

论述与研究

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.01.001

## 纯膜MBBR用于南方某大型水质净化厂改造效果分析

刘妍<sup>1</sup>, 滕一杰<sup>1</sup>, 周家中<sup>2</sup>, 陈柱堆<sup>3</sup>, 夏超<sup>2</sup>, 吴迪<sup>2</sup>

(1. 东莞市水务集团工程有限公司, 广东 东莞 523113; 2. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266510; 3. 东莞市水务集团净水有限公司, 广东 东莞 523113)

**摘要:** 南方某大型水质净化厂设计处理规模为 $260\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ , 主要处理微污染河道水。为提高系统的硝化能力, 采用纯膜MBBR工艺对原平流沉淀池末端进行改造。悬浮载体全部投加3 d后, 出水氨氮 $<1.0\text{ mg/L}$ , 达到了设计标准。稳定运行期间, 系统出水氨氮浓度为 $(0.19\pm 0.14)\text{ mg/L}$ , 氨氮平均去除率达到91.64%, 稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) II类水质标准。纯膜MBBR系统具备良好的间歇运行能力, 悬浮载体离水7 d后恢复通水, 用时4 d即可保障出水氨氮浓度达标。考察了温度、水力负荷、进水氨氮浓度、气水比对出水氨氮浓度的影响, 并采用SPSS软件进行统计分析。结果显示, 对出水氨氮浓度的影响程度排序为水温 $>$ 进水氨氮浓度 $>>$ 水力负荷和氣水比。出水氨氮浓度与水温呈负相关, 与进水氨氮浓度呈正相关。纯膜MBBR工艺良好的抗低温和水质冲击性能以及合理的设计参数, 确保了在温度 $<15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及进水水质波动较大的情况下出水水质稳定达到设计标准。氣水比对出水氨氮浓度影响较小, 在0.7~2.0的氣水比条件下悬浮载体流化良好, 出水氨氮浓度均值 $<0.5\text{ mg/L}$ , 稳定达标。水力负荷对出水氨氮几乎没有影响, 系统具备良好的耐水力冲击性能。经过纯膜MBBR工艺改造后, 系统出水COD、BOD<sub>5</sub>、TP、SS均优于改造前, 项目总运行费用为0.076~0.109元/ $\text{m}^3$ 。

**关键词:** 微污染河道水; 纯膜MBBR工艺; 间歇运行; 氣水比; 氨氮; SPSS分析

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)01-0001-08

### Operation Effect of Pure MBBR Process Used in a Large-scale Water Purification Plant in South China

LIU Yan<sup>1</sup>, TENG Yi-jie<sup>1</sup>, ZHOU Jia-zhong<sup>2</sup>, CHEN Zhu-dui<sup>3</sup>, XIA Chao<sup>2</sup>, WU Di<sup>2</sup>

(1. Dongguan Water Group Engineering Co. Ltd., Dongguan 523113, China; 2. Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China; 3. Dongguan Water Group Water Purification Co. Ltd., Dongguan 523113, China)

**Abstract:** The design treatment capacity of a large-scale water purification plant in South China is  $260\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ , mainly for treatment of micro-polluted river water. In order to improve the nitrification capacity of the system, the end of the original horizontal flow sedimentation tank was modified by pure MBBR process. Three days after all the suspended carriers were added, the concentration of  $\text{NH}_3\text{-N}$  in the effluent was less than  $1.0\text{ mg/L}$ , which reached the design standard. During stable operation, the concentration of  $\text{NH}_3\text{-N}$  in the effluent of the system was  $(0.19\pm 0.14)\text{ mg/L}$ , and the average  $\text{NH}_3\text{-N}$

基金项目: 青岛市科技惠民示范引导专项; 青岛西海岸新区科技攻关“揭榜制”专项

通信作者: 吴迪 E-mail: hitwudi@126.com

removal rate was 91.64%, which stably reached the class II criteria specified in the *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). The pure MBBR system had a good intermittent operation capability. After the suspended carrier were dried out of water for 7 days, the pure MBBR system was restored to water. It only took 4 days to recover its removal performance of  $\text{NH}_3\text{-N}$ . The effects of temperature, hydraulic load, influent  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration, gas-water ratio on the  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration of effluent were studied, and SPSS software was used for statistical analysis. The results showed that the factors affecting the effluent  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration were temperature > influent  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration >> hydraulic load and gas-water ratio. The effluent  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration had negative and positive correlation with water temperature and influent  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration respectively. Based on the excellent resistance to low temperature and water quality impact of the pure MBBR process and reasonable design parameters, it ensured that the effluent  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration reached the design standards stably when the temperature was lower than 15 °C and the influent quality fluctuated greatly. The gas-water ratio had little effect on the effluent  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration. Under the condition of gas-water ratio of 0.7-2.0, the fluidization of suspended carriers was good, and the average effluent  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration was less than 0.5 mg/L. The hydraulic load had almost no effect on the effluent  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration, and the system had good hydraulic shock resistance. After the reconstruction of pure MBBR process, the effluent COD,  $\text{BOD}_5$ , TP and SS of the system were better than those of before transformation. The total operation cost of the project was 0.076-0.109 yuan/ $\text{m}^3$ .

