物处理出水氮素超标现象频发^[2-3].生物强化技术因对原有运行参数及构筑物改动较小而成为提高低温生物脱氮效能的重要方式^[4-7],主要通过筛选、富集和驯化得到耐冷微生物单菌或混合菌群,经优化复配后制成生物菌剂投入强化系统,通过改善相关微生物的活性与生

收稿日期: 2014-01-12.

基金项目: 国家自然科学基金(51108120, 51178139).

作者简介: 庞长洸(1983—),男,博士研究生;

马 放(1963—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 李 昂,ang.li.harbin@gmail.com.

物量,最终实现污水生物强化脱氮^[8-10].同时,好氧反硝化理论因可实现好氧条件下碳和氮同步去除,并解决脱氮菌群对营养和溶解氧条件不同要求而成为研究热点.为此,通过富集驯化低温好氧反硝化混合菌群并投加于 10 ℃ 运行的 SBR 反应器,分析低温好氧反硝化菌群富集驯化过程的脱氮特性,研究强化处理低温生活污水的脱氮效能、稳定性及转化规律,以期为好氧反硝化强化迈向实际应用提供一定理论依据.

1 实 验

1.1 实验材料

活性污泥取自哈尔滨市某污水处理厂曝气

池,其运行状况稳定,污泥呈棕褐色,泥水界面清晰,沉降性能良好.

采用无水乙酸钠、氯化铵、硝酸钾和磷酸二氢钾等分别作为低温好氧反硝化驯化液中碳、氮和磷的来源^[11],水质指标见表 1.生活污水取自哈尔滨工业大学二校区家属住宅区污水井,经初沉除去杂物后使用,以免损坏水泵等设备,水质指标见表 2.

实验所用载体为聚氨酯泡沫,基本参数为:密度 0.018 g/cm³,比表面积 100~120 m²/g,孔径 1~2 mm,规格 2 cm×2 cm×2 cm.聚氨酯泡沫挂膜成功后使用铁丝穿透并制成条状载体串,每串含 14~16 个聚氨酯泡沫块.

表 1 菌群驯化液水质指标 mg · L⁻¹

指标	氨氮	亚硝氮	硝氮	总氮	TOC	pH
范围	80~100	0~5	140~160	230~270	750~950	7.0~7.5

表 2 生活污水水质指标 mg · L⁻¹

指标	COD _{Cr}	氨氮	亚硝氮	硝氮	总氮	pH
范围	100.0~300.0	35.0~55.0	0~0.5	0~3.0	40.0~60.0	6.8~7.2

1.2 实验装置

好氧反硝化菌群驯化装置运行于人工低温室 10 ℃ 环境,主要由进水水箱、驯化水池及曝气泵、潜水泵、电磁阀等组成,有效体积为 3.0 L,体积交换比约为 1 : 3. 菌群驯化装置采取间歇式运行,每周周期时长 24 h,其中进水 5 min,好氧曝气

23 h,沉淀 50 min,排水 5 min.
SBR 反应器运行于人工低温室 10 ℃ 环境,两池设计参数相同且同时运行.SBR 反应器主要由有机玻璃池体及曝气、搅拌、进水、排水等系统组成,通过自动控制器实现自动运行,单池有效体积约为 10.0 L,反应器结构见图 1 所示.

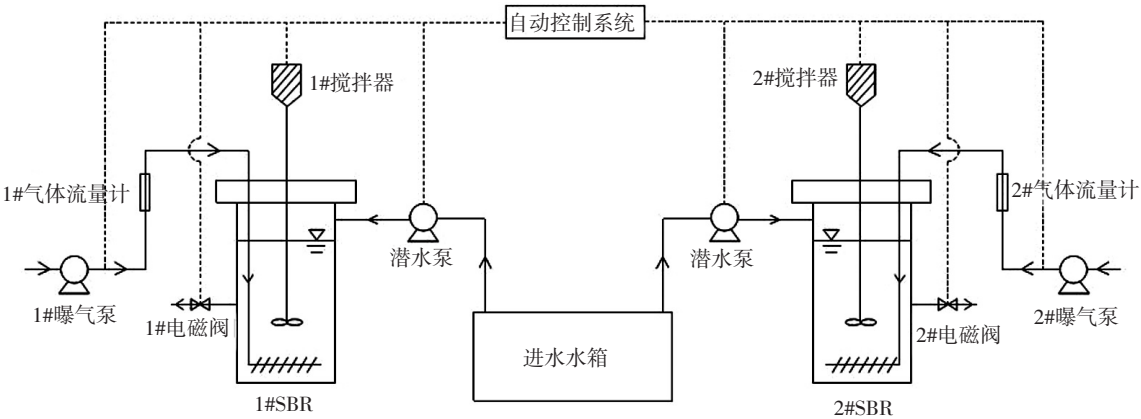


图 1 SBR 反应器示意

1.3 实验方法

1.3.1 好氧反硝化菌群富集驯化方法

将新鲜活性污泥混合液静置沉淀 30 min 后,倒掉上清液,取沉淀污泥液经纱网截留杂物颗粒,随后取约 0.6 L 污泥液与 2.4 L 污泥驯化液混合并进行曝气培养.适当调节曝气量并定时采集进出水水样,在 8 000 r/min 条件下离心 10 min,取离心后的上清液进行氨氮、亚硝氮、硝氮、总氮及 TOC 等

指标的测定,每个样品取 3 个平行样品进行测定以保证数据的准确性.经过连续驯化培养至反应器对氨氮、总氮和有机物的降解性能均基本稳定,视为低温好氧反硝化菌群的富集驯化完成.

