

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.05.006

浙江某工业废水处理厂升级改造运行效果解析

张晓霞¹, 熊仁久², 周家中³, 杨忠启³, 吴迪³, 韩文杰³

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 浙江省桐乡市水务集团, 浙江 桐乡 314500; 3. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266555)

摘要: 浙江某工业废水处理厂升级改造, 采用 AAO—MBBR 复合生物膜工艺, 在未新增建设用地和扩建池容的基础上, 日处理量由 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提高至 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。改造后实际运行出水 COD、TP、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 和 TN 浓度分别为 (37.7 ± 6.61) 、 (0.09 ± 0.03) 、 (0.25 ± 0.14) 和 $(5.87 \pm 1.54) \text{ mg/L}$, 出水水质稳定达到一级 A 标准。实际监测表明, 在好氧 MBBR 区存在 TN 去除现象, 约占 TN 总去除量的 10.36%。系统内的优势硝化菌属为硝化螺旋菌属 *Nitrospira*, 其在悬浮载体生物膜和活性污泥中的相对丰度分别为 8.98% 和 0.92%, 悬浮载体的投加使硝化细菌得到有效富集; 反硝化菌在生物膜中的占比为 7.94%, 为悬浮载体同步硝化反硝化 (SND) 效果的发生提供了微观保证, 提高了 TN 去除率。

关键词: 工业废水处理厂; 升级改造; MBBR 工艺; 同步硝化反硝化; 悬浮载体

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)05-0037-07

Analysis on Upgrading and Retrofitting Effect of an Industrial Wastewater Treatment Plant in Zhejiang

ZHANG Xiao-xia¹, XIONG Ren-jiu², ZHOU Jia-zhong³, YANG Zhong-qi³, WU Di³, HAN Wen-jie³

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjing 300074, China; 2. Zhejiang Tongxiang WWTP, Tongxiang 314500, China; 3. Qingdao Spring Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: An industrial wastewater treatment plant in Zhejiang was upgraded by a combined process consisting of anaerobic/anoxic/oxic activated sludge process and moving bed biofilm reactor (AAO - MBBR). Without changing the footprint and increasing the reactor volume, the treatment capacity increased from $30\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ to $60\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ after retrofitting. Concentrations of COD, TP, $\text{NH}_3 - \text{N}$ and TN in effluent were $(37.7 \pm 6.61) \text{ mg/L}$, $(0.09 \pm 0.03) \text{ mg/L}$, $(0.25 \pm 0.14) \text{ mg/L}$ and $(5.87 \pm 1.54) \text{ mg/L}$, respectively, which met the first class A standard. Actual operation data indicated that TN removal existed in the aerobic MBBR zone (accounting for 10.36% of total TN removal). *Nitrospira* was the dominant nitrifying bacteria in the system, and its relative abundance in the suspended carrier and activated sludge was 8.98% and 0.92%, respectively, indicating that the addition of suspended carrier could effectively enrich the nitrifying bacteria. The proportion of denitrifying bacteria

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07106005); 青岛西海岸新区自主创新重大专项 (2019-20)

通信作者: 吴迪 E-mail: wudi@qdspr.com

on biofilm was 7.94%, which created a micro-environment for the occurrence of simultaneous nitrification and denitrification (SND) in the suspended carrier and improved the TN removal efficiency.

Key words: industrial wastewater treatment plant; upgrading and retrofitting; moving bed biofilm reactor; simultaneous nitrification and denitrification; suspended carrier

工业废水是当前水环境的重要污染源之一,其种类多、成分复杂、可生化性较差,有些还具有毒性,水质、水量波动较大^[1],采用常规生物处理工艺时微生物尤其是硝化菌群难以有效富集^[2],致使处理效果较差,出水水质难以达到排放标准。

移动床生物膜反应器(MBBR)与活性污泥法相融合的复合工艺由于具有强化脱氮除磷、投资占地省、负荷高、抗冲击能力强、可持续升级等特点^[3],在污水处理厂提标提量改造中得到广泛应用。笔者以浙江某工业废水处理厂升级改造为例,分析了MBBR工艺用于处理工业废水的提标提量改造方案及运行效果,旨在为工业废水处理厂提标提量改造的工艺选择、设计和运行提供参考。

