

四级 A/O 镶嵌 MBBR 工艺在高原污水厂的设计应用

宋海东¹, 魏琦², 蒋伟国², 李志伟³

(1. 中国市政工程西北设计研究院有限公司第六设计院, 甘肃兰州 730000; 2. 西宁市污水处理有限公司, 青海西宁 810000; 3. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东青岛 266000)

[摘要] 我国西部高原地区的自然条件普遍较差, 需加强水资源的保护利用。某高原污水处理厂原为四级 A/O 工艺, 采用移动床生物膜反应器 (MBBR) 进行改造后, 在常年低温和超水量运行的情况下, 出水中的 COD、BOD₅、氨氮、总氮、悬浮物和总磷浓度均可稳定达标。改造项目施工迅速、占地紧凑, 采用原池改造, 土建费用低。不停水进行改造的施工方式, 使得污水厂在正常运行的情况下, 实现生物池的升级。悬浮载体对硝化菌属的富集能力强于活性污泥, 因此悬浮载体的硝化能力强于活性污泥; 活性污泥对有机物的去除能力及对聚磷菌属的富集性均高于悬浮载体。二级 MBBR 悬浮载体对氨氮的去除能力要强于一级 MBBR, 而一级 MBBR 悬浮载体对有机物的去除性能强于二级 MBBR。改造后, 项目运行电费为 0.322 元/m³, 直接运行费用为 0.378 元/m³, 可为后期高原地区污水处理项目的实施提供一定数据支撑和技术借鉴。

[关键词] 移动床生物膜反应器; 悬浮载体; 城镇污水; 改造

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1005-829X(2023)04-0170-08

Design and application of four-stage A/O and MBBR process in plateau wastewater treatment plant

SONG Haidong¹, WEI Qi², JIANG Weiguo², LI Zhiwei³

(1. Sixth Design Institute, CSCEC Aecom Consultants Co., Ltd., Lanzhou 730000, China; 2. Xining Sewage Treatment Co., Ltd., Xining 810000, China; 3. Qingdao Spring Water Treatment Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: The natural conditions in the western plateau region of China are poor, and it is necessary to strengthen the protection and utilization of water resources. A plateau wastewater treatment plant originally had a four-stage A/O process. After the transformation with moving bed biofilm reactor (MBBR), the COD, BOD₅, ammonia nitrogen, total nitrogen, suspended solids and total phosphorus in the effluent could meet the standards stably under the condition of low temperature and over water operation. The construction of transformation project was rapid with compact area, and the original pool was used, with low civil construction costs. The construction of transformation without water interruption made it possible to upgrade the biological ponds under normal operation of the wastewater plant. The enrichment ability of suspended carriers for nitrifying genera was stronger than that of activated sludge, so the nitrification ability of suspended carriers was stronger. Activated sludge had higher organic removal capacity and enrichment of phosphorus accumulating genera than suspension carrier. The ammonia nitrogen removal ability of secondary MBBR suspension carrier was better than primary MBBR, while the organic removal ability of primary MBBR suspension carrier was better than secondary MBBR. After the transformation, the operating electricity cost was 0.322 RMB/m³ and the direct operating cost was 0.378 RMB/m³, which provides some support and technical reference for the implementation of wastewater treatment projects in plateau areas.

Key words: moving bed biofilm reactor; suspended carrier; municipal sewage; transformation

[基金项目] 青岛市科技惠民示范引导专项 (22-3-7-CSPZ-10-nsh)

“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划的提出,为我国新时代废水的处理和水资源的合理利用指明了方向。我国幅员辽阔,各地的发展环境不同,因此要求各地区根据自身情况选择适合当地的水资源发展模式。我国西部高原地区的自然和社会条件普遍较差,缺水问题成为制约当地经济发展的重要原因之一。为保护和合理利用水资源,减少污染物排放量,需要提高现有污水处理厂的出水标准,加大中水回用规模,践行生态文明建设的理念。

移动床生物膜反应器(MBBR)是以悬浮载体的充分流化为核心的污水处理技术^[1],该技术起源于20世纪90年代的欧洲,并在2000年传入我国。2008年,无锡芦村污水处理厂实现了MBBR工艺在我国的首次成功应用^[2],开启了MBBR工艺在国内污水处理厂提标改造中应用的序幕。MBBR工艺启动迅速、运行稳定,具有较强的抗冲击性^[3-4],能够实现原池的镶嵌式改造,具备污水厂原位强化的功能,故而充分缓解了我国环保行业发展过程中占地紧缺的问题。MBBR工艺已成为国内污水处理厂升级改造项目中的主流工艺之一。当前,MBBR工艺在我国中东部地区的应用情况多有报道,但在西部高原地区的地理位置独特,MBBR工艺在该地区的应用效果非常值得追踪和研究。鉴于此,笔者对我国西部高原地区某污水处理厂的改造、运行效果和微生物组成进行分析,为此类项目的实施和运行维护提供一定借鉴。