1.3.2 SBR 反应器启动运行方法

SBR 反应器单个运行周期为 8 h,单池单周期排水体积为 4.0 L,体积交换比为 40%.直接投加活性污泥使反应器于 10 ℃ 低温环境下启动,将污

泥质量浓度 MLSS 保持在 3 000~3 500 mg/L,并通过剩余污泥排放控制污泥龄约为 20 d.连续测定进出水水质指标,并定期采样分析污泥质量浓度 MLSS 和污泥沉降比 SV.

反应器运行期间全程按照 A/O/A 工序进行,包括:进水,缺氧搅拌 0.5 h,好氧曝气 4 h,缺氧搅拌 2 h,静置沉淀 1 h,排水.其中进水、排水时间均为 1 min,排水后闲置时间为 28 min.进水、排水及曝气、搅拌切换为自动控制运行,剩余污泥排放及水样采集为人工定期进行.启动阶段、强化阶段及停止强化阶段等不同时期运行工序和方法完全相同.

1.3.3 菌群生物强化方法

将小块聚氨酯泡沫仔细清洗灭菌后,加入已运行稳定的低温好氧反硝化菌群驯化装置中进行曝气挂膜培养^[12].定期取聚氨酯泡沫冲洗后加入培养液进行摇瓶实验,至处理效能基本稳定视为挂膜完成,挂膜期为 6~8 d,期间聚氨酯泡沫的孔洞内已生长有大量驯化菌群.

将冲去表面残余培养液的已挂膜聚氨酯载体制成载体串并整体均匀地投入 2#反应器中进行低温生物强化,形成从下至上的垂直强化区以改善强化效果;1#反应器不投加载体及菌剂形成对照.通过连续测定反应器出水水质,得到强化与不强化反应器对生活污水中氮素及有机物的处理效能和生物强化后出水波动情况等.

通过调节曝气强度使反应器曝气阶段溶解氧质量浓度为 2~4 mg/L.为避免部分破损载体进入管线引起堵塞等故障,定时在反应器闲置期间检查载体强化串并对损坏的载体块进行单独更换,确保生物强化能够长期稳定运行.在停止更换挂膜载体后,继续对两个反应器出水水质进行跟踪测定,以分析低温强化的持久性和环境适应性.

1.4 分析方法

主要分析指标包括 COD_{Cr} 、TOC、氨氮、亚硝氮、硝氮、总氮、pH、DO 及活性污泥质量浓度 MLSS,分析方法参照国标方法进行^[13].

1.5 数据分析及作图

使用 Microsoft Office Excel 2010 进行数据统计分析,使用 OriginLab Origin 8.0 进行绘图.

2 结果与讨论

2.1 好氧反硝化菌群驯化过程

在驯化期间,培养液中氨氮及 TOC 去除较稳定.驯化完成后氨氮可被完全去除,出水 TOC 质量浓度低于 10.98 mg/L.这说明氨氮及有机物作

为微生物生长所必须的营养和能量来源,易于被利用且降解转化稳定,驯化菌群生长及代谢活性旺盛.同期总氮进出水与硝氮质量浓度变化趋势基本一致,这是由于在氨氮几乎完全去除情况下,出水总氮基本来源于残余硝氮.驯化第 11 天时,系统达到总氮最大去除率 92.03%,出水总氮基本保持在 39.98 mg/L.

驯化前 10 d 里驯化菌群对于硝氮降解提升显著,随后基本保持稳定,因此,选取前 10 d 硝氮降解情况分析低温好氧反硝化性能及驯化程度.如图 2 所示,启动初期接种污泥因缺少缺氧反硝化细菌及好氧反硝化菌数量少而导致硝氮无法被降解;经过驯化,低温好氧反硝化菌群在溶解氧及硝氮质量浓度的诱导下开始演化为优势菌群,硝氮去除率大幅上升.从第 10 天起,系统对于硝氮降解趋于稳定,去除率保持在 82.85% 以上,最低出水硝氮质量浓度为 21.09 mg/L.