1 项目概况

浙江省某工业废水处理厂设计处理水量为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,进水主要为印染废水、养殖废水和皮革废水,原工艺采用一级预处理+二级生化处理,其中,一级预处理单元包括粗格栅+进水泵房、细格栅+旋流沉砂池、预沉池+调节池;二级生化处理单元包括水解酸化池、斜板沉淀池、CAST生物池,尾水消毒后排放,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级B标准。污泥处理包括污泥调节池+带式脱水机房、储泥池+浓缩离心脱水机房两个处理系统,分别处理预沉池污泥和生化处理剩余污泥,脱水后统一外运填埋。实际运行过程中,在处理水量上,随着经济的快速发展,城镇规模不断扩大,区域污水量也不断增加,最大日均处理量达到 $4.65 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,全年有近一半时间日处理量超过设计值,产污率和处理率之间的矛盾较突出;在出水水质上,出水COD为 $(54.42 \pm 3.01) \text{ mg/L}$ 、TP为 $(0.16 \pm 0.11) \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 为 $(0.79 \pm 0.36) \text{ mg/L}$ 、TN为 $(7.03 \pm 1.64) \text{ mg/L}$,基本可以达到一级B标准,但利用原有工艺难以继续提高出水水质。因此,该项目急需在原工业废水处理厂基础上进行提标提量改造,改造要求处理量由 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,且出水水质全部达到一级A标准。

提标改造设计进出水水质如下:设计进水COD为 650 mg/L 、 BOD_5 为 180 mg/L 、SS为 350 mg/L 、TN为 45 mg/L 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 为 35 mg/L 、TP为 4 mg/L ;设计出水 $\text{COD} \leq 50 \text{ mg/L}$ 、 $\text{BOD}_5 \leq 10 \text{ mg/L}$ 、 $\text{SS} \leq 10 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} \leq 15 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N} \leq 5(8) \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} \leq 0.5 \text{ mg/L}$ 。

2 技术路线与设计方案

2.1 工艺选择

针对现状工艺处理效果,工艺方案确定时遵循以下原则:

① 由于扩建用地非常有限,需选用高效、节省占地的处理工艺,尽量减少对原处理设施主体结构改动;

② 进水中不可生物降解有机物的含量较高,因此处理工艺需具备深度去除有机物的能力;

③ 出水对氮磷指标控制要求较高,因此处理工艺需强化硝化和反硝化功能,并同时具备深度去除磷的能力;

④ 进水主要为工业废水,水质、水量波动大,因此所选工艺需技术成熟,对水质变化适应能力强,运行稳定,能保证出水水质达到排放标准的要求。

2.2 改造方案

经过论证后,确定本次提标提量工程的技术路线为“预处理+AAO—MBBR复合生物膜法生物处理+物化深度处理”三级处理工艺,污泥采用“污泥重力浓缩+机械脱水”处理工艺。现状一级预处理单元和三级处理中的紫外线消毒均按 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模建设,原工程全部保留利用,主要为生化池改造。现状二级处理中的两组“水解+CAST”工艺改造为“AAO—MBBR复合生物膜”工艺,向好氧区投加悬浮载体,投加总有效比表面积为 $2.22 \times 10^6 \text{ m}^2$,填充率为22%,悬浮载体型号为SPR_II型,载体相对密度为0.94~0.97、有效比表面积 $\geq 620 \text{ m}^2/\text{m}^3$,符合《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体填料》(CJ/T 461—2014)行业标准的要求^[4]。该项目生化段分为3组,并联运行,单组池容均为 $14\,900 \text{ m}^3$,总停留时间为16.8 h,其中好氧区停留时间为10 h(2/3为

悬浮载体区),水深为6.8 m,气水比为6.5:1。

项目改造前后原有及新增构筑物与设备如表1所示。升级改造后工艺流程见图1。

表1 改造前后主要构筑物与设备情况

Tab.1 Main structures and equipments before and after retrofitting

项 目	原有构筑物与设备	新增构筑物与设备
一级处理	粗格栅及进水泵房、细格栅;旋流沉砂池、预沉池及调节池	保留利用
二级处理	水解酸化池、CAST生物池、鼓风机房	AAO复合生物膜生物池;新建4座 $\varnothing 25$ m辐流二沉池、配水井及污泥回流泵房;增加1套同型号鼓风机设备
三级处理	紫外消毒渠	新建1座加砂高速沉淀池、1座转盘滤布滤池和1座加药间
污泥处理	污泥调节池、储泥池、带式脱水机房、浓缩离心脱水机房	新建1座 $\varnothing 10$ m污泥浓缩池