1 项目概况

某高原污水处理厂于2012年12月开工建设,2015年1月1日进入单机调试,2015年8月1日开始试运行。处理厂占地面积约36 000 m²,建设规模为3.0万t/d,处理工艺采用多段多级AO生物处理,出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准要求。由于其规划收集范围包含某工业园区、大学科教园区、农副产品加工区及生物科技产业园,因此进水中含有一定量的工业污水。改造前工艺流程如图1(a)所示,污水经过粗格栅间、提升泵房、细格栅、旋流沉砂池、初沉池及水解池后,进入四级A/O池;随后污水经二沉池泥水分离,进入化学除磷池进一步去除污水中的磷;最终,化学除磷池的出水经滤池过滤、接触池消毒出水。

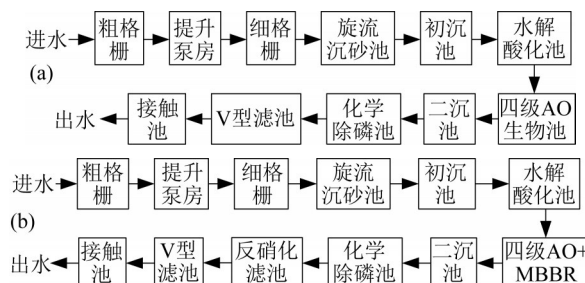


图1 改造前(a)和改造后(b)的工艺流程

Fig. 1 Process flow before transformation (a) and after transformation (b)

至2019年该污水处理厂已满负荷运行,出水水质标准仅为一级A标准,在功能上仅能用作道路洒水及绿化用水。为使出水达到《城市污水再生利用景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)中景观环境用水水质要求,进一步改善当地的用水环境,需对其进行升级改造。

2 改造难点

根据该污水处理厂的原有设计和长期运行情况,提标改造面临以下困难:

(1)占地少,生物池要求原池改造。项目所在位置偏远,并无更多规划用地,需要在原生物池基础上进行原池改造。

(2)改造期间不停水。该污水处理厂是周围园区和校区污水的唯一处理点,无法进行停水改造,需在污水厂正常进水运行的情况下进行改造。

(3)常年低温。由于该污水处理厂海拔较高,年最高水温不超过16℃,对微生物的活性产生不利影响。

3 技术路线选择

3.1 污水二级处理方案选择

该污水处理厂原来采用四级A/O工艺作为二级生化处理工艺,并配套相应的深度处理工艺。现场调查情况显示该工艺运行良好,各项出水指标可满足原设计执行一级A标准要求。由于此次水质提升工程满足《城市污水再生利用景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)中娱乐性景观环境用水(湖泊类)水质要求,标准有所提高,且考虑到降低建设成本和原池改造等因素,本设计在原有生物反应系统内投加悬浮载体(即MBBR工艺),同时在保留原有深度处理系统的基础上,考虑在深度处理后进一步去除各污染物。MBBR工艺可根据改造的需要选用

不停水施工,在保证系统正常运行的情况下,完成镶嵌式改造。不停水的改造方式,一方面能够减少停水审批的流程,另一方面避免因停水改造而造成的收入损失,是污水处理厂技术改造的优选方案之一。

3.2 深度处理方案选择

经深度处理后的出水所含悬浮物较少,并含有难以去除的色、味和有机物,与给水处理中微污染和低浊原水相似,二者在处理技术及流程方面都有相似之处,但不是常规的给水处理技术能完全替代的。为达到《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)中娱乐性景观环境用水(湖泊类)水质要求,以及反硝化深床滤池具有运行可靠、占地小、投资省且出水稳定的特点,提升工程在深度处理之后增加反硝化深床滤池工艺,以实现深层脱氮目的,保障出水总氮达标。

