

付益乐, 余江培, 黄在辉, 等. 南方某污水处理厂 MBBR 工艺改造效果分析[J]. 净水技术, 2025, 44(10): 100-107, 187.

FU Y L, YU J P, HUANG Z H, et al. Effect analysis of MBBR process reconstruction of a WWTP in southern China[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(10): 100-107, 187.

南方某污水处理厂 MBBR 工艺改造效果分析

付益乐¹, 余江培¹, 黄在辉^{2,3}, 周家中^{2,3}, 吴迪^{2,3}, 杨忠启^{2,3,*}

(1. 葛洲坝集团生态环保有限公司, 湖北武汉 430000; 2. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东青岛 266510; 3. 青岛思普润水处理股份有限公司青岛市绿色低碳生物膜与水环境恢复重点实验室, 山东青岛 266510)

摘要 【目的】 文章探索了污水处理厂处理能力原位升级的路径和效果, 破解城市建设从粗放式发展进入精细化运营背景下, 污水处理厂升级改造面临征地困难与城市用地紧张之间日益突出的矛盾。【方法】 对南方某采用移动床生物膜反应器(MBBR)的污水处理厂二期工程进行了效果跟踪, 分析了改造的实施路径、系统的运行效果和微生物群落结构, 并通过小试试验探究了悬浮载体生物膜的最大硝化性能。【结果】 改造采用“移好补缺”的方式, 好氧区池容降低 20%, 改造后水力停留时间(HRT)仅为同厂活性污泥法的 66.07%。改造后处理水量较改造前提升 76%, 出水水质稳定优于设计排放标准。系统氨氮去除高效稳定, 且基本在 MBBR 区完成。悬浮载体发挥主要硝化作用, 硝化贡献率达 59.92%。载体生物膜挂膜均匀致密, 优势硝化菌属[硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)]在生物膜中的相对丰度为 7.98%, 是活性污泥中的 7.58 倍。【结论】 该工程基于 MBBR“镶嵌式”改造实现了硝化能力的大幅提升, 有效解决了污水处理厂长期超水量运行下出水达标压力大、扩容改造缺地等问题, 保障了系统稳定达标运行, 为类似扩建困难的污水处理厂提质增效提供了技术借鉴。

关键词 移动床生物膜反应器(MBBR) 扩容 原位 硝化性能 生物膜 功能菌群

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)10-0100-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.10.011

Effect Analysis of MBBR Process Reconstruction of a WWTP in Southern China

FU Yile¹, YU Jiangpei¹, HUANG Zaihui^{2,3}, ZHOU Jiazhong^{2,3}, WU Di^{2,3}, YANG Zhongqi^{2,3,*}

(1. Gezhouba Group Eco-Environmental Protection Co., Ltd., Wuhan 430000, China;

2. Qingdao Spring Water Treatment Co., Ltd., Qingdao 266510, China;

3. Qingdao Spring Water Treatment Co., Ltd., Qingdao Key Laboratory of Green and Low Carbon Biofilm and Water Environment Restoration, Qingdao 266510, China)

Abstract [Objective] This paper explores the path and effect of in-situ capacity upgrading of wastewater treatment plants (WWTPs), and resolves the increasingly prominent contradiction between land acquisition difficulties for the upgrading and reconstruction of WWTPs and urban land use shortage under the background where urban construction has shifted from extensive development to refined operation. [Methods] An effect tracking study was conducted on the Phase II project of a WWTP in southern China that adopted a moving bed biofilm reactor (MBBR). The implementation path of the reconstruction, the operating effect of the system, and the microflora structure were analyzed. Additionally, a small-scale test was carried out to investigate the maximum nitrification performance of the suspended carrier biofilm. [Results] The reconstruction adopted the method of "relocating functional units and filling gaps". The volume of the aerobic zone was reduced by 20%, and the hydraulic retention time (HRT) after reconstruction was only 66.07% of that of the activated sludge process in the same WWTP. After the reconstruction, the treated water volume increased by 76% compared with that before reconstruction, and the effluent quality was stably better than the designed discharge standard. The system achieved efficient and stable ammonia nitrogen removal, which was basically completed in the MBBR

[收稿日期] 2024-04-27

[基金项目] 泰山产业领军人才工程专项(tscx202211036); 山东省企业技术创新项目计划(2025637020000473)

[作者简介] 付益乐(1992—), 助理工程师, 主要从事污水厂运营管理工作。

[通信作者] 杨忠启, 男, 正高级工程师, E-mail: yangzq20@126.com。

zone. The suspended carriers played a major role in nitrification, with a nitrification contribution rate of 59.92%. The biofilm on the carriers was uniformly and densely attached. The relative abundance of *Nitrospira*, a dominant nitrifying bacteria genus, in the biofilm was 7.98%, which was 7.58 times that in the activated sludge. [**Conclusion**] This project achieves a significant improvement in nitrification capacity through MBBR "inlaid" reconstruction. It effectively solves the problems of high pressure to meet effluent standards under long-term overcapacity operation of WWTPs and land shortage for capacity expansion and reconstruction, ensuring the stable operation of the system up to standards. It provides technical reference for quality and efficiency improvement of similar WWTPs facing difficulties in expansion.