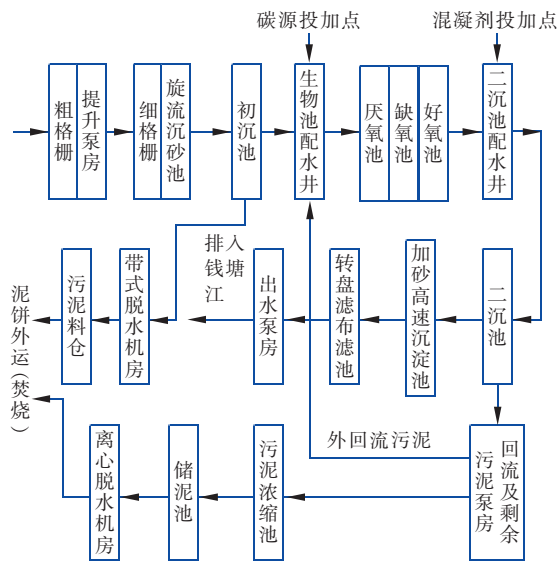


图1 升级改造后工艺流程

Fig.1 Flow chart of treatment process after upgrading and retrofitting

3 改造后运行效果分析

跟踪了改造后系统在2018年1月1日—12月31日共计365 d的生化段运行效果,该项目夏季水温为26~28℃、冬季水温为13~15℃(持续40 d左右),系统内MLSS约为4 g/L。

3.1 改造后对COD、TP的去除效果

改造后COD、TP去除效果变化见图2。改造后进水COD为 (410.23 ± 150.97) mg/L,出水COD为

(37.7 ± 6.61) mg/L,去除率为 $(89.66 \pm 3.95)\%$ 。改造后,该污水处理厂对COD的去除能力有了大幅提升,在进水水质波动频繁的基础上COD去除率提高,出水水质可以稳定达到一级A排放标准。另外,本次改造后污水处理厂处理规模由 3×10^4 m³/d提升至 6×10^4 m³/d,在不改变池容的条件下,通过MBBR改造,大大提高了原池的处理能力,COD去除容积负荷由 0.285 kgCOD/(m³·d)提升至 0.493 kgCOD/(m³·d),强化了系统对有机物的去除能力,MBBR区的长泥龄及局部好/缺氧微环境也有利于微生物的筛选与富集,对难降解有机物的去除效果更好。