4 工艺设计

4.1 生物池改造

原污水厂四级 A/O 生物池 1 座,尺寸为 $70.4\text{ m} \times 59.01\text{ m} \times 6.0\text{ m}$,有效水深 5.5 m ,分为 2 组,每组处理能力 $1.5 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,生物池总水力停留时间为 16.7 h 。采用 MBBR 工艺对污水厂进行提标升级,无需征地及新建构筑物,不改变原有构筑物状态和运行方式。在二级好氧区中投加生物膜悬浮载体,悬浮载体由高密度聚乙烯材料制成(见图 2),其直径为 $(25.0 \pm 0.5)\text{ mm}$,高为 $(10.0 \pm 1.0)\text{ mm}$,有效比表面积 $>800\text{ m}^2/\text{m}^3$,符合《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体填料》(CJ/T 461—2014)要求。挂膜前,悬浮载体密度约为 $0.94 \sim 0.97\text{ g}/\text{cm}^3$,略小于水的密度;挂膜后,悬浮载体密度达到 $1.000 \sim 1.003\text{ g}/\text{cm}^3$,与水接近。



图2 成熟挂膜填料

Fig. 2 Mature suspending carrier

在系统原有微孔曝气的基础上,配套 MBBR 区辅助穿孔曝气系统。该系统气源来自原有曝气管路,A/O 池无需增加供氧量,仅需将原有气量重新分配,进而满足微生物对氧气的需求。在 MBBR 区出水的位置增加悬浮载体拦截装置,防止载体随水流失。项目以水下作业方式进行施工,实现了正常运行情况下的升级改造。改造后一级 A 池(厌氧)、一级 O 池(好氧)、二级 A 池(缺氧)、二级 O 池(好氧 MBBR 区)、三级 A 池(缺氧)、三级 O 池(好氧)、四级 A 池(缺氧)、四级 O 池(好氧)的水力停留时间分别为 1.6 、 2.6 、 1.8 、 2.6 、 1.7 、 2.6 、 2.8 、 1.0 h 。改造后的生物池功能区域分布如图 3 所示,其中回流污泥经过回流污泥渠道进入到一级 A 池,来自水解池的进水在各级进行分配。内回流泵设置于四级 A 池和四级 O 池之间,其他区域不设置单独的内回流装置。

4.2 新建反硝化滤池

新建反硝化深床滤池 1 座,设计水量为 $2\,083\text{ m}^3/\text{h}$,建筑面积 614.3 m^2 ,高度 12.9 m 。其中混合池内设折板桨搅拌机 2 台,单格滤池内气水分布块面积 79 m^2 ,石英砂滤料体积 191 m^3 ,卵石体积 39 m^3 ;设备间设置反冲洗水泵 2 台,1 用 1 备;反冲洗风机 3 台,2 用 1 备;空压机 2 台,1 用 1 备;配套建设半地下式钢制乙酸钠储罐 2 套,单套容积 50 m^3 ;配套 3 台乙酸钠投加计量泵,2 用 1 备。

4.3 接触池改造

接触池设计尺寸为 $18\text{ m} \times 12.4\text{ m} \times 4.20\text{ m}$,有效水深 3.5 m 。接触池内设计潜水排污泵 4 台,其中厂区回用水泵 2 台,1 用 1 备,单台参数 $Q=50\text{ m}^3/\text{h}$, $H=35\text{ m}$, $P=11\text{ kW}$ 。污脱机房回用水泵 2 台,单台参数 $Q=60\text{ m}^3/\text{h}$, $H=55\text{ m}$, $P=22\text{ kW}$ 。

为满足反硝化深床滤池进水压力及水量的要求,对接触池进行改造,对原有接触池内的厂区中水回用水泵进行更换,更换后水泵参数 $Q=630\text{ m}^3/\text{h}$, $H=10\text{ m}$, $P=37\text{ kW}$ (2 用 1 备,变频)。更换原有 2 台水泵,并新增 1 台备用水泵,水泵出水接入反硝化深床滤池中。