Keywords moving bed biofilm reactor (MBBR) capacity expansion in-situ nitrification performance biofilm functional microflora

中华人民共和国住房和城乡建设部 2023 年 10 月发布的《2022 年中国城市建设状况公报》显示, 2022 年年末, 我国污水处理厂处理能力已达到 2.16 亿 m^3/d , 同比增长 4.04%, 污水处理总量自 2013 年起已连续 10 年呈增长态势。城市的高速发展伴随着污水排放量的提升, 污水处理厂扩容改造用地与城市发展用地之间的矛盾也日益凸显。

针对已有污水处理厂扩容, 常规活性污泥法一般采用扩建的方式, 随着扩容量的提升, 征地费用逐步提高和建设周期也逐步延长, 而在污水处理厂内部进行处理能力的深入挖掘, 是目前进一步提升城市污水处理能力, 缓解城市发展用地矛盾的有效措施。移动床生物膜反应器 (moving bed biofilm reactor, MBBR) 20 世纪 80 年代末起源于挪威^[1], 通过向生化池投加悬浮载体形成生物膜的方式, 实现功能菌的强化富集, 进而提升系统的处理能力, 因其可与原生化系统进行“镶嵌”的特点, 广泛应用于污水处理厂提标改造当中, 在不新增占地的基础上实现处理能力的原位提升^[2-3]。在此基础上, 相较于膜生物反应器 (MBR)^[4]、高浓度复合粉末载体生物流化床 (HPB)^[5] 等节地型改造工艺路线, MBBR 工艺无需进行载体的定期更换或补投, 经济上更具优势。

本文以南方某污水处理厂采用 MBBR 工艺进行扩容改造为例, 分析了改造前后污水处理厂的运行效果、MBBR 区硝化性能及微生物群落结构, 明晰了 MBBR 工艺原池扩容中的实际作用, 以期为同类型污水处理厂的设计和运行提供参考和建议。

1 项目概况

某南方污水处理厂设计总处理规模为 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 其中一期规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 二期规模为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 均采用改良百乐可工艺。主要处理对象为收集区域内的生活污水及工业园部分工业废

水, 出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 中的一级 A 标准。随着城市建设和经济的快速发展, 污水排放量日益增加, 本项目已满负荷甚至超负荷运行。2021 年, 应政府部门要求, 本项目需在原有规模的基础上再扩容 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 总处理规模达到 $1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 。出水仍执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 中的一级 A 标准。设计进出水水质如表 1 所示。

表 1 设计进出水污染物浓度 (单位: mg/L)

Tab. 1 Design Pollutant Concentration of Influent and Effluent (Unit: mg/L)

项目	BOD ₅	COD	氨氮	TN	TP	SS
进水	180	250	25	35	3	200
总出水	10	50	5(8)	15	0.5	10

注: 温度低于 12 $^{\circ}\text{C}$ 时执行括号内标准, 大于 12 $^{\circ}\text{C}$ 执行括号外标准。

本项目周边为农业用地, 且原厂内未预留足够的扩建用地, 同时, 污水处理厂在二期建造初期, 预处理单元就已按照 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的规模进行建设, 因此本项目改造的重点在于充分挖掘现有生化池的处理能力, 减低生化池改造的土地占用。MBBR 工艺基于其“镶嵌”的特点在污水处理厂原位扩容改造中应用广泛, 北方某污水处理厂采用 MBBR 工艺进行提量改造, 以最大化利用现有池容和工艺流程, 实现了原厂扩容 20%, 改造后出水稳定达到一级 A 标准^[6]; 广东某污水处理厂进行扩容提标, 采用 MBBR 工艺原位强化生化处理性能, 实现了原位扩容 50% 的良好效果, 出水稳定优于排放标准^[7]。因此, 结合污水处理厂实际需求, 综合考虑用地、运行等因素, 最终采用 MBBR 工艺作为本次扩容改造的处理工艺。

2 工艺设计

2.1 工艺流程

本次扩容改造核心是通过 MBBR 原位强化生

化池处理能力,以保证在水量扩增 100% 的情况下,出水稳定达标。原有预处理和深度处理已按照 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 进行建设,因此本次改造充分利旧,核心是生化池的改造,同时新建一组二沉池,满足水量提升后的处理需求。改造后工艺流程如图 1 所示。进水

分别经粗细格栅和沉砂池进行预处理,然后进入改良百乐可-MBBR 池进行碳、氮、磷等污染物的去除,生化池出水分别经过沉淀池和高效澄清池保障 SS 和 TP 的稳定达标,出水消毒后外排入受纳河道中进行生态补水。

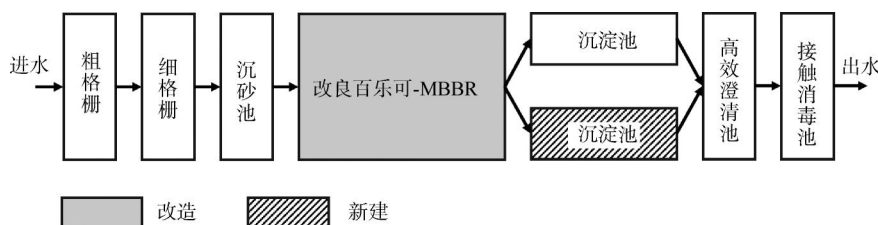


图 1 改造后工艺流程

Fig. 1 Process Flow after Reconstruction

2.2 生化池改造

生化池改造方案如图 2 所示,在处理水量提升 1 倍的情况下,保持原厌氧区、缺氧区池容不变,切割原好氧区的 20% 池容改造为缺氧区,扩大整体缺氧区池容,满足反硝化脱氮需求,好氧区剩余池容部分投加悬浮载体形成好氧 MBBR 区,并配套设置进出水拦截系统及 MBBR 专用推流器,将原悬链曝气系统更改为底部穿孔曝气系统,保证悬浮载体良好流化且不会随水流失,改造后生化池总水力停留时间(HRT)为 8.82 h,其中厌氧区 HRT 为 1.13 h、缺氧区 HRT 为 3.05 h、好氧区 HRT 为 4.64 h。系统总回流比为 150%,污泥龄为 16 d。