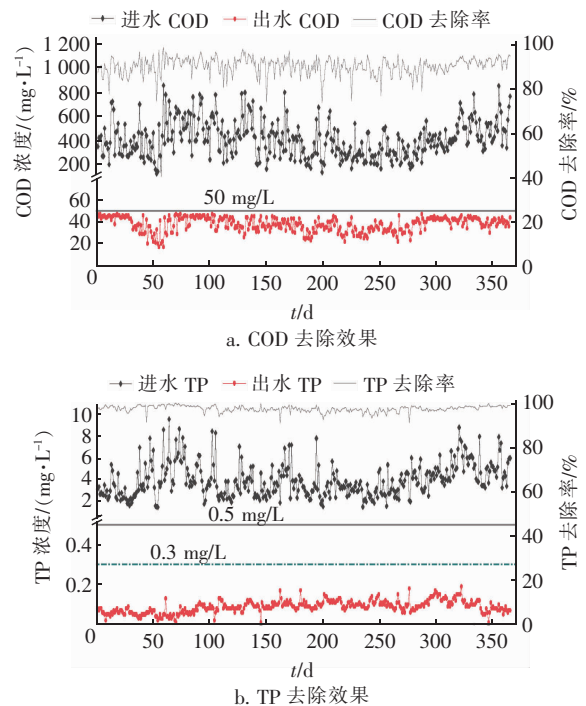


图2 升级改造后对COD、TP的去除效果

Fig.2 COD and TP removal efficiency after upgrading and retrofitting

改造后进水TP浓度提高至 (3.93 ± 1.68) mg/L且存在不规则波动,但改造后出水TP浓度仅为 (0.09 ± 0.03) mg/L,去除率由 $(88.39 \pm 6.98)\%$ 提高至 $(97.35 \pm 1.39)\%$,去除效率更高,出水TP浓度也更加稳定。由于传统活性污泥法脱氮菌群(硝化菌群)一般为长泥龄细菌(15~25 d),而除磷菌群(聚磷菌)一般为短泥龄细菌(3~7 d),因此传统脱氮除磷工艺在污泥龄上存在不可调和的矛盾。通过MBBR改造后,长泥龄的硝化细菌在悬浮载体上富集,因此可以较短泥龄运行悬浮态活性污泥,突破

了污泥龄对同步脱氮除磷的限制,实现了针对脱氮除磷菌群的泥龄分置,有利于生物除磷^[5];同时改造后生化池出水经高效沉淀池、滤布滤池等深度处理后,保证出水 TP 浓度稳定达到准Ⅳ类水标准。

3.2 改造后对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 的去除效果

改造后对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 的去除效果如图 3 所示。改造后进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 $(15.64 \pm 4.1) \text{ mg/L}$, 出水浓度为 $(0.25 \pm 0.14) \text{ mg/L}$, 去除率为 $(98.37 \pm 0.8)\%$ 。改造后水质变化导致进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度有所降低,但由于日处理量增大,实际进水氨氮负荷由 $0.0158 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 增加到 $0.0201 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度和去除率更加稳定,可以稳定达到准Ⅳ类水标准。利用 MBBR 工艺进行改造后, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除容积负荷达到 $0.0198 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,较改造前提高了 30.3%,改造后系统的硝化能力更强,在冬季最低温度 ($13 \sim 15^\circ\text{C}$) 时仍可以稳定达标, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除能力几乎不受影响。由于传统脱氮除磷工艺中活性污泥经过厌氧/缺氧/好氧环境的不断交替,导致好氧硝化细菌始终得不到较好的富集^[6],丰度仅维持在 2%~4%,改造后通过在好氧池投加悬浮载体,为长泥龄的硝化细菌提供了附着生长的载体,使得硝化细菌得到高效富集,大大增加了硝化细菌的丰度,有利于硝化反应的进行。

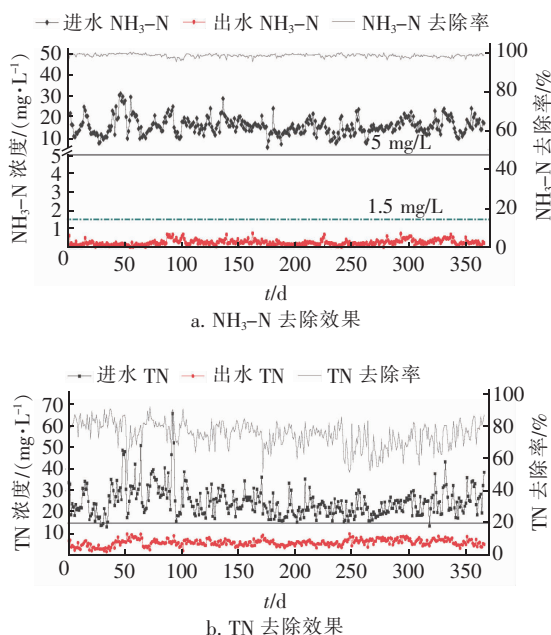


图3 改造后对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 的去除效果

Fig.3 $\text{NH}_3\text{-N}$ and TN removal efficiency after upgrading and retrofitting

改造后进水 TN 为 $(24.73 \pm 6.87) \text{ mg/L}$, 出水 TN 为 $(5.87 \pm 1.54) \text{ mg/L}$, 去除率为 $(75.11 \pm 8.11)\%$ 。该工业废水处理厂在改造后进水 TN 浓度变化较大,均值较改造前下降 14 mg/L 左右,这主要是由于改造后扩大了纳污范围,使得进水 TN 降低且波动较大,但是改造后进水 TN 负荷由 $0.0260 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 提高至 $0.0320 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,出水 TN 浓度仍比改造前降低 1.2 mg/L 左右,稳定达到一级 A 标准。改造前后 TN 去除容积负荷分别为 0.0217 、 $0.0242 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,改造后较改造前提升了 11.5%。