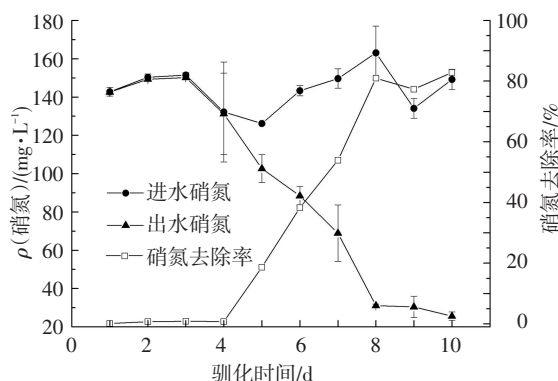


图 2 驯化阶段进出水硝氮质量浓度及去除率变化

此外,驯化前 2 d 出水亚硝氮质量浓度分别为 3.82、3.14 mg/L,随后一直保持在 0 mg/L.初期出水亚硝氮来源于接种污泥原有的亚硝化细菌产生及进水中少量亚硝氮,随后下降说明亚硝化细菌可能因无法适应环境被系统淘汰而无亚硝氮积累,同时好氧反硝化过程中亚硝酸盐还原酶活性可能较高,使得硝氮还原产生的亚硝氮被迅速转化为气体产物.而经过驯化的低温好氧反硝化菌群可能将亚硝氮作为电子受体被还原并直接提高了总氮去除率^[14].综上,通过对普通活性污泥进行为期约 12 d 的定向富集驯化,可使其在低温、高硝氮和高有机物等不良条件下快速形成具有低温好氧反硝化功能的混合菌群,其可在好氧条件下以硝氮为主要电子受体对驯化培养液中的氮素与有机物进行同步去除,且无亚硝氮积累.

2.2 反应器低温启动阶段效能

在 10 ℃ 下 SBR 反应器低温启动阶段历时 45 d,至反应器 COD_{Cr} 和氮素出水质量浓度及去

除率基本达到稳定,视为低温启动阶段结束。

2.2.1 低温启动阶段氨氮的去除

反应器低温启动阶段的氨氮去除如图3所示。可以看出,低温使启动初期亚硝化菌群活性受到一定影响,该时期出水氨氮高达30.46 mg/L;随后活性污泥逐渐适应工艺运行特点及低温条件,出水氨氮质量浓度呈现大幅下降趋势。到第17天,出水氨氮质量浓度已降至10.62 mg/L,去除率升至78.36%,而到第21天,去除率高达84.78%,出水氨氮质量浓度仅为6.43 mg/L;启动后22~35 d,出水氨氮质量浓度出现一定程度的波动,这可能由于污泥系统尚未成熟稳定,在面对较大进水波动时无法保持出水水质稳定;第36天以后,反应器氨氮去除率稳定在81.09%以上,出水氨氮质量浓度稳定保持在6.56~8.65 mg/L,说明其已逐渐适应运行工艺、进水水质和环境温度等条件。从微生物生态学角度看,活性污泥系统已经基本实现稳定,污泥中微生物群落生态位已实现相互分离及动态平衡。然而稳定后出水氨氮仍超标,说明其具有生物强化的提高空间。

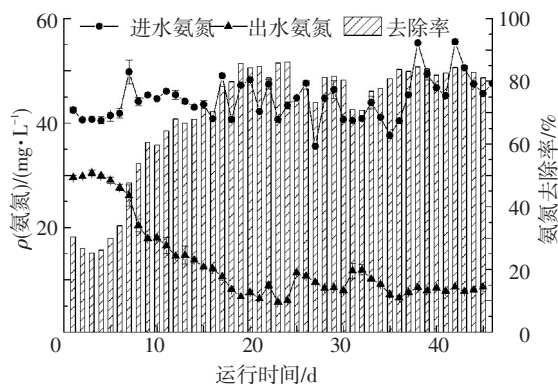


图3 SBR反应器低温启动阶段氨氮去除变化

2.2.2 低温启动阶段氧化态氮的积累

反应器低温启动过程产生的亚硝氮是氨氮转化的重要中间产物,硝氮是好氧阶段氮素终产物及出水总氮重要组成。为判断启动阶段硝化过程与反硝化过程成熟程度,每天选取单周期出水与进水测定并计算其亚硝氮或硝氮质量浓度差值,即亚硝氮或硝氮积累量。

由图4可知,SBR反应器启动后1~6 d亚硝氮基本无积累,这是由于氨氮去除较少,硝化菌能及时将生成的少量亚硝氮转化为硝氮避免积累,同期硝氮积累量也较小;启动后7~13 d,亚硝氮积累量大幅上升,至13 d达最大值13.91 mg/L,与氨氮出水质量浓度的直线下降趋势相符合,这是由于大量进水氨氮被转化为亚硝氮,而能将亚硝氮转化为硝氮的硝酸菌群受限于数量和活性较