**Key words:** micro-polluted river water; pure MBBR process; intermittent operation; gas-water ratio; ammonia nitrogen; SPSS analysis

河道水的旁位处理是提高地表水水质的常用手段。通过建立旁位处理设施,可有效解决河道水污染短期内无法溯源的问题,保障下游断面的稳定达标。河道水属于微污染水,污染物浓度一般低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准。对于微污染水的处理,出水水质一般要求达到地表水标准。由于传统的活性污泥法难以有效富集微生物,所以对于微污染水的处理多采用生物膜法进行。移动床生物膜反应器(MBBR)是一种新型高效的污水生物处理方法,具有负荷高、抗冲击能力强、处理效果稳定等优点<sup>[1]</sup>。纯膜 MBBR 工艺是其中的一种应用形式,通过悬浮载体富集微生物形成生物膜,在悬浮载体流化过程中完成污染物的去除,并实现生物膜的动态更新,有效避免了固定床生物膜需定期反冲洗的难题。

近些年,随着国内水环境治理形式多样化,纯膜 MBBR 工艺在微污染水治理领域已开始呈现规模化应用。如处理水量为  $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  的江苏某原水预处理厂,采用新建纯膜 MBBR 工艺实现了对微污染水的有效处理,在生化系统停留时间为 1 h 条件

下,保障了出水氨氮稳定达到地表 II 类水标准<sup>[2]</sup>。桐乡市运河水厂设计规模为  $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用纯膜 MBBR 工艺处理京杭运河原水,在平均进水氨氮浓度为 1.73 mg/L 的情况下,出水氨氮平均浓度降低至 0.39 mg/L,取得了良好的应用效果<sup>[3]</sup>。笔者以南方某大型水质净化厂提标改造工程为例,分析了纯膜 MBBR 工艺在处理微污染水过程中的实际应用效果,以期对微污染水处理厂改造和运行提供参考。

## 1 材料与方法

南方某大型水质净化厂的设计规模为  $260 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,主要处理河道水,核心采用一级强化混凝沉淀工艺。实际运行结果显示,该工艺有效降低了河道水体的 COD、 $\text{BOD}_5$ 、SS、TP 等浓度,但对  $\text{NH}_3\text{-N}$  几乎没有去除效果,出水氨氮浓度超过了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类标准。2020 年对该厂进行了提标改造,旨在降低出水氨氮浓度,进一步改善河道水水质。针对该项目占地受限、体量大、工期紧张、污染物浓度低等问题,通过多种工艺比选,综合考虑经济等因素,最终采用纯膜 MBBR 工艺对原有沉淀池进行部分改造,设计进

出水指标如表 1 所示(水温取 15 ℃)。

表 1 设计进出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	TP	NH <sub>3</sub> -N
进水	≤40	≤15	≤60	≤1.5	≤6.0
出水	≤30	≤7	≤50	1.0	≤1.0
					去除量>5.0

该厂共 12 组平流沉淀池,每组各 5 格廊道,单格廊道设计水量为  $4.33\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。改造是将沉淀池末端 45 m 改造为纯膜 MBBR 区<sup>[4]</sup>,具体包括两部分:第一是池体结构和设备改造,包括原非金属链条式刮泥机的部分拆除,新增进出水拦截系统、底部曝气系统、鼓风机及配套管道;第二是投加悬浮载体,密度为  $0.94\sim 0.97 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,空隙率>90%,紫外线损失<0.06%。改造完成后纯膜 MBBR 区悬浮载体填充率为 40%,鼓风机最大供气风量为  $3\,640 \text{ m}^3/\text{min}$ ,设计最大气水比为 2.0。改造后全厂工艺流程如图 1 所示,处理出水直接排放到河道下游。

表 2 出水氨氮浓度影响因素研究阶段划分

Tab.2 Division of research phases on factors affecting ammonia nitrogen concentration in effluent

影响因素	设计值	实际范围	研究时间范围
温度/℃	15.0	12.3~21.0	2020 年 12 月 8 日(164 d)—2021 年 1 月 31 日(218 d)
水力负荷	1.00	1.02~1.35	2021 年 4 月 1 日(278 d)—5 月 31 日(338 d)
进水氨氮/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	6.00	1.04~5.19	2020 年 11 月 11 日(137 d)—2021 年 5 月 31 日(338 d)
气水比	2.0	0.7~2.0	2020 年 11 月 11 日(137 d)—2021 年 5 月 31 日(338 d)