对该工业废水处理厂沿程 TN 去除效果进行了分析,结果如图 4 所示。在好氧区存在 TN 去除现象,经过核算约占总去除量的 10.36%,去除氮素约 2.21 mg/L 。

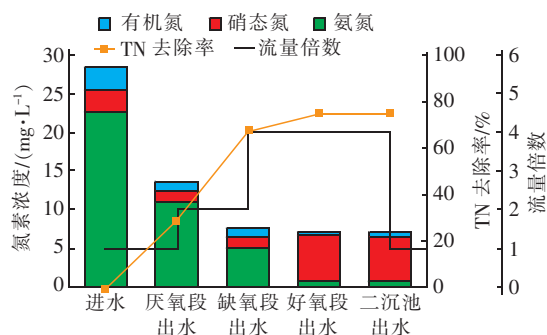


图4 沿程断面氮素浓度变化

Fig.4 Variation of nitrogen concentration along process

在利用 MBBR 进行改造工艺中,好氧 MBBR 区常会出现同步硝化反硝化 (SND) 现象^[7-8],这主要是由于微生物在悬浮载体上形成的生物膜随着溶解氧渗透能力的弱化出现了功能菌分置现象,其中,生物膜外层形成以硝化细菌为主的好氧生物膜,而内层存在厌/缺氧微环境,会富集反硝化菌,反硝化菌可以直接利用生成的硝态氮和生物膜中内碳源进行反硝化作用^[9],在节省碳源的同时也强化了 TN 的去除。

4 MBBR 微生物分析

为进一步从微观层面探究“镶嵌”悬浮载体对系统提升脱氮除磷效果的作用,对该工业废水处理厂 MBBR 区悬浮载体上的生物膜和悬浮态污泥进行了基于 16S rDNA 的扩增子高通量测序,属水平下系统优势微生物组成如图 5 所示,悬浮载体上生物膜和悬浮态污泥中微生物分布差异如图 6 所示。

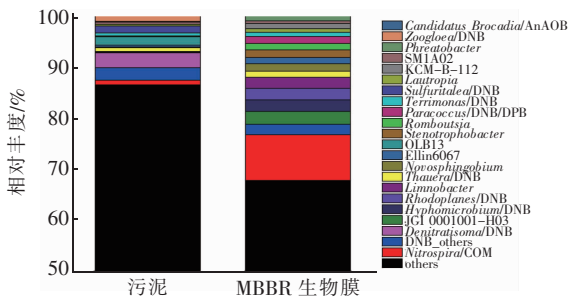


图5 系统活性污泥及生物膜中微生物属水平物种相对丰度

Fig. 5 Relative abundance distribution at genus level of activated sludge and biofilm

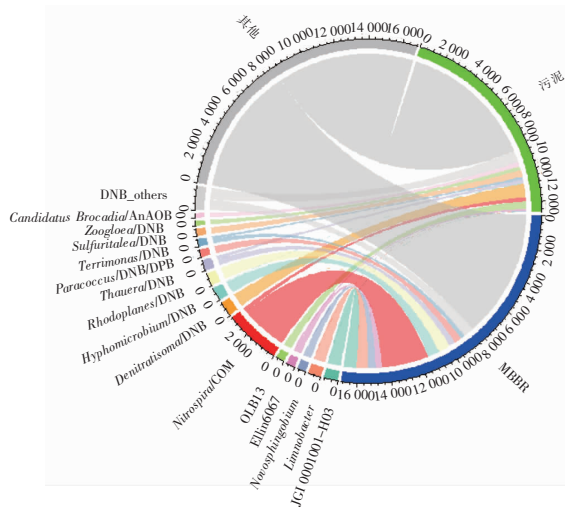


图6 活性污泥及生物膜中微生物在属水平的差异分析

Fig. 6 Difference at genus level of microorganism in activated sludge and biofilm