低暂时不能将其完全转化,硝氮积累量也呈波动上升趋势;从第14天起,亚硝氮积累量开始大幅下降,从第25天起出水亚硝氮基本保持不积累,这标志着系统中硝化菌群已逐渐成熟并可中间产物亚硝氮大量乃至完全去除,避免亚硝氮积累现象发生。同期硝氮积累量逐渐下降,并从第39天起实现较为稳定的硝氮积累量,为10.71~11.25 mg/L,这是由于异养缺氧反硝化菌群与硝化菌群作用下生成与去除的硝氮数量趋于平衡,导致硝氮积累量保持稳定。

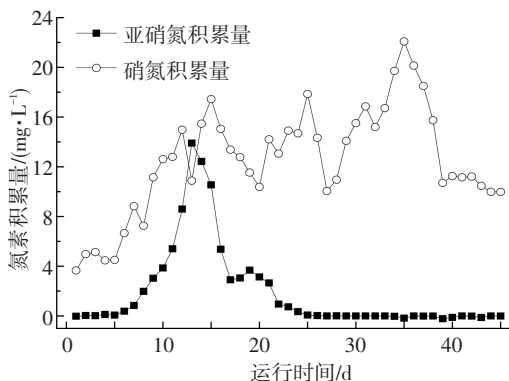


图4 SBR反应器低温启动阶段亚硝氮与硝氮积累量

2.2.3 低温启动阶段总氮与有机物的去除

反应器出水总氮质量浓度呈现三段式下降趋势,见图5。启动后前16 d,大量亚硝氮积累导致出水总氮主要由氨氮和亚硝氮组成,总氮去除率较低,出水质量浓度保持在34.05~41.76 mg/L;在17~36 d,亚硝氮积累现象已逐步解除,硝氮逐渐积累,出水总氮质量浓度明显下降并保持在21.87~31.55 mg/L,本阶段出水总氮主要为硝氮和氨氮;从第37天起,总氮去除率达61.29%以上,出水总氮质量浓度继续下降并持续保持在18.54~19.76 mg/L,尚未达到一级A标准,出水总氮主要包括硝氮和氨氮,亚硝氮无积累。

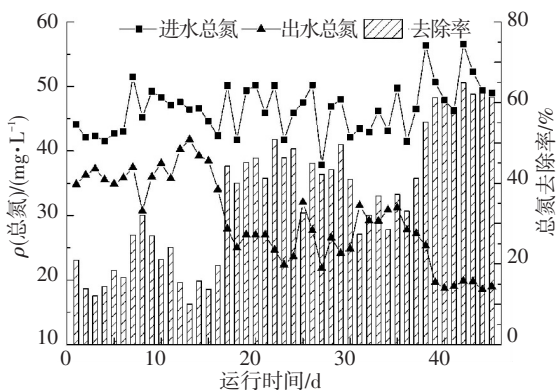


图5 SBR反应器低温启动阶段总氮去除变化

对于有机物,启动开始后前3 d反应器因接种污泥需要适应低温环境及新运行参数,出水

COD_{Cr} 高于 88.27 mg/L, 远超 COD 出水一级 A 标准; 从第 4 天起, 反应器对 COD_{Cr} 的去除率逐渐上升; 第 41 天以后去除率稳定在 69.97% 以上, 出水 COD_{Cr} 保持在 39.07~46.23 mg/L, 基本达到一级 A 标准。相比氮素的去除, 低温对有机物的去除影响较小, 无需生物强化即可实现 COD_{Cr} 达标。综上, SBR 反应器在低温下运行出水中氨氮和总氮难以符合排放标准, 是制约低温污水处理达标的主要瓶颈。

2.3 反应器低温强化阶段效能

SBR 反应器低温启动并保持稳定后, 为达到碳氮同步去除并满足出水达标要求, 将经驯化低温好氧反硝化菌群结合聚氨酯泡沫载体投加 2# SBR 反应器, 与不投加强化的 1#SBR 反应器形成对比, 通过连续测定强化与否水质变化分析生物强化效能。

2.3.1 低温强化阶段氨氮的去除

反应器低温强化阶段的氨氮去除对比见图 6。未经强化的 1#反应器出水氨氮质量浓度大致在 7.41~10.22 mg/L, 无法达到一级 A 标准, 而经过强化的 2#反应器出水氨氮质量浓度经历了明显的下降趋势。低温异养强化开始前 9 d, 2#反应器出水氨氮质量浓度从 7.87 mg/L 下降至第 9 天的 5.22 mg/L; 随后 2#反应器出水氨氮继续下降, 强化开始后的 11~30 d, 2#反应器出水氨氮质量浓度持续保持在 3.01~4.21 mg/L, 出水氨氮质量浓度最低发生在第 21 天, 约为 3.01 mg/L。对反应器氨氮去除率进行对比也可得到类似趋势。其中强化开始后第 21 天, 强化与未强化的氨氮去除率相差最大(高达 16.89%), 而强化开始后第 27 天, 2#反应器氨氮去除率达到最高(93.35%)。氨氮去除率提升范围为 10.31%~16.89%。