2 结果与分析

2.1 启动期运行效果

纯膜 MBBR 区采用自然挂膜的方式启动,不额外投加菌种,自 2020 年 6 月 28 日开始启动(1 d),启动期氨氮的去除效果见图 2。纯膜 MBBR 区设计悬浮载体填充率为 40%,分 4 次投加。从图 2 可以看出,在悬浮载体完成首次 15% 的投加后,第 4 天系统出水氨氮开始明显降低,氨氮去除率达到 20%,但由于挂膜时间较短,填充率较低,系统处理能力有限,硝化负荷仅为  $0.011 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。系统运行至第 12 天,第二次投加悬浮载体,填充率增加至 27.5%。此时出水氨氮浓度变化不大,在  $1.0\sim 2.0 \text{ mg}/\text{L}$  之间,但系统的硝化性能得到提升,氨氮去除率可达到 70%,硝化负荷提升至  $0.130 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。系统运行至第 23 天时,悬浮载体投加量达到设计要求,填充率增加至 40%,此时系统硝化性能得到进一步提升。悬浮载体完全投加后的第 3 天,出水氨氮稳定低于  $1.0 \text{ mg}/\text{L}$ ,氨氮去除率达到 90% 以上,受进水

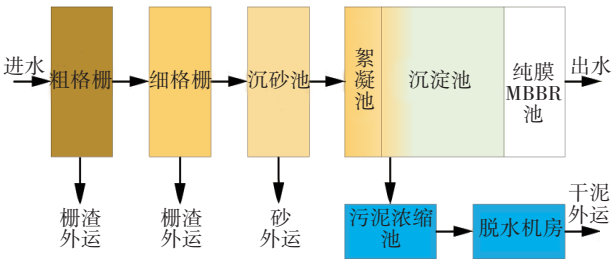


图 1 改造后工艺流程

Fig.1 Process flow chart after modification

该项目于 2020 年 6 月开始改造,6 月 28 日(1 d)单组改造完毕后开始投加悬浮载体,11 月全面投产运行。分析了单组池子启动过程、全厂 2021 年 1 月 1 日(188 d)—5 月 31 日(338 d)的稳定运行数据(与改造前同期运行数据进行了对比)以及单组生化池停产后的恢复效果。并以单组生化池运行效果为依据,探究了温度、水力负荷、进水氨氮浓度、气水比对出水氨氮浓度的影响,研究阶段划分见表 2。

负荷的影响,硝化负荷均值达到  $0.168 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。

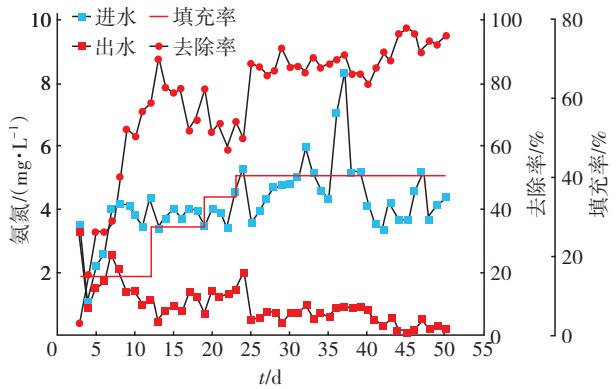


图 2 启动期氨氮去除效果

Fig.2 Removal effect of  $\text{NH}_3\text{-N}$  at start-up period

系统的硝化性能之所以能够快速提升,主要表现在两个方面:首先,悬浮载体挂膜速度快,悬浮载体投加后的第 4 天就能观察到明显的生物膜附着(见图 3),随着生物膜的逐步成熟,其硝化性能逐步提升;其次,MBBR 工艺以膜面负荷作为设计参



数<sup>[5]</sup>,纯膜MBBR区的硝化性能与总有效表面积有关,随着填充率的不断增加,系统的总有效表面积增加,系统硝化性能得以提升。

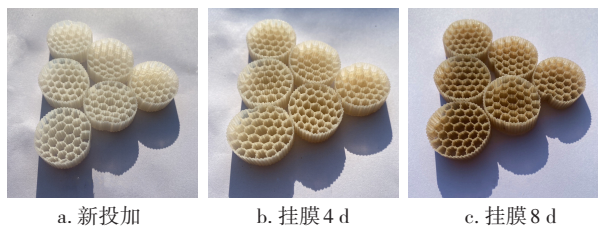


图3 不同运行时期悬浮载体生物膜照片

Fig.3 Photos of suspended carrier biofilm in different operating periods

## 2.2 稳定运行阶段效果

悬浮载体完全投加后的第3天出水氨氮稳定达到设计标准,系统进入稳定运行阶段。图4列举了2021年1月1日—5月31日(188~338 d)共计151 d的冬春季节该厂进出水氨氮数据,并与改造前2020年同期的数据进行了对比。