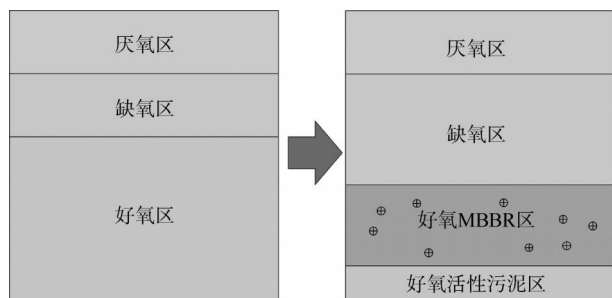


图 2 生化池改造

Fig. 2 Reconstruction of Biochemical Tank

设备方面,缺氧区新增推流搅拌器 4 套,功率 (P) = 4 kW,桨叶直径 (D) = 620 mm。好氧 MBBR 区投加 SPR-Ⅲ 型悬浮载体,直径为 $(25.0 \pm 0.5) \text{ mm}$,高为 $(10.0 \pm 1.0) \text{ mm}$,有效比表面积 $> 800 \text{ m}^2/\text{m}^3$,密度为 $0.94 \sim 0.97 \text{ g}/\text{cm}^3$,挂膜后密度接近于水,符合《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体填料》(CJ/T 461—2014) 行业标准要求,填充率为 45%;

新增悬浮载体专用推流搅拌器 2 套, $P = 5.5 \text{ kW}$; 新增可提升曝气系统 22 套,固定式曝气 4 套,微孔曝气器 45 套;更换内回流泵 2 台,流量 (Q) = $1\,600 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 (H) = 0.60 m, $P = 7.5 \text{ kW}$ 。

2.3 二沉池新建

因处理水量的增加,现有二沉池无法满足出水要求,需新建 1 座二沉池来配套处理规模的提升。新建二沉池与原二沉池保持一致,采用平流式,有效池容为 $4\,900 \text{ m}^3$, $\text{HRT} = 7 \text{ h}$,增设 1 台泵吸式刮泥机,运行速度 (V) = $0.8 \text{ m}/\text{min}$; 6 台潜水轴流泵 (外回流泵), $Q = 180 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 4 \text{ m}$, $P = 5.5 \text{ kW}$; 2 台剩余污泥泵, $Q = 105 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 11 \text{ m}$, $P = 7.5 \text{ kW}$ 。

3 MBBR 改造效果分析

分别对二期工程改造前后及一、二期工程同期运行效果,二期沿程水质变化情况及二期泥膜两相硝化能力进行分析,以判断 MBBR 改造对于系统处理能力的强化效果。

3.1 运行效果对比

改造前二期项目已超设计水量运行,实际运行水量达到 $(3.02 \pm 0.46) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,改造后水量进一步提升至 $(5.31 \pm 0.76) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,实际提升约 76%,最大运行水量为 $7.61 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,达到设计值的 1.52 倍。改造前后进出水水质如表 2 及图 3 所示。从进水负荷来看,改造后进水氨氮、TN、COD 和 TP 负荷较改造前分别提高至 1.61、1.66、1.60 倍和 1.53 倍;从实际进出水水质来看,改造前后进水氨氮和 TN 分别为 (22.15 ± 3.73) 、 $(20.17 \pm 4.74) \text{ mg}/\text{L}$ 和 (26.28 ± 4.07) 、 $(23.19 \pm 3.66) \text{ mg}/\text{L}$,而改造前后

出水氨氮和 TN 分别为 (0.16 ± 0.14) 、 (0.14 ± 0.08) mg/L 和 (8.62 ± 1.79) 、 (7.01 ± 1.76) mg/L, 平均去除率分别为 99.28%、67.20% 和 99.31%、69.77%, 在改造后水量和进水负荷大幅提升的基础上, 出水水质仍优于改造前, 缺氧区池容的提升保障了 TN 的良好去除, 改造后出水 TN 进一步降低, 而好氧区则通过悬浮载体生物膜实现了硝化能力的大幅提升, 在池容较改造前降低 20% 且水量和进水负荷大幅

提升的情况下, 依然保障了氨氮的高效去除。改造前后进水 COD 和 TP 分别为 (106.82 ± 34.37) 、 (100.52 ± 25.93) mg/L 和 (2.16 ± 0.54) 、 (1.96 ± 0.49) mg/L, 而改造前后出水 COD 和 TP 分别为 (10.76 ± 2.04) 、 (11.15 ± 3.65) mg/L 和 (0.14 ± 0.07) 、 (0.17 ± 0.05) mg/L, 平均去除率分别为 89.93%、93.52% 和 88.91%、91.33%, 改造后依然稳定优于设计排放标准。

表 2 MBBR 改造前后运行效果

Tab. 2 Operation Effect before and after MBBR Reconstruction

项目	COD/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	水量/(m ³ ·d ⁻¹)
改造前进水	106.82±34.37	22.15±3.73	26.28±4.07	2.16±0.54	$(3.02 \pm 0.46) \times 10^4$
改造前出水	10.76±2.04	0.16±0.14	8.62±1.79	0.14±0.07	
改造后进水	100.52±25.93	20.17±4.74	23.19±3.66	1.96±0.49	$(5.31 \pm 0.76) \times 10^4$
改造后出水	11.15±3.65	0.14±0.08	7.01±1.76	0.17±0.05	