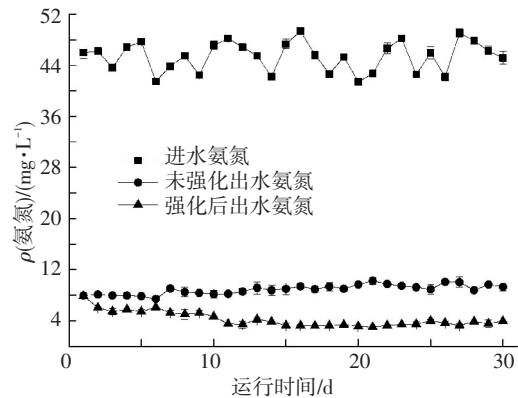


图 6 SBR 反应器低温强化阶段氨氮去除对比

低温生物强化后对氨氮去除能力的提升可能有以下原因: 强化使用的低温好氧反硝化菌群具

有在低温下大量利用有机物作为碳源对氮氮进行转化的能力, 在人为投加强化后由于具有可观的数量和活性, 可使氨氮质量浓度有明显的去除; 此外, 强化载体聚氨酯泡沫具有明显的孔隙结构和非常大的比表面积, 对外界不良因素如低温及代谢产物抑制等有一定缓解作用, 并能避免部分生长速度缓慢的自养混合菌群流失。

2.3.2 低温强化阶段氧化态氮的积累

由于 1#反应器此前已达到稳定状态使得亚硝氮无积累; 而同期的 2#反应器经强化后前 9 d 的亚硝氮积累量出现小幅上升趋势, 第 9 天达最大值时仅为 0.45 mg/L, 随后亚硝氮积累量逐渐下降至第 20 天恢复为 0 mg/L, 并基本保持这一状态。综上, 低温生物强化对亚硝氮的积累量影响不大, 强化期间出现小幅增长后随即下降并恢复无积累。

每天选取单周期出水与进水测定并计算硝氮积累量, 以反映反应器硝氮的变化趋势, 结果如图 7 所示。可以看出, 1#反应器的硝氮积累量基本保持在 11.14~14.48 mg/L, 经强化后 2#反应器的硝氮积累量出现了明显下降。2#反应器强化开始后第 17 天硝氮积累量下降至 7.31 mg/L 并趋于平稳, 其中与 1#反应器的最大差值发生在第 24 天(高达 8.22 mg/L), 2#反应器的最低硝氮积累量为 6.02 mg/L, 发生在强化开始后第 28 天, 同期的 1#反应器硝氮积累量高达 12.03 mg/L。低温好氧反硝化驯化菌群可在好氧条件下利用进水有机物对氨氮和硝氮进行同步去除, 因此, 2#反应器的硝氮积累量出现了明显下降趋势, 强化效果明显^[15]。考虑到进水中可利用碳源并不十分充足, 而反应器对原水的氨氮及产生硝氮的去除均需要碳源参与, 所以, 出水仍含有一定质量浓度的氨氮和硝氮, 而无法实现对氮素物质的完全去除。

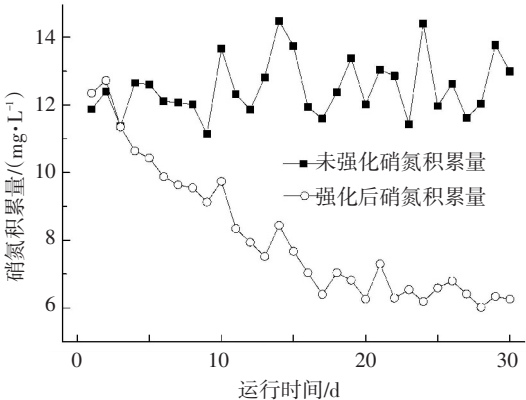


图 7 SBR 反应器低温强化阶段硝氮积累量对比

2.3.3 低温强化阶段总氮与有机物的去除

反应器低温强化阶段的进出水总氮质量浓度

对比见图8所示.可以看出,未经强化的1#反应器出水总氮质量浓度基本保持在21.11~25.44 mg/L,远不能达到总氮出水一级A标准.而经过低温强化的2#反应器出水总氮质量浓度有非常明显的下降趋势,体现了低温好氧反硝化驯化菌群对进水中的总氮确实有显著的强化去除效果.从第11天起,2#反应器出水总氮质量浓度下降至13.48 mg/L以下,强化开始的16~30 d,2#反应器出水总氮质量浓度基本保持在10.77~11.76 mg/L.通过计算得出,1#反应器总氮去除率基本稳定在44.04%~55.62%,而经强化的2#反应器的总氮去除率则逐渐升高:从强化开始后第15天起,总氮去除率达75.19%以上,同期1#反应器的总氮去除率仅为50.38%;强化开始后第24天,强化与未强化的总氮去除率相差最大(高达32.44%),而强化后2#反应器总氮去除率最高发生在低温强化开始后第27天,其去除率为78.59%.2#反应器总氮去除率较未强化反应器提高25.07%~32.44%.