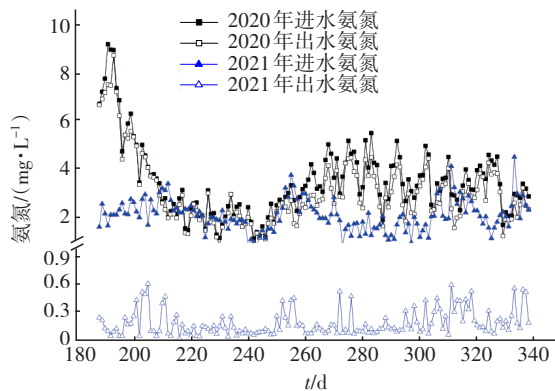


图4 稳定阶段氨氮去除效果

Fig.4 Removal effect of  $\text{NH}_3\text{-N}$  at stable stage

从图4可以看出,在改造前系统对氨氮几乎没有去除能力。2020年1月—5月进水氨氮为 $(3.57 \pm 1.49)$  mg/L,出水氨氮为 $(3.15 \pm 1.39)$  mg/L,平均去除率仅为11.99%。而经过改造后系统硝化能力得到明显提升,2021年1月—5月的进水氨氮为 $(2.22 \pm 0.46)$  mg/L,出水氨氮为 $(0.19 \pm 0.14)$  mg/L,氨氮平均去除率达到91.64%,出水氨氮优于GB 3838—2002的Ⅱ类水质标准。在生化段极短的停留时间下,悬浮载体的投加为硝化菌的生长、富集提供了场所,实现了长泥龄菌的高效富集,避免了菌种的流失;同时通过悬浮载体的流化筛选出了“更优质”的细菌,从而使系统获得了高效的硝化性

能,保障了出水氨氮的稳定达标。高通量测序结果显示,悬浮载体生物膜上硝化细菌的相对丰度可达13.60%,为良好的硝化效果提供了微观支撑<sup>[6]</sup>。

## 2.3 系统停产恢复效果

水厂实际运行过程中,受池体和设备检修等影响可能导致系统停运,此时悬浮载体生物膜性能无法正常发挥。而水厂恢复运行后,悬浮载体生物膜性能的恢复对水厂的稳定运行将起到至关重要的作用。项目其中一组池体于2021年8月2日(运行至第401天)进行放空检修,期间悬浮载体自然状态下离水7 d。恢复通水后,系统硝化效果的恢复情况见图5。可以看出,系统恢复前5 d的出水氨氮浓度分别为2.00、1.50、1.21、0.83、0.44 mg/L,去除率分别为30.56%、46.24%、65.13%、77.26%和88.51%。离水一周恢复通水后,首日仍具有30%以上的氨氮去除率,第4天出水即可达到设计标准,第5天恢复至日常处理效果,出水氨氮浓度低于0.5 mg/L。由此可见,悬浮载体生物膜在停产后的恢复效果较好,恢复时间较快,不影响厂区正常运行。目前,对于成熟悬浮载体生物膜的保存多在低温下进行<sup>[7]</sup>,此时对环境、方法等要求较高。而本项目中悬浮载体无需采用繁琐的保存方式,简单易行,可轻松应对系统间歇运行,更具实践价值。

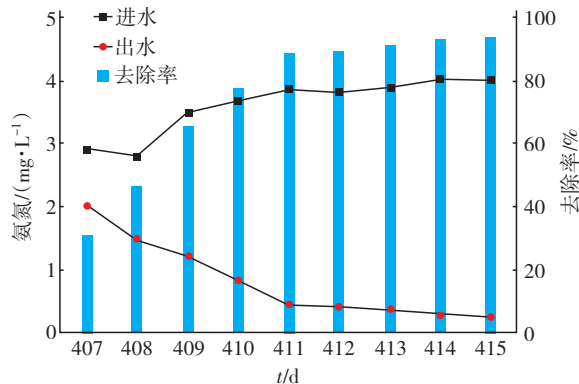


图5 系统停产恢复效果

Fig.5 Recovery effect after system shutdown

## 2.4 对其他指标的去效果

为提高硝化性能,对原沉淀池末端进行了切割改造,将原沉淀池的沉淀时间由106 min降低至64 min。通过对比2020年和2021年同期数据(1月—5月),分析了改造对系统去除COD、BOD<sub>5</sub>、TP、SS的影响,结果见表3。改造前后的处理水量相差不大,分别为 $(267 \pm 19.09) \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d和 $(262.2 \pm 31.3) \times$

$10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。由于来水水质好转,2021年的各项进水指标均略低于2020年,且改造后各项出水水质指标也均低于改造前,系统出水COD、 $\text{BOD}_5$ 、TP均可达到GB 3838—2002的Ⅲ类水质标准。悬浮载体的加入虽然对有机物的去除效果有改善,但因HRT仅为42 min,提升有限。因进水 $\text{BOD}_5$ 浓度低,且进水COD多为难降解有机物,对于该类物质的生化降解仍需要进一步研究。值得注意的是,本次改造对于沉淀池的切割长度是基于原运行的沉淀效果。经过前期验证,从沉淀区进口到沉淀区65 m左右沉淀效果最好,SS含量最低。改造后实际运行效果也验证了沉淀池对SS良好的去除能力。同时基于良好的SS去除性能,改造后处理 $10\,000 \text{ m}^3$ 的污泥产率由改造前的0.172 t增加至0.269 t,增加了56.4%。

表3 改造后各水质指标的变化

Tab.3 Changes of water quality indexes after modification  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 

项目	改造前		改造后	
	进水	出水	进水	出水
COD	$21.45 \pm 5.32$	$17.16 \pm 4.15$	$20.53 \pm 5.74$	$15.81 \pm 4.71$
$\text{BOD}_5$	$8.98 \pm 2.55$	$4.45 \pm 1.53$	$5.16 \pm 2.05$	$2.34 \pm 1.27$
TP	$0.30 \pm 0.11$	$0.19 \pm 0.06$	$0.20 \pm 0.05$	$0.12 \pm 0.03$
SS	$20.13 \pm 16.75$	$10.95 \pm 4.17$	$15.98 \pm 7.69$	$6.40 \pm 3.25$