系统中的优势硝化菌属为硝化螺旋菌属 *Nitrospira*, 其在悬浮载体生物膜和活性污泥中的相对丰度分别为 8.98% 和 0.92%, *Nitrospira* 更容易以附着态形式存在, 其在悬浮载体上的丰度是活性污泥中的 9.76 倍。与所熟知的来自变形菌门 (*Proteobacteria*) 的硝化细菌不同, *Nitrospira* 独立于硝化螺旋菌门 (*Nitrospirae*), 大多菌属被证实具有全程氨氧化的能力, 即一类微生物可以完成氨氮氧化成硝酸盐氮的过程, 统称为 Comammox。Comammox 携带负责氨氧化的 AMO 和 HAO, 同时还携带亚硝酸盐氮氧化必需的 NXR^[10-12], 因此, 虽然系统中未检测到丰度较高的 AOB 菌属, 但仍表现出了良好的硝化性能, 这可能与悬浮填料上大量存在的 *Nitrospira* 有关。此外, *Nitrospira* 对于基质的亲和力大, 更适宜生存在低氨氮环境中, 因此, 其作为硝化菌中优势种属也反映了污水厂处理效果较为良好。

在悬浮载体生物膜上发现了部分具有反硝化功能的菌群, 主要涉及 *Hyphomicrobium*、*Rhodoplanes*、*Thauera*、*Paracoccus* 和 *Terrimonas* 等, 总占比达到 7.94%, 其中, *Hyphomicrobium* 和 *Paracoccus* 在生物膜上的丰度分别为 2.27% 和 1.37%, 分别为污泥中的 21 倍和 137 倍, 研究表明, 这两种菌群中的部分菌属可以在好氧条件下进行反硝化作用^[13-14], 悬浮载体生物膜上反硝化菌的存在也为好氧 MBBR 区存在 SND 现象提供了微观证明。*Hyphomicrobium* 可利用有毒难降解有机物进行反硝化脱氮, 具有多种代谢能力, 例如降解二氯甲烷、甲胺磷、二甲基硫醚和甲醇等^[15]。此外, *Thauera* 中的部分菌种可降解苯、喹啉等物质, 部分菌种在反硝化时对亚氮、硝态氮的抗毒能力较强; *Terrimonas* 中的部分菌属能降解蒽类物质; *Novosphingobium* 菌属可高效降解多环芳烃 (PAHs)^[16-17]。该污水厂进水主要为工业废水, 难降解有机物较多, 而 MBBR 工艺通过菌种的高效富集大大提高了对难降解有机物的去除能力, 这些菌属的存在也降低了工业废水中有害物质对系统中硝化菌的不利影响, 保证了处理效果。

Shannon 指数和 Simpson 指数可以用来估算样品中微生物多样性, Shannon 指数越大则群落多样性越高, Simpson 指数越小则群落多样性越高; Chao1 值可以用来衡量菌群的丰富度, Chao1 值越高则丰富度越高。悬浮载体生物膜样品的 Shannon 指数 (4.20) 和 Chao1 值 (1 045.91) 均要小于污泥样品 (分别为 5.42、1 264.51), 而 Simpson 指数 (0.11) 要远高于污泥样品 (0.012), 说明相较于活性污泥, 悬浮载体上的微生物多样性及物种丰富度偏低, 而物种均一化程度则较高 (Coverage 为 0.99), 这主要是由于悬浮载体具有菌种筛选作用, 更适于长泥龄的硝化细菌的富集, 逐渐淘汰其他杂菌, 对于保障系统硝化效果具有重要意义。

5 结论

① 采用“AAO—MBBR 复合生物膜”工艺对 CAST 工艺进行改造, 改造后出水 COD、氨氮、TN、TP 分别为 (37.7 ± 6.61)、(0.25 ± 0.14)、(5.87 ± 1.54)、(0.09 ± 0.03) mg/L, 相关指标稳定达到一级 A 标准。

② 改造后, 在水量、水质大范围波动以及冬季低温条件下, 亦具有良好、稳定的处理效果, 系统的耐冲击负荷和耐低温能力得到增强。

③ 在 MBBR 区存在同步硝化反硝化现象, TN 去除量约为 2.21 mg/L, 占总去除量的 10.36%。

④ MBBR 悬浮载体对微生物具有筛选和专性富集作用, 其中硝化细菌在悬浮载体中的相对丰度为 8.98%, 是污泥中的 9.76 倍; 反硝化菌在悬浮载体上的相对丰度为 7.94%, 为 SND 提供了微观保证; 同时, 系统中存在较高丰度可降解难降解有机物的菌属, 为出水 COD 浓度稳定达标提供了保障。