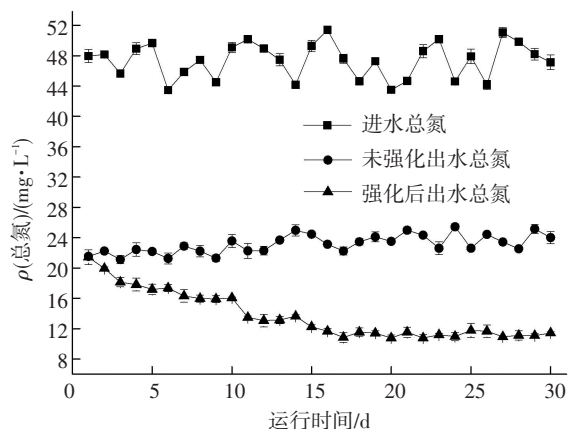


图8 SBR反应器低温强化阶段总氮去除对比

由于第27天时2#反应器对氨氮和总氮降解去除率最高,选取该天测定污泥指标.经测定,第27天的载体附着生物膜平均干质量为0.142 g,1#和2#反应器混合液污泥质量浓度分别为3.501与3.062 g/L,计算得2#反应器总污泥质量浓度为4.127 g/L,污泥负荷分别为0.987和1.215 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.综上,挂膜载体投加有效提高了反应器总污泥质量浓度,并有效改善好氧反硝化菌群在系统结构中比例,由污泥负荷对比可知,2#反应器总氮去除的改善说明低温好氧反硝化菌群有效提升了单位污泥质量浓度下氮素的去除能力.

未经强化的1#反应器出水 COD_{Cr} 在41.44~51.62 mg/L,基本能达到COD出水一级A标准,其中最低出水 COD_{Cr} 41.44 mg/L发生在低温强化开

始后第25天.经过低温强化的2#反应器出水 COD_{Cr} 则出现了较明显的下降趋势,由强化开始后第1天的46.93 mg/L逐渐下降至第9天的40.43 mg/L,并从第10天起基本稳定在37.12~38.76 mg/L,其中最低出水 COD_{Cr} 37.12 mg/L发生在低温强化开始后第18天.强化阶段2#反应器的出水 COD_{Cr} 比同期未强化的1#反应器更低且更平缓稳定,这可能是由于低温好氧反硝化驯化菌群在生长中需要利用大量有机碳源作为营养和能量的来源,对碳源的利用率更高,使得2#反应器出水质量浓度有明显的下降,同时出水质量浓度整体变化趋势更为稳定.通过计算 COD_{Cr} 去除率也可得出类似结论,在低温生物强化开始后,2#反应器的 COD_{Cr} 去除率逐渐升高,开始后的第8天起,其 COD_{Cr} 去除率达72.22%以上,强化开始后第16天, COD_{Cr} 去除率达到最高(76.55%),同时其与未强化的 COD_{Cr} 去除率相差也最大,差值高达8.18%.

2.3.4 低温强化阶段单周期动态分析

为反映强化阶段单周期不同时段的水质动态变化,选取强化效果基本稳定的第28天作为研究对象,通过每小时测定未强化与强化反应器的单周期水质指标,着重分析低温好氧反硝化强化效能变化的动态关系.其氮素转化情况及氮素与有机物动态关系见图9、10所示.可以看出,进入反应器后的污水中氨氮、总氮和 COD_{Cr} 质量浓度较0 h的未处理原水质量浓度明显下降,这是由于反应器体积置换比为40%,污水进入反应器后立即与处理后水样稀释导致质量浓度明显下降,此外经过0.5 h的预缺氧段及0.5 h的好氧处理,部分氮素和有机物被系统转化去除.通过图9中氮素转化情况可知,1#对照反应器在好氧段氨氮转化产生大量硝氮并主要通过随后的缺氧段进行脱氮,而经过强化的2#反应器对氨氮去除更快,且各时段硝氮质量浓度均低于同期未强化反应器,基本稳定在6.02~8.48 mg/L.这说明好氧反硝化强化使得好氧段硝氮产生后随即被部分转化为气态产物脱离系统.由图10可知,由于采用缺氧反硝化导致1#反应器在好氧段的总氮质量浓度仅有约0.64 mg/L的轻微下降,而2#反应器因具有好氧反硝化作用在好氧段使得总氮和 COD_{Cr} 质量浓度同步大幅下降,随后由于有机物质量浓度较低,2#反应器在缺氧段总氮仅去除约2.58 mg/L,但同期总氮质量浓度仍低于1#对照反应器.值得一提的是,反应器全周期均未检出亚硝氮,说明其在产生后随即被转化,避免影响总氮去除率.通过综合分析氮素及有机物转化可知,经过低温好氧