## 2.5 经济指标分析

该水质净化厂改造完成后,总运行费用为0.076~0.109元/ $\text{m}^3$ 。主要包括电费、药剂费和污泥处置费。其中,电费为0.019~0.020元/ $\text{m}^3$ ,电费变化主要受鼓风机影响。项目实际运行气水比为0.7~2.0,均可以保障悬浮载体良好的流化效果并实现出水氨氮的稳定达标。药剂费为0.006~0.008元/ $\text{m}^3$ ,药剂损耗主要为混凝剂聚合氯化铝(PAC)和助凝剂聚丙烯酰胺(PAM)。污泥处置费为0.051~0.081元/ $\text{m}^3$ ,由于改造后污泥产量增加,导致污泥处置费用增加了0.026元/ $\text{m}^3$ 。

## 3 讨论

### 3.1 温度对出水氨氮浓度的影响

温度对于微生物活性影响较大。有研究表明,当温度 $<8^\circ\text{C}$ 时,活性污泥系统的硝化速率会迅速下降甚至失去活性<sup>[8]</sup>。但国外采用纯膜MBBR工艺,在水温达到 $3.5^\circ\text{C}$ 的条件下仍能够取得良好的运行效果<sup>[1]</sup>。本项目位于南方,根据监测一年中水温为 $12.3\sim 32.9^\circ\text{C}$ ,低温期主要集中在12月和1月。跟

踪研究了单组纯膜MBBR池在2020年12月8日(164 d)—2021年1月31日(218 d)期间出水氨氮浓度与温度的关系,结果见图6。可以看出,温度对出水氨氮浓度达标影响较小,项目虽然出现低温运行阶段,但出水氨氮可稳定达到设计标准。另外发现出水氨氮浓度与温度具有明显的负相关性。水温 $>15^\circ\text{C}$ 时,进水氨氮为 $(3.50 \pm 0.65) \text{ mg/L}$ ,出水氨氮为 $(0.31 \pm 0.13) \text{ mg/L}$ ,平均去除率为91.13%,出水浓度稳定低于 $0.5 \text{ mg/L}$ ,达到地表Ⅱ类水质标准。水温 $<15^\circ\text{C}$ 的天数共9 d,在此期间,进水氨氮浓度为 $(3.30 \pm 0.52) \text{ mg/L}$ ,出水氨氮浓度为 $(0.53 \pm 0.10) \text{ mg/L}$ ,平均去除率为83.83%,出水氨氮达到地表Ⅲ类水质标准。与水温 $>15^\circ\text{C}$ 时相比,低温下硝化性能有所降低,致使出水氨氮浓度小幅升高,但仍低于 $1.0 \text{ mg/L}$ ,满足设计要求。从工程实践角度看,整体上项目低温期短,且可确保出水水质稳定达标,所以生化段设计水温采用 $15^\circ\text{C}$ 是合理的。

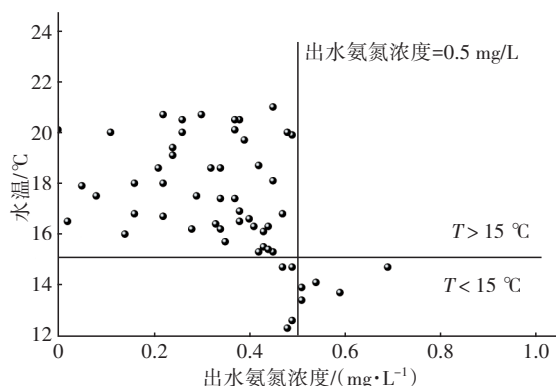


图6 不同温度下氨氮的去除效果

Fig.6 Removal effect of  $\text{NH}_3\text{-N}$  at different temperatures

### 3.2 水力负荷对出水氨氮浓度的影响

该水质净化厂设计处理水量为 $260 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,受汛期、池体检修等因素影响,实际处理量为 $(119.5 \sim 298.1) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。跟踪研究了单组纯膜MBBR池在2021年4月1日(278 d)—5月31日(338 d)期间出水氨氮浓度与水力负荷(实际进水量/设计进水量)的关系,结果如图7所示。在研究期间,系统基本处于水量超负荷运行阶段,受单组生化池停水检修等因素的影响,邻近池子进水能力得到加强,单组水力负荷最大达到1.35。此时系统的HRT缩短至31 min,降幅达到26.7%。在长期进水量超负荷运行过程中,出水氨氮浓度可以稳定保持在 $0.5 \text{ mg/L}$ 以下,达到地表Ⅱ类水质标准。