参考文献:

- [1] 吴晴, 刘金泉, 王凯, 等. 高级氧化技术在难降解工业废水中的研究进展[J]. 水处理技术, 2015, 41(11): 25-29.
WU Qing, LIU Jinqun, WANG Kai, et al. Research progress of advanced oxidation processes in the treatment of refractory industrial wastewater[J]. Water Treatment Technology, 2015, 41(11): 25-29 (in Chinese).
- [2] LIU R Y, JADEJA N B, YANG M Y, et al. Shifts in microbial community and its correlation with degradative efficiency in a wastewater treatment plant[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2015, 176(8): 2131-2143.
- [3] 杨晓美, 宋美芹, 吴迪, 等. 新型悬浮载体强化脱氮除磷技术用于高标准污水处理[J]. 中国给水排水, 2017, 33(16): 97-102.
YANG Xiaomei, SONG Meiqin, WU Di, et al. Application of new style suspended carriers enhancing nitrogen and phosphorus removal in wastewater treatment for high standard[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(16): 97-102 (in Chinese).
- [4] 吴迪. 水处理用悬浮载体填料行业标准解读与投加量设计[J]. 中国给水排水, 2017, 33(16): 13-17.
WU Di. Interpretation of *High Density Polyethylene Suspended Carrier for Water Treatment* and calculation of added amount of suspended carrier[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(16): 13-17 (in Chinese).
- [5] 杨小梅, 张月, 潘丹华, 等. SRT 对 A²/O—MBBR 工艺中聚磷菌特性的影响[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(1): 256-261.
YANG Xiaomei, ZHANG Yue, PAN Danhua, et al. On the effect of sludge age on the behaviors of phosphorus accumulating organisms in processing A²/O—MBBR [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(1): 256-261 (in Chinese).
- [6] 郑志佳, 吴迪, 宋美芹, 等. 移动床生物膜反应器两种不同工艺形式的性能对比[J]. 中国给水排水, 2017, 33(11): 16-21.
ZHENG Zhijia, WU Di, SONG Meiqin, et al. Comparison between two forms of moving bed biofilm reactor[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(11): 16-21 (in Chinese).
- [7] 吴迪. MBBR 在国内的工程应用与发展前景[J]. 中国给水排水, 2018, 34(16): 22-31.
WU Di. Application and development prospect of MBBR in China [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 22-31 (in Chinese).
- [8] 路晖, 辛涛, 吴迪, 等. MBBR 工艺在污水处理厂提量增效中的应用[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4): 100-105.
LU Hui, XIN Tao, WU Di, et al. Application of MBBR in increasing capacity and improving efficiency of a wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 100-105 (in Chinese).
- [9] 丁进, 陶先超, 李维, 等. 移动床生物膜反应器中同步硝化反硝化的实现及动力学分析[J]. 水处理技术, 2014, 40(9): 26-30.
DING Jin, TAO Xianchao, LI Wei, et al. Realization and kinetics analysis of simultaneous nitrification denitrification in moving biofilm reactor[J]. Technology of Water Treatment, 2014, 40(9): 26-30 (in Chinese).
- [10] DAIMS H, LEBEDEVA E V, PJEVAC P, et al. Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria [J]. Nature, 2015, 528(7583): 504-509.
- [11] 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 等. 活性污泥中硝化螺菌 (*Nitrospira*) 的富集及其动力学参数[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5201-5207.
YAO Qian, PENG Dangcong, ZHAO Qiaodi, et al. Enrichment of *Nitrospira* in activated sludge and kinetic characterization [J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 5201-5207 (in Chinese).
- [12] VAN KESSEL M A H J, SPETH D R, ALBERTSEN M, et al. Complete nitrification by a single microorganism [J]. Nature, 2015, 528(7583): 555-559.
- [13] MEIBERG J B M, BRUINENBERG P M, HARDER W. Effect of dissolved oxygen tension on the metabolism of methylated amines in *Hyphomicrobium* X in the absence and presence of nitrate: evidence for 'aerobic' denitrification [J]. Journal of General Microbiology, 1980, 120(2): 453-463.

(下转第 50 页)