反硝化强化后,反应器可有效利用好氧段有机物较丰富的特点大量去除总氮,避免后置缺氧段碳源不足对脱氮过程的负面影响,并实现了碳氮同步去除。

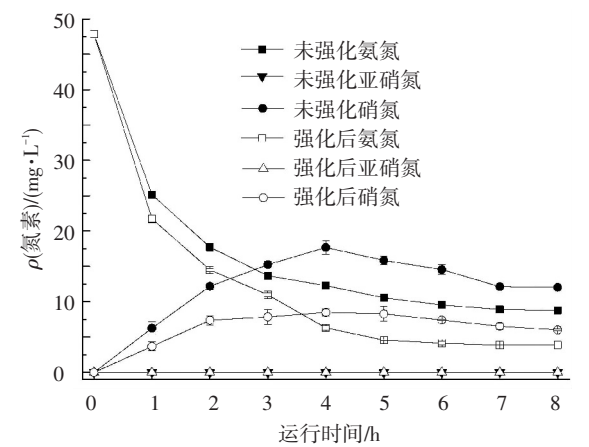


图 9 强化开始第 28 天反应器单周期氮素转化

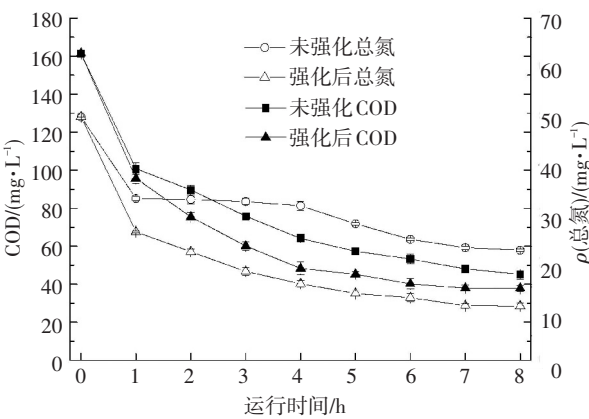


图 10 强化开始第 28 天反应器单周期水质变化

2.3.5 载体潜在缺氧内核反硝化分析

为排除载体内部可能存在的缺氧区域对强化反应器脱氮效能的影响,分别取新鲜活性污泥 40.00 mL+灭菌生活污水 160.00 mL、新鲜活性污泥 40.00 mL+灭菌生活污水 160.00 mL+灭菌后未挂膜聚氨酯泡沫4块和新鲜活性污泥40.00 mL+

灭菌生活污水 160.00 mL+菌群挂膜聚氨酯泡沫 4 块加入 500.00 mL 摇瓶中摇匀培养,并分别命名为 1、2、3 号摇瓶,摇床温度和转数分别为 10 ℃ 和 150 r/min.经过 3 d 的摇瓶培养,1 号摇瓶中总氮质量浓度由初始值(41.97±0.55) mg/L 下降至 (38.15±0.17) mg/L,加入未挂膜载体的 2 号摇瓶中总氮由初始值下降至 (33.67±0.32) mg/L,而加入驯化菌群挂膜载体的 3 号摇瓶中总氮由初始值下降至 (26.28±0.59) mg/L.通过对比可以得出: 1 号摇瓶中由于活性污泥中微生物同化利用氨氮导致总氮稍稍下降;2 号摇瓶中加入的聚氨酯载体具有多孔结构,其内部可能存在缺氧区域,使部分脱氮微生物附着生长于其中,摇瓶中硝化作用产生的硝氮在该区域得到缺氧反硝化去除并引起总氮小幅下降;3 号摇瓶中由于加入驯化菌群挂膜载体,可在载体表面好氧区域去除硝化作用产生的硝氮,并在其内部缺氧区域实现缺氧反硝化以继续去除硝氮和亚硝氮,避免亚硝氮积累以有效降低总氮质量浓度。

2.4 停止强化投加后持续效能

经过长达 30 d 的低温强化后,2#反应器停止更换挂膜载体并持续运行 10 d.持续测定停止投加期间的进出水指标,并与 1#反应器出水对比分析投加菌群的持续性能.结果表明:在停止投加强化后 2#反应器仍具有一定的低温强化效果.强化开始后第 30 天、强化停止后第 5 天及强化停止后第 10 天的反应器出水指标见表 3 所示.可以看出,除了出水亚硝氮均无积累外,2#反应器的各项出水指标在停止强化后仍优于同期 1#反应器出水;随着停止强化时间不断变长,2#反应器残余菌群影响效果呈现较缓慢的弱化趋势,但停止强化长达 10 d 时,2#反应器相比 1#反应器的氨氮、硝氮、总氮和 COD_{Cr} 出水质量浓度仍分别有 2.43, 3.07, 6.02 和 3.63 mg/L 的下降,体现出其具有一定持久性。