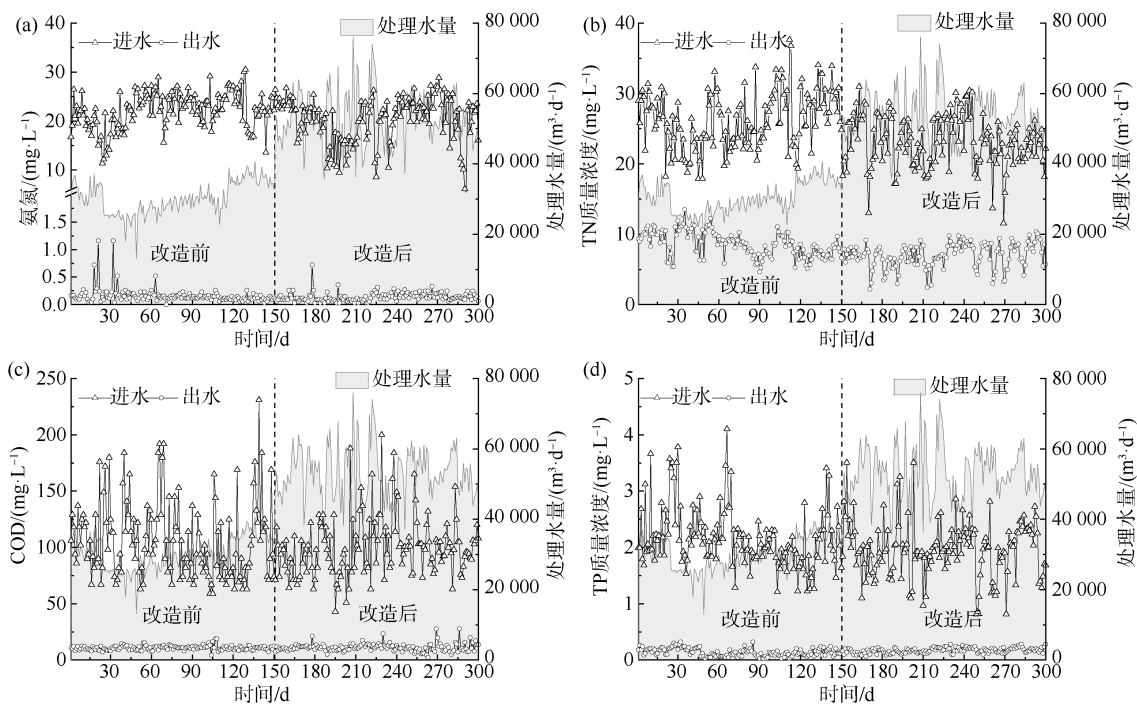


图 3 污水处理厂二期项目改造前后效果对比

Fig. 3 Comparison of Effects before and after Reconstruction of Phase II Project

进一步选取改造后 11 月一次年 1 月的运行数据, 对一、二期运行效果进行对比分析, 最低温度为 12℃, 两期工程的进出水污染物浓度如图 4 所示。在冬季低温条件下, 两期工艺出水均稳定优于设计排放标准, 尤其是易受到低温影响的氨氮处理效果, 在进水氨氮质量浓度为 (18.98 ± 4.57) mg/L 的基础上, 一期出水氨氮质量浓度为 (0.27 ± 0.17) mg/L, 二

期出水氨氮质量浓度为 (0.29 ± 0.15) mg/L, 均体现出了良好的抗低温效果。值得一提的是, 二期经过 MBBR 改造后, 好氧区 HRT 仅为一期的 66.07%, 实现了硝化性能的大幅提升。