5 运行效果分析

工程于 2020 年改造完成,2021 年开始投入运营。2021 年 8 月至 2022 年 2 月的进出水数据如表 1 所示。

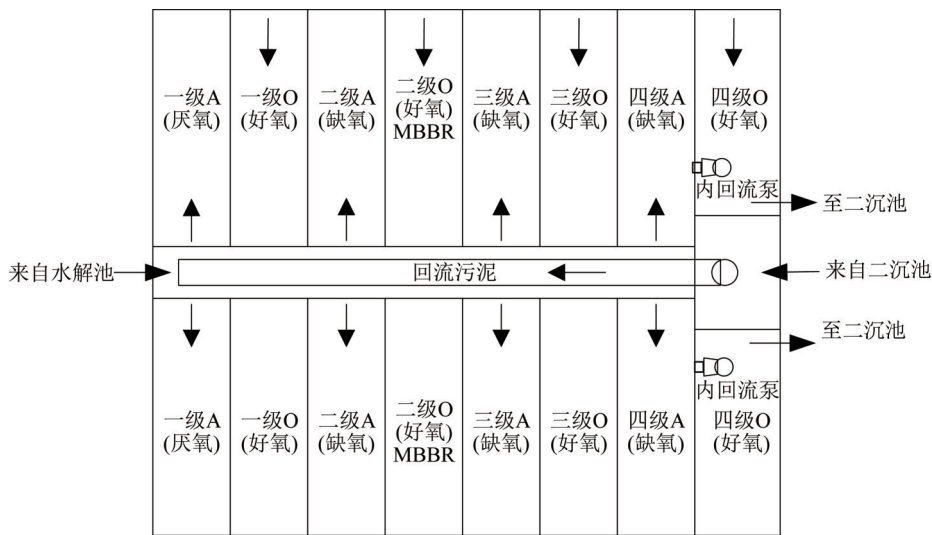


图3 生物池结构

Fig. 3 Structure of biological tank

表1 改造后实际进出水水质

Table 1 Actual inlet and outlet water quality after transformation

日期	水量/ (万 t·d ⁻¹)	项目	水温/℃	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)	SS/ (mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)
2021年8月	3.4±0.2	进水	15.2±0.8	57.2±45.7	225.2±115.2	228.8±206.9	7.4±0.4	16.7±1.2	1.1±0.4
		出水	15.5±0.7	1.0±0.6	28.0±6.7	1.4±0.9	0.2±0.1	7.2±1.3	0.07±0.03
2021年9月	3.7±0.2	进水	14.2±0.5	84.8±65.4	309.3±195.6	305.3±179.8	7.5±0.6	16.9±2.2	1.8±1.2
		出水	14.2±0.5	1.2±0.4	30.0±6.8	1.2±0.6	0.2±0.1	8.2±1.2	0.09±0.05
2021年10月	3.5±0.2	进水	12.4±0.7	196.6±97.7	527.8±222.5	540.4±222.7	7.8±0.7	20.9±4.0	2.8±1.4
		出水	14.4±0.7	1.2±0.5	31.5±6.3	1.2±0.5	0.2±0.1	8.2±1.2	0.05±0.02
2021年11月	3.2±0.1	进水	9.4±1.0	116.6±66.2	405.0±196.7	347.7±263.7	7.4±0.5	18.2±2.2	2.2±1.0
		出水	8.8±1.2	1.3±0.7	32.4±7.6	1.6±0.7	0.1±0.1	4.9±2.7	0.05±0.02
2021年12月	3.3±0.5	进水	7.8±0.6	58.7±44.2	178.9±117.3	149.7±160.8	7.2±0.5	16.9±1.6	1.3±0.7
		出水	6.9±1.0	1.3±0.5	28.8±7.5	1.2±0.4	0.1±0.1	10.3±1.4	0.05±0.03
2022年1月	3.4±0.1	进水	6.5±0.5	75.3±48.4	224.9±137.2	205.1±193.4	7.0±0.6	17.8±3.4	1.5±0.8
		出水	5.8±0.6	1.2±0.4	31.8±6.0	1.4±0.7	0.2±0.1	9.7±1.0	0.04±0.01
2022年2月	3.3±0.1	进水	6.1±0.4	69.8±56.6	231.1±163.2	142.4±125.0	6.9±0.7	17.2±0.8	1.2±0.6
		出水	5.4±0.6	1.1±0.4	30.4±7.9	1.1±0.4	0.2±0.1	10.1±1.1	0.04±0.01

由表1可知,该项目的COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN、TP和SS设计进水质量浓度分别为480、200、43、50、4.0、240 mg/L。除SS外,其他指标的实际进水值明显低于设计值。实际水温明显偏低:8月至10月的水温介于10~16℃;进入11月后,水温降至10℃;1月至2月低于7℃。此外,设计水量为3万 t/d,而实际处理水量为3.2~3.7万 t/d,属超水量运行。

虽然该厂存在进水量超过设计值及常年温度较低的情况,但出水可稳定达到《城市污水再生利用景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)中娱乐性景观环境用水(湖泊类)水质要求。出水COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN、TP和SS分别稳定低于40、2.0、0.4、12、0.15、3 mg/L,表明该工艺具有耐低温和抗水