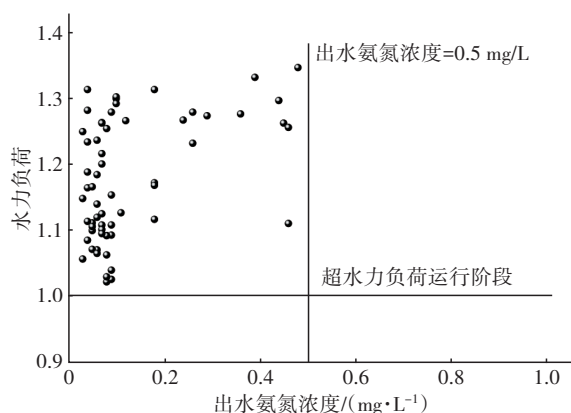


图7 不同水力负荷下氨氮的去除效果

Fig.7 Removal effect of  $\text{NH}_3\text{-N}$  at different hydraulic loading rates

宋日晨等<sup>[9]</sup>将纯膜MBBR工艺用于饮用水预处理,在负荷为400%的情况下,系统对氨氮的平均去除率为49%,可保障出水氨氮 $<1\text{ mg/L}$ 。可见,纯膜MBBR工艺具备良好的抗水量冲击能力,能够应对水量的波动,保障出水水质的稳定性。本项目纯膜MBBR区采用了侧进侧出微动力混合池型,一方面通过长边均匀布水,扩大了进水断面面积,降低了池体内的水平流速,也削减了水力冲击;另一方面配合筛网曝气,形成了纵向循环流动,强化了水力混合作用,进一步提高了系统的抗冲击性能。

### 3.3 进水氨氮浓度对其出水浓度的影响

该项目进水氨氮浓度较低,低于 $6\text{ mg/L}$ 。跟踪研究了单组纯膜MBBR池在2020年11月11日(137 d)—2021年5月31日(338 d)期间出水氨氮浓度与进水氨氮浓度的关系,结果如图8所示。在研究期间,实际进水氨氮浓度介于 $1.04\sim 5.19\text{ mg/L}$ 之间,波动近5倍,在进水氨氮浓度为 $3.98\text{ mg/L}$ 的条件下可实现90%的进水氨氮覆盖率。从图8可以看出,在进水氨氮浓度波动较大的情况下,出水氨氮除低温期间略有升高外,其余均低于 $0.5\text{ mg/L}$ ,达到地表Ⅱ类水质标准,说明纯膜MBBR系统能够抵抗较大的进水水质冲击。此外,在出水氨氮 $<0.5\text{ mg/L}$ 的情况下,出水氨氮浓度和进水氨氮浓度具有一定的正相关性,即随着进水氨氮浓度的升高,出水氨氮浓度也升高,说明在环境参数一定的情况下系统硝化性能趋于稳定。所以从工程实践角度看,该项目的悬浮载体负荷及投加量设计合理。

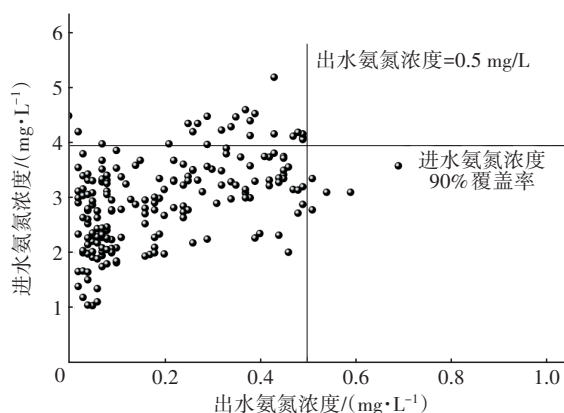


图8 不同进水氨氮浓度下氨氮的去除效果

Fig.8 Removal effect of  $\text{NH}_3\text{-N}$  at different influent ammonia nitrogen concentrations

### 3.4 气水比对出水氨氮浓度的影响

纯膜MBBR区曝气系统除了为好氧区提供充足的氧气外,也是悬浮载体流化唯一的动力来源。所以曝气量的调控除了要满足系统好氧微生物的生存,还要满足悬浮载体流化的需求。该项目设计最大气水比为2.0,根据实际进水水质进行气量的调控,气水比存在明显的波动。跟踪研究了单组纯膜MBBR池在2020年11月11日(137 d)—2021年5月31日(338 d)气水比与出水氨氮浓度的关系,结果见图9。实际气水比在 $0.7\sim 2.0$ 之间,且存在较长时间气水比低于设计值一半的情况,较大的气水比波动并未影响系统的硝化性能,出水氨氮浓度均低于 $0.5\text{ mg/L}$ ,均值为 $0.19\text{ mg/L}$ ,稳定达到设计标准。