3.2 MBBR 区性能分析

为进一步确定各功能区的实际效果, 取一期和二期各功能区末端水样分别进行平行测定, 结果如

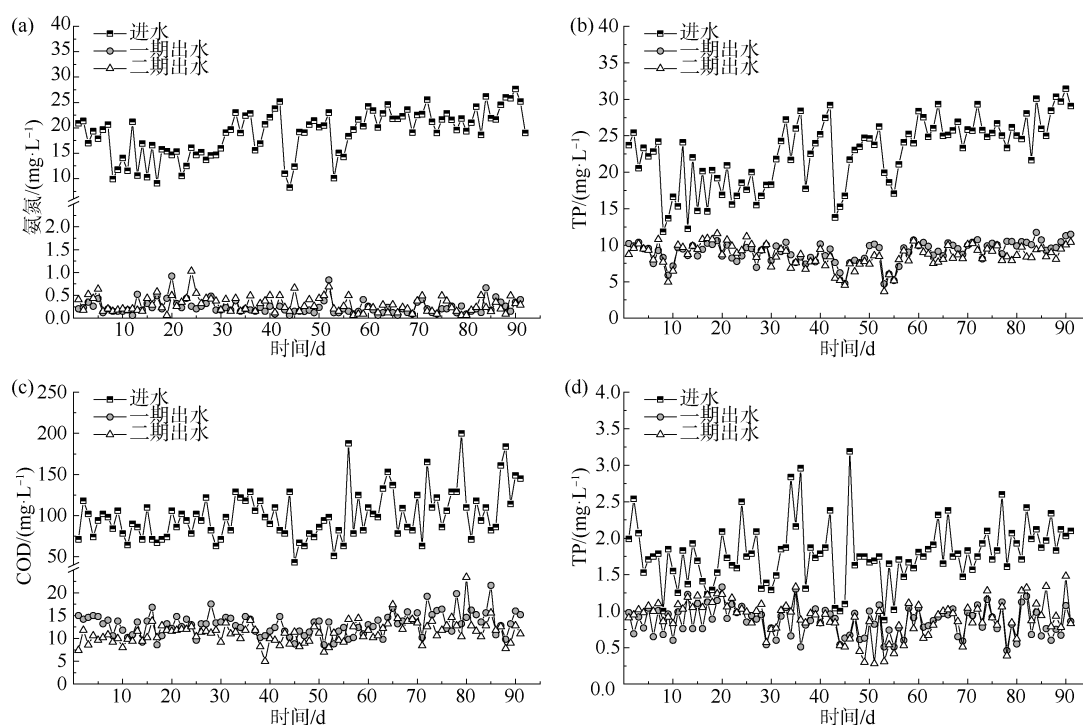


图4 污水处理厂一期和二期出水水质对比

Fig. 4 Comparison of Effluent Quantities between the Phase I and Phase II Project

图5所示,进水氨氮质量浓度分别为 18.85 mg/L 和 18.65 mg/L ,出水氨氮质量浓度分别为 0.35 mg/L 和 0.21 mg/L ,氨氮去除率分别为 98.14% 和 98.87%。从氮素变化来看,二期氨氮的去除主要发生在好氧 MBBR 区,MBBR 区出水氨氮质量浓度为 0.31 mg/L ,氨氮去除贡献率达到 99.46%,已优于

设计排放标准,末端的好氧活性污泥区起保障作用。此外,好氧区采用 MBBR 工艺的污水处理厂常见有同步硝化反硝化现象^[8],但本项目中好氧 MBBR 区并未发生总无机氮(TIN)的去除,这可能与本项目进水基质浓度偏低有关。

为进一步探究投加悬浮载体对系统硝化性能的

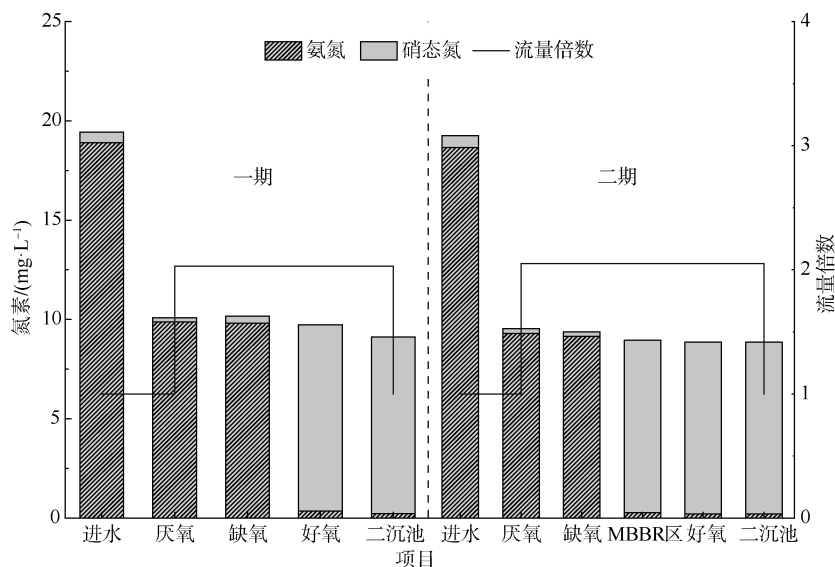


图5 沿程氮素去除效果

Fig. 5 Nitrogen Removal Efficiency along the Process

影响效果,取一期缺氧区出水上清液,分别进行了一期纯泥、二期纯泥、二期纯膜和二期泥膜的硝化性能测定,在载体填充率、污泥浓度与水温均保持与实际项目一致的前提下,DO 控制在 6 mg/L,以确定最佳硝化性能。结果如表 3 所示。一期纯泥、二期纯泥、二期纯膜、二期泥膜硝化负荷分别为 0.104、0.107、0.158、0.267 kg/(m³·d),悬浮载体的投加强化了系统的硝化性能,二期泥膜复合系统的硝化负荷达到了一期纯活性污泥系统的 2.57 倍,且纯生物膜负荷已高于活性污泥负荷,大幅提升了系统的抗冲击能力,二期泥膜复合系统中生物膜硝化贡献率达到 59.92%,占据优势地位。