表 3 强化停止后反应器持续运行出水水质对比

		mg · L ⁻¹				
出水水质		氨氮	亚硝氮	硝氮	总氮	COD _{Cr}
强化 30 d	1#	9.29±0.61	0	12.99±2.99	24.01±0.79	42.26±7.16
	2#	3.95±0.24	0	6.26±3.82	11.42±0.16	38.29±3.61
停止 5 d	1#	10.25±0.63	0	12.58±0.87	24.56±0.49	48.57±1.59
	2#	5.98±0.19	0	7.98±1.64	15.17±0.59	40.25±6.51
停止 10 d	1#	8.64±0.31	0	12.34±1.34	22.71±0.27	46.08±1.95
	2#	6.21±0.27	0	9.27±2.43	16.69±0.95	42.45±2.31

停止更换挂膜载体后,低温好氧反硝化菌群的数量与活性受到影响,并出现一定流失,导致强

化效能随着停止强化时间增长而不断弱化,但在停止强化后,残余低温好氧反硝化驯化菌群仍具

有一定强化作用,这可能是由于载体挂膜阶段将低温异养驯化菌群固定在其内部的孔隙结构中,延缓了低温异养驯化菌群被系统淘汰,并降低了菌群受外界不良影响的影响,延缓其被系统中其他微生物淘汰的进程,具有更长久的停留时间,并体现一定的持续强化去除效能。

3 结 论

1)通过快速富集驯化得到一组低温好氧反硝化菌群,该驯化菌群在 10 ℃ 好氧环境下可实现氨氮、总氮和有机物的高效同步去除。

2)通过低温好氧反硝化菌群与聚氨酯载体结合后投加进行生物强化,相比 1#未强化反应器,2#反应器氨氮去除率提升 10.31%~16.89%,总氮去除率提升 25.07%~32.44%,且各项指标出水均达到一级 A 标准。

3)停止低温生物强化 10 d 后,残留低温好氧反硝化菌群仍具有持续强化作用。相比 1#反应器,2#反应器氨氮、硝氮、总氮和 COD_{Cr} 出水质量浓度仍分别下降 2.43,3.07,6.02 和 3.63 mg/L。

4)对低温好氧反硝化菌群的驯化及投加方法进行后续优化,可作为改善污水低温脱氮效能的一种新型强化手段,对工程实际中水厂冬季快速启动和稳定运行提供一定参考。

参考文献

[1] 任南琪,马放,杨基先,等.污染控制微生物学[M]. 3 版.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.

[2] HEAD M A, OLESZKIEWICZ J A. Bioaugmentation for nitrification at cold temperatures[J]. Water Research, 2004,38(3):523-530.

[3] 杨小丽,叶峰,宋海亮,等.基于污水厂运行数据的低温生物脱氮强化研究[J].中国给水排水,2009,25(1):82-85,88.

[4] 马放,郭静波,赵立军,等.生物强化工程菌的构建及其在石化废水处理中的应用[J].环境科学学报,2008,28(5):885-891.

[5] 山丹,马放,王金生,等.低温下生物强化 SBR 工艺处理苯胺废水的研究[J].中国环境科学,2009,29(8):844-849.

[6] 郭静波,马放,赵立军,等.佳木斯东区污水处理厂 SBR 工艺的低温快速启动[J].给水排水,2007,33(5):13-17.

[7] 赵庆建,赵立军,崔袁园,等.哈尔滨太平污水厂 AO 工艺的低温快速启动[J].中国给水排水,2006,22(8):84-88.

[8] 王小菊,何春平,王震,等.高效硝化细菌的筛选及特性研究[J].中国环境科学,2013,33(2):286-292.

[9] 贲岳,陈忠林,徐贞贞,等.聚氨酯固定高效优势耐冷菌处理低温生活污水[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(2):76-80.

[10] 张雷,苗月,姜安玺.耐低温硝化细菌固定化技术及脱氮效果[J].化工进展,2010,29(8):1567-1570.

[11] YAO Shuo, NI Jinren, CHEN Qian, et al. Enrichment and characterization of a bacteria consortium capable of heterotrophic nitrification and aerobic denitrification at low temperature[J]. Bioresource Technology, 2013, 127: 151-157.

[12] 陈媛.固定化聚氨酯载体的净化效果及微生物的群落结构解析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.

[13] 国家环保总局.水和废水监测分析方法[M]. 4 版.北京:中国环境科学出版社,2003.

[14] TREUSCH A H, LEININGER S, KLETZIN A, et al. Novel genes for nitrite reductase and amo-related proteins indicate a role of uncultivated mesophilic crenarchaeota in nitrogen cycling[J]. Environmental Microbiology, 2005, 7(12): 1985-1995.

[15] YAO Shuo, NI Jinren, MA Tao, et al. Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification at low temperature by a newly isolated bacterium, *Acinetobacter* sp. HA2[J]. Bioresource Technology, 2013, 139:80-86.

(编辑 刘 彤)