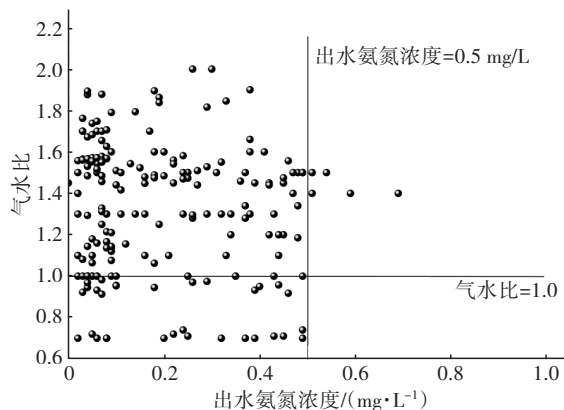


图9 不同气水比条件下氨氮去除效果

Fig.9 Removal of  $\text{NH}_3\text{-N}$  under different gas-water ratios

MBBR工艺用于市政污水处理时,由于进水基质浓度较高,好氧悬浮载体区的气水比一般在3.0以上。而对于微污染水而言,由于水质浓度低,需



氧量同步降低,由此导致了好氧区实际运行气水比较低。如盐城市某原水预处理厂采用了纯膜MBBR工艺,其实际气水比为1.0~1.3<sup>[10]</sup>。本项目运行过程中最低气水比达到0.7,受曝气系统良好的充氧能力以及低基质浓度的双重影响,此时系统DO仍达到7 mg/L以上,充足的DO浓度有效地保障了系统硝化性能的稳定发挥。此外,低气水比下悬浮载体良好的流化效果也是硝化性能得以稳定发挥的关键。从运行来看,在气水比低至0.7时,仍能够满足悬浮载体流化的需求,不仅保障了悬浮载体性能的稳定发挥,而且对于厂内实施节能降耗起到了至关重要的作用。值得注意的是,实际运行过程中曝气设备故障导致纯膜MBBR区停气1 d,在此期间纯膜MBBR区正常进出水,系统液位无明显变化,填料未发生堵塞情况。由于进水携带少量DO,故在停气状态下,纯膜MBBR区仍存在少量的硝化过程。所以,在单组池短时间内异常停气的情况下,不会对系统运行造成影响。

### 3.5 各因素影响程度分析

为进一步探究各影响因素对出水氨氮浓度的影响,采用主成分分析法(PCA)分析了气水比、进水氨氮浓度、水力负荷、水温、出水氨氮浓度5个参数之间关系。通过SPSS软件计算主成分分析KMO值为0.661>0.6, Bartlett检验对应 $p$ 值为0.000<0.05,说明适合采用主成分分析法进行分析,结果如图10所示。可以看出,与出水氨氮浓度相关性较大的影响因素排序为水温>进水氨氮浓度>>水力负荷和气温水比。进一步采用SPSS软件以气水比、水力负荷、进水氨氮浓度、温度作为自变量,出水氨氮浓度作为因变量进行线性回归分析,结果如表4所示。

从表4可以看出,出水氨氮浓度与温度呈现一定的负相关性,但从图6可知,当水温>15℃时其已不是出水氨氮浓度的限制性因素,相关性已经减弱。出水氨氮浓度与进水氨氮浓度呈现正相关性,与图8分析结果一致,基于设计进水浓度的出水氨氮浓度可以实现稳定达标,但系统能够耐受进水氨氮浓度的峰值,则需继续跟踪分析。气水比的回归系数为-0.063,说明对出水氨氮产生负相关影响,显示气水比越高,出水氨氮浓度越低,但得益于良好的曝气系统,可在低气水比下实现良好流化和充氧功能,确保出水氨氮的稳定达标,故在出水氨氮浓度达标的情况下,相关性已经减弱。水力负荷的

回归系数为0.119,且 $p=0.099>0.05$ ,意味着水力负荷并不会对出水氨氮产生影响,显示出纯膜MBBR系统良好的抗水量冲击性能,这得益于MBBR区微动力混合池的池型布置。需要注意的是,根据线性回归分析得到的 $R^2$ 值为0.649,意味着温度、水力负荷、进水氨氮浓度、气水比4个因素可以解释出水氨氮64.9%的变化原因,说明与常规市政污水不同,对于微污染水硝化的影响因素仍需进一步探究。

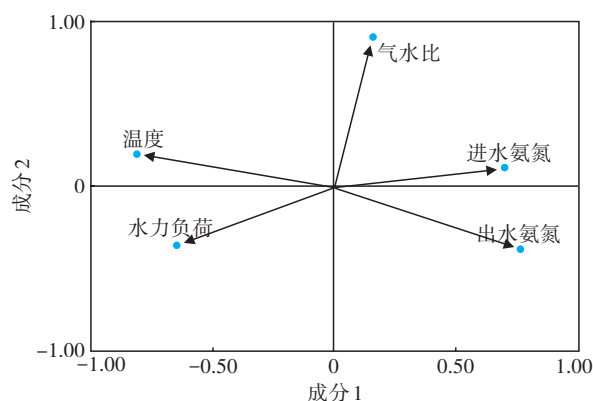


图10 出水氨氮浓度影响因素分析

Fig.10 Analysis of factors affecting ammonia nitrogen concentration in effluent

表4 线性回归分析

Tab.4 Linear regression analysis

项目	非标准化系数		标准化系数	$t$	$p$
	$B$	标准误差	Beta		
常数	0.280	0.092	—	3.031	0.003**
温度	-0.017	0.002	-0.468	-7.335	0.000**
进水氨氮	0.084	0.011	0.415	7.336	0.000**
气水比	-0.063	0.025	-0.141	-2.520	0.013*
水力负荷	0.119	0.072	0.105	1.658	0.099