表 3 泥膜两相硝化性能差异

Tab. 3 Differences of Nitrification Performance between Sludge and Biofilm

分组	负荷/[kg·(m ³ ·d) ⁻¹]
一期纯泥	0.104
二期纯泥	0.107
二期纯膜	0.158
二期泥膜	0.267

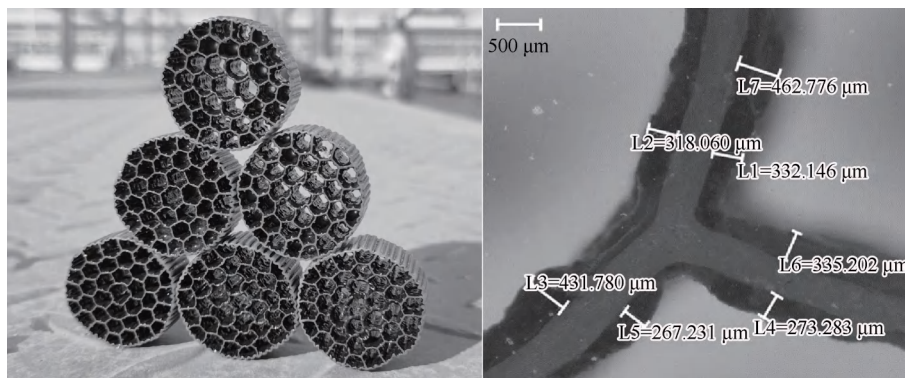
3.3 改造合理性分析

同时为了分析本项目采用泥膜复合 MBBR 工艺改造的合理性,对载体投加的效果、系统的抗冲击

能力及水量提升与载体投加关联性作了核算分析。若本项目二期工程未进行改造,采用传统活性污泥法,以设计进出水氨氮和一期活性污泥最优容积负荷(DO 质量浓度为 6 mg/L)进行核算,出水氨氮质量浓度为 5.55 mg/L,无法满足出水标准的要求。若以本项目二期的硝化性能试验中获得的泥膜复合最优负荷进行核算,在设计进水水量的基础上,二期所耐受的最高进水氨氮质量浓度可达 55 mg/L,是设计值的 2.20 倍,大幅提升了系统的抗冲击能力。因此,本项目采用 MBBR 进行改造具备合理性,切实保障了出水的稳定达标。若一期工程同样采用 MBBR 工艺进行改造,在设计进出水污染物浓度的基础上,处理水量可提升 1 倍以上,为污水处理厂匹配城市高速发展,实现平滑升级提供了可能性。

4 生物膜挂膜情况与微生物分析

本项目悬浮载体挂膜如图 6 所示,生物膜较均匀地包覆在悬浮载体的内表面,生物膜致密且并没有絮状物质存在于悬浮载体的孔隙间,厚度均值为(345.78±74.82) μm。生物膜生物量均值为(18.87±0.93)g/m²,挥发性悬浮固体(VSS)/SS 较为稳定,为 0.68±0.02,VSS 均值为(12.77±0.61)g/m²。



注:L1~L7 为测试序号。

图 6 悬浮载体挂膜情况

Fig. 6 Biofilm Culturing on Suspended Carriers

为进一步从微观层面探究 MBBR 工艺改造对系统处理能力的提升效果,分别取一期活性污泥、二期活性污泥和生物膜进行了基于 16S 扩增子高通量测序,系统内微生物属水平相对丰度如图 7 所示。

悬浮载体生物膜上的优势硝化菌属为硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)和亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*),

相对丰度分别为 7.98% 和 1.01%,而一、二期活性污泥的优势硝化菌属则均为 *Nitrospira*,相对丰度分别为 1.05% 和 1.27%。*Nitrospira* 是污水处理厂最常见的硝化菌属,其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的过程,统称为 COMAMMOX^[9]。MBBR 工艺以

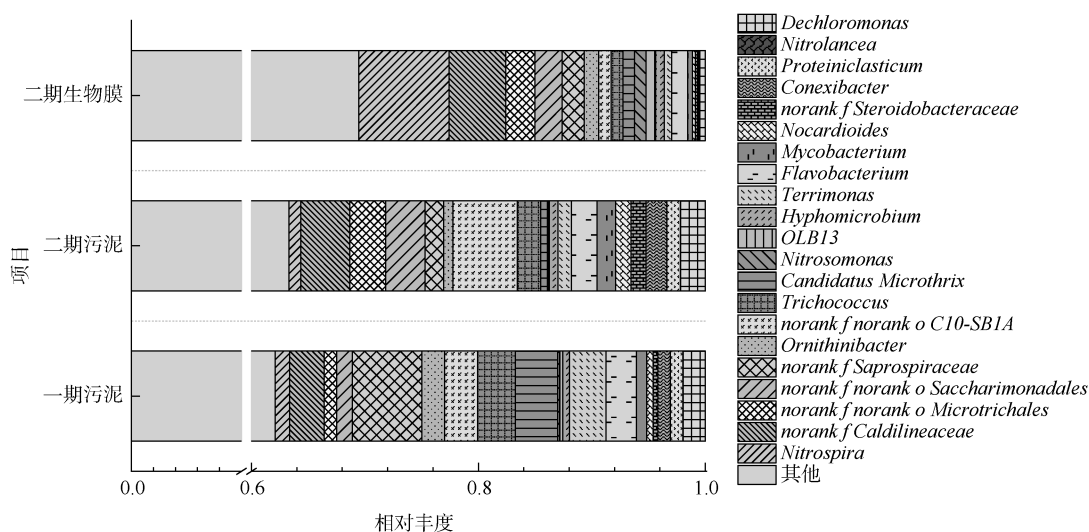


图7 微生物属水平相对丰度

Fig. 7 Relative Abundance of Microflora Genera at the Genus Level

生物膜形式实现了对于 *Nitrospira* 的高效富集,相对丰度达到活性污泥的 7.58 倍,为系统硝化性能的提升提供了微观基础。同时可以看出,与生物膜同系统的活性污泥中硝化菌的相对丰度要稍高于一期纯活性污泥系统,这可能是由于悬浮载体生物膜在进行动态更新的过程中,脱落生物膜对活性污泥起到了接种作用,提升了污泥中硝化菌的相对丰度。