注: “\*”表示 $p<0.05$ ; “\*\*”表示 $p<0.01$ 。

## 4 结论

① 南方某大型水质净化厂采用纯膜MBBR工艺对原一级强化沉淀工艺末端进行改造,以提高系统硝化性能。改造完成悬浮载体全部投加3 d后,出水氨氮浓度<1.0 mg/L,达到设计标准。稳定运行期间,系统出水氨氮浓度为(0.19±0.14) mg/L,平均去除率达到91.64%,稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅱ类水质标准。

② 纯膜MBBR系统具备良好的间歇运行能力,悬浮载体离水7 d后恢复通水,用时4 d可使出水氨氮浓度达标。

③ 出水氨氮浓度分别与水温 and 进水氨氮浓度呈负相关和正相关。纯膜MBBR工艺良好的抗低温和水质冲击性能以及合理的设计参数,确保了在温度 $<15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及进水水质较大波动的情况下出水稳定达到设计标准。气水比对出水氨氮浓度影响较小,在0.7~2.0的气水比下载体流化良好,出水氨氮浓度均值 $<0.5\text{ mg/L}$ 。水力负荷对出水氨氮几乎没有影响,系统具备良好的耐水力冲击性能。

④ 经过纯膜MBBR工艺改造后,系统出水COD、BOD<sub>5</sub>、TP、SS均优于改造前,总运行费用为0.076~0.109元/m<sup>3</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 周家中,吴迪,郑临奥,等. 纯膜MBBR工艺在国内外工程应用[J]. 中国给水排水,2020,36(22):37-47.  
ZHOU Jiazhong, WU Di, ZHENG Lin'ao, et al. Engineering application of pure MBBR process at home and abroad [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22):37-47(in Chinese).
- [2] 周正兴,孙晓阳,吴迪,等. MBBR处理某水厂微污染水硝化性能研究[J]. 水处理技术,2020,46(8):121-125.  
ZHOU Zhengxing, SUN Xiaoyang, WU Di, et al. Study on nitrification performance of MBBR process in treatment of micro-polluted water [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(8): 121-125 (in Chinese).
- [3] 熊水应,李翠红. MBBR工艺在微污染原水预处理中的应用[J]. 给水排水,2010,36(7):25-29.  
XIONG Shuiying, LI Cuihong. Application of MBBR in micro-polluted water treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(7):25-29(in Chinese).
- [4] 刘妍,余军,杨忠启,等. 华南某微污染水处理厂纯膜MBBR工艺改造工程设计[J/OL]. 中国给水排水, 2021. [2021-10-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1073.tu.20210923.1129.002.html>.  
LIU Yan, YU Jun, YANG Zhongqi, et al. Design of pure MBBR process retrofitting for a micro-polluted water treatment plant in South China [J/OL]. China Water & Wastewater, 2021. [2021-10-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1073.tu.20210923.1129.002.html> (in Chinese).
- [5] 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).
- [6] 韩文杰,周家中,刘妍,等. 纯膜MBBR工艺处理微污染水的工程启动研究[J/OL]. 中国给水排水,2021. [2021-10-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1073.TU.20210823.1613.002.html>.  
HAN Wenjie, ZHOU Jiazhong, LIU Yan, et al. Research on start-up of pure MBBR process for micro-polluted water treatment [J/OL]. China Water & Wastewater, 2021. [2021-10-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1073.TU.20210823.1613.002.html> (in Chinese).
- [7] 韩文杰,吴迪,周家中,等. CANON生物膜载体储存及活性恢复研究[J]. 中国环境科学,2020,40(5):2062-2072.  
HAN Wenjie, WU Di, ZHOU Jiazhong, et al. Research on the storage and activity recovery of CANON suspended carrier biofilm [J]. China Environmental Science, 2020, 40(5):2062-2072 (in Chinese).
- [8] DELATOLLA R, YOUNG B, STINTZI A. Application of the MBBR technology to achieve nitrification below  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ : biofilm and microbiome analysis [C] // Springer International Publishing. Frontiers International Conference on Wastewater Treatment and Modelling. Cham: Springer International Publishing, 2017:513-517.
- [9] 宋日晨,曹勋,冯小卫,等. MBBR在饮用水预处理中的中试应用研究[J]. 江苏水利,2019(10):14-17.  
SONG Richen, CAO Xun, FENG Xiaowei, et al. Study on the trial application of MBBR in drinking water pretreatment [J]. Jiangsu Water Resources, 2019(10): 14-17 (in Chinese).
- [10] 王毅,井添祺,周家中,等. 盐城市某原水预处理厂设计与运行分析[J]. 净水技术,2020,39(7):24-29,34.  
WANG Yi, JING Tianqi, ZHOU Jiazhong, et al. Analysis of design and operation for a raw water pretreatment plant in Yancheng City [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(7): 24-29, 34 (in Chinese).

作者简介:刘妍(1988-),女,河南新蔡人,硕士,工程师,从事污水厂运营管理工作。

E-mail:lyyan1221@163.com

收稿日期:2021-10-26

修回日期:2021-11-14

(编辑:李德强)