两期系统中优势反硝化菌属主要富集于活性污泥中且组成较为类似,包含土生单胞菌属 (*Terrimonas*)、黄杆菌属 (*Flavobacterium*)、脱氮单胞菌属 (*Dechloromonas*)、生丝微菌属 (*Hyphomicrobium*) 等,一、二期反硝化菌属相对丰度分别为 8.76%、7.52%。从微生物功能来看,上述微生物菌属除反硝化功能外,*Terrimonas* 中的部分菌属能够降解蒽类物质,*Flavobacterium* 能够降解可降解塑料 (PHBV)^[10],*Hyphomicrobium* 可利用多种有毒难降解有机物进行反硝化脱氮,例如降解二氯甲烷、二甲基硫醚、甲醇等^[11]。本项目进水中包含部分工业废水,长期驯化条件下造成了功能菌群的特异性。同时,虽然本项目在宏观上并未体现出明显的同步硝化反硝化 (SND) 效果,但仍在悬浮载体生物膜上发现了部分具有反硝化功能的菌群,包括 *Hyphomicrobium*、*Dechloromonas*、*Terrimonas* 和 *OLB13* 等,总占比达到 2.78%,表明在生物膜达到一定厚度后,内部形成的厌氧微环境可为反硝化菌的富集提供条件,也为好氧 MBBR 区 SND 效果的发生提

供了可能性。此外,在一、二期污泥中均检测到了解蛋白菌属 (*Proteiniclasticum*),其相对丰度分别为 1.09%、1.18%,该菌属具有良好的蛋白质类物质的分解转化能力^[12],该菌属的富集可能与本项目收集范围内乳制品类企业较多有关。

值得注意的是,一期活性污泥中微丝菌属 (*Candidatus microthrix*) 的相对丰度达到 3.72%,其是活性污泥中常见的丝状菌,常与污泥膨胀有关^[13],而在二期污泥和生物膜中的相对丰度则分别只有 0.57% 和 1.03%。采用 MBBR 工艺进行改造后,悬浮载体在流化的过程中对于丝状菌属具有切割作用,降低了活性污泥产生丝状膨胀的可能性。

5 经济性分析

本项目改造前后耗电为分别为 0.227 kW·h/m³ 和 0.242 kW·h/m³,按照电价为 0.66 元/(kW·h) 计,运行电费分别为 0.150 元/m³ 和 0.160 元/m³,用电量升高主要原因在于新增缺氧搅拌及新建二沉池增加用电设备。本项目除磷药剂为聚合氯化铁 (PFC) 与聚丙烯酰胺 (PAM),改造前后投加量保持一致,其中 PFC 投加量为 2.21 t/d,费用为 0.014 元/m³;PAM 投加量为 17.081 kg/d,费用为 0.002 8 元/m³。本项目充分利用原水碳源脱氮,改造前后均未投加有机碳源,项目改造前后运行的直接电药费用分别为 0.167 元/m³ 和 0.177 元/m³。

6 结论与展望

(1) 南方某污水处理厂二期工程采用 MBBR 工

艺进行扩容改造,解决了扩容面临的用地紧张等问题,项目改造后,处理水量由 $(3.02 \pm 0.46) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $(5.31 \pm 0.76) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,实现原池扩容76%,最大运行水量达到设计值的1.52倍,出水稳定优于设计排放标准。

(2)生化段通过镶嵌 MBBR 工艺,在好氧 HRT 仅为活性污泥法 66.07%的基础上实现了冬季低温条件下氨氮的高效稳定去除,其中 MBBR 区氨氮去除贡献率达到 99.46%。若二期不进行改造,同水量水质情况下出水氨氮将达到 5.55 mg/L,本项目采用 MBBR 改造具备必要性和合理性。

(3)悬浮载体生物膜强化了核心硝化菌属 *Nitrospira* 的富集效果,生物膜中的相对丰度达到活性污泥的 7.58 倍,为系统硝化性能的提升提供了微观基础,同时生物膜中有反硝化菌属的富集,为同步硝化反硝化的发生提供了可能性。

本项目采用泥膜复合工艺实现了原位提量,但实际运行仍受到活性污泥截留回收的限制,无法实现处理能力的进一步提升。目前已有纯生物膜法^[14]应用于实际工程中,完全舍弃活性污泥,利用生物膜的高负荷特性实现污染物的高效去除,不受活性污泥限制,为污水厂的新/改/扩建提供了新的解决方案。

参考文献

- [1] 仵晓辉,刘真,侯海明,等.西部高原某污水处理厂的 MBBR 改造效果分析[J].净水技术,2023,42(11):166-172,190.
- WU X H, LIU Z, HOU H M, et al. Performance analysis of MBBR process reconstruction for a western plateau WWTP[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(11): 166-172, 190.
- [2] 周家中,韩文杰,吴迪,等. MBBR 工艺应用于市政污水处理的系列解决方案探讨[J].中国给水排水,2023,39(12):1-12.
- ZHOU J Z, HAN W J, WU D, et al. Discussion on series solutions of MBBR process applied to municipal sewage treatment[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12): 1-12.
- [3] 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 D. Application and development prospect of MBBR in China[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 22-31.
- [4] 韩锡友,黄子进,方富强,等. MBBR 应用于污水厂提量改造及其能耗药耗分析[J].净水技术,2021,40(12):69-77.
- HAN X Y, HUANG Z J, FANG J Q, et al. Application of

MBBR in WWTP reconstruction for capacity expansion and analysis of energy and chemical consumption[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(12): 69-77.

- [5] 李一龙,包宇. UCT-MBR 工艺在北京市某污水处理厂提标扩容改造中的设计及运行[J].净水技术,2022,41(1):147-152.
- LI Y L, BAO Y. Design and operation of UCT-MBR process in upgrading and expansion project of a WWTP in Beijing City[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(1): 147-152.
- [6] 巢真,韩红波,陈思源,等. HPB 技术应用于污水处理厂原位扩容改造[J].中国给水排水,2023,39(20):98-103.
- CHAO Z, HAN H B, CHEN S Y, et al. Application of HPB process in in-situ capacity expansion and reconstruction of a WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(20): 98-103.
- [7] 杨平,徐康康,周家中,等. MBBR+磁混凝用于 A²/O 微曝氧化沟污水厂提标扩容[J].中国给水排水,2023,39(10):67-74.
- YANG P, XU K K, ZHOU J Z, et al. Application of MBBR and magnetic coagulation process in upgrading and expansion of a WWTP with A²/O microporous aeration oxidation ditch[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(10): 67-74.
- [8] 李世文,王胜渊,于林静,等.基于 MBBR 工艺的北方某污水厂运行效果及氮磷去除机理分析[J].净水技术,2022,41(9):86-95.
- LI S W, WANG S Y, YU L J, et al. Mechanism analysis of nitrogen and phosphorus removal in north WWTP based on MBBR process[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(9): 86-95.
- [9] TAN Q Y, WU H M, ZHENG L, et al. Urban and agricultural land use led to niche differentiation of AOA, AOB and comammox along the Beiyun River continuum[J]. Water Research, 2024, 255: 121480. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121480.
- [10] 张晓霞,熊仁久,周家中,等.浙江某工业废水处理厂升级改造运行效果解析[J].中国给水排水,2021,37(5):37-42,50.
- ZHANG X X, XIONG R J, ZHOU J Z, et al. Analysis on upgrading and retrofitting effect of an industrial wastewater treatment plant in Zhejiang[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(5): 37-42, 50.
- [11] 李继兵.基于稳定同位素探针技术的多环芳烃降解微生物研究[D].广州:中国科学院大学,2018.
- LI J B. Study on stable-isotope probing of the polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacteria[D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [12] 陈秀云,冯杰,王红梅,等.山西阳泉老窑水硫酸盐还原菌的分离鉴定及其还原功能驯化[J].微生物学报,2022,62(6):2104-2118.

(下转第 187 页)

- [4] 王宁, 田广宇, 陈泉. 针对黄河上游地区污水厂尾水的人工湿地净化系统研究与设计: 以宁夏吴盛污水厂尾水湿地为例[J]. 环境工程, 2023, 41(s1): 33-35.
WANG N, TIAN G Y, CHEN X. Research and design of constructed wetland purification system for wastewater treatment plant tailwater in upper yellow river area: Taking Ningxia Haosheng wastewater treatment plant tailwater wetland as an example[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(s1): 33-35.
- [5] 纪伟, 朱洛炯, 张舒, 等. 人工湿地深度处理市政尾水研究进展[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 9-19.
JI W, ZHU M X, ZHANG S, et al. Research progress on constructed wetland for advanced treatment of municipal tailwater[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 9-19.
- [6] 刘小婷, 张翔凌, 沈俊, 等. 人工湿地常用填料及其不同改性方式对主要污染物净化效果研究进展[J]. 净水技术, 2025, 44(1): 16-25, 177.
LIU X T, ZHANG X L, SHEN J, et al. Research advances on common fillers and different modification modes of constructed wetlands for purification effectiveness of main pollutants[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(1): 16-25, 177.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. 人工湿地水质净化技术指南[EB/OL]. (2021-04-14)[2025-03-05]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202104/t20210430_831538.html.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for water quality purification using constructed wetlands[EB/OL]. (2021-04-14)[2025-03-05]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202104/t20210430_831538.html.
- [8] 陈永华. 人工湿地污水处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
CHEN Y H. Constructed wetland technology for sewage treatment[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [9] 贺锋. 复合垂直流构建湿地水处理工艺的设计及其对营养物质氮的净化效果研究[D]. 北京: 中国科学院水生生物研究所, 2004.
HE F. Design of composite vertical flow constructed wetland water treatment process and its purification efficiency for nitrogen nutrients[D]. Beijing: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [10] 谢小龙, 贺锋, 徐栋, 等. 垂直流人工湿地配水均匀性的研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(8): 828-832.
XIE X L, HE F, XU D, et al. Uniformity of water distribution system in vertical constructed wetland[J]. China Environmental Science, 2009, 29(8): 828-832.
- [11] 赵文喜, 陶磊, 刘红磊. 人工湿地堵塞机理及防堵措施浅析及研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(8): 8-16.
ZHAO W X, TAO L, LIU H L. Analysis on clogging mechanism of constructed wetlands and clogging prevention measures[J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(8): 8-16.

(上接第 107 页)

- CHEN X Y, FENG J, WANG H M, et al. Isolation and identification of sulfate-reducing bacteria in goaf water in Yangquan of Shanxi Province and domestication for the reduction[J]. Acta microbiologica Sinica, 2022, 62(6): 2104-2118.
- [13] FAN N S, QI R, HUANG B C, et al. Factors influencing *Candidatus* Microthrix parvicella growth and specific filamentous bulking control: A review[J]. Chemosphere, 2020, 244: 125371. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125371.
- [14] 周家中, 吴迪, 郑临奥. 纯膜 MBBR 工艺在国内外的工程应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 37-47.
ZHOU J Z, WU D, ZHENG L A, et al. Engineering application of pure MBBR process at home and abroad[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 37-47.