量冲击的作用,可保障污水厂稳定运行。

6 悬浮载体性能评价

生物池改造嵌入了MBBR工艺,因此需对悬浮载体的性能进行评价,以便为今后此类工程项目的改造升级提供借鉴。生物池改造时将二级好氧区(MBBR)分成两级,每一级均投加悬浮载体,因此对两级的悬浮载体及活性污泥的有机物、氨氮去除性能进行测定,如图4所示。

由图4(a)可见,0~30 min的反应时间内,活性污泥、一级MBBR和二级MBBR分别将COD由110.3、113.6、108.7 mg/L降至30.2、54.2、61.2 mg/L;随着反应时间增至120 min,COD进一步降至20.9、28.4、

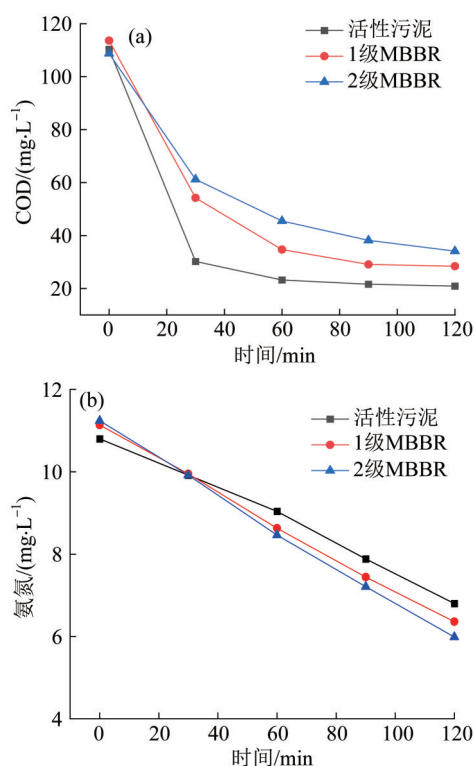


图4 活性污泥和悬浮载体对有机物(a)和氨氮(b)的去除性能

Fig. 4 Removal of organic matter (a) and ammonia nitrogen (b) by activated sludge and suspended carrier

34.1 mg/L。对COD的去除能力由高到低分别为活性污泥、一级MBBR和二级MBBR,该结果源于活性污泥与生物膜的差异,又与有机物的浓度梯度有关。活性污泥的有机物去除能力高于MBBR,可能是活性污泥和悬浮载体的比表面积不同所致。而一级MBBR的有机物去除性能高于二级MBBR,可能是由于一级MBBR的有机物负荷高于二级MBBR。

图4(b)中,反应时间由0增至120 min,活性污泥、一级MBBR和二级MBBR分别将氨氮由10.8、11.1、11.2 mg/L降至6.8、6.4、6.0 mg/L。对氨氮的去除能力由高到低分别为二级MBBR、一级MBBR和活性污泥。相比于活性污泥,悬浮载体更利于硝化菌的繁殖^[1],使得MBBR对氨氮的去除性能强于活性污泥。由于一级MBBR中有机物的影响,一级MBBR的氨氮去除性能受到抑制,低于二级MBBR的氨氮去除性能。

7 微生物群落分析

污水处理系统的运行情况与微生物的群落变化息息相关。研究采用高通量测序技术,对活性污泥和生

物膜上的微生物群落进行分析。活性污泥和生物膜上微生物群落的丰富度和多样性差异如表2所示。

表2 活性污泥和生物膜的微生物丰富度和多样性指数

Table 2 Richness and diversity index of microbial communities in activated sludge and biofilm

样品	原始测序序列	OTUs	Chao1指数	Shannon指数	菌群覆盖度指数
活性污泥	42 313	1 090	1 301.7	4.426	0.991
一级MBBR	41 543	1 171	1 315.4	4.880	0.992
二级MBBR	39 839	1 153	1 368.6	4.662	0.992

由表2可见,活性污泥、一级MBBR和二级MBBR的分类操作单元(OTU)数目分别为1 090、1 171、1 153,3个样品的菌群覆盖度指数均高于0.99,表明此次测序具有很高的覆盖性,能够真实反映样品中微生物的组成和差别。Chao1指数代表样品的微生物丰富度,Shannon指数代表样品的微生物多样性^[5]。一级、二级MBBR的Chao1指数和Shannon指数均高于活性污泥,表明在当前进水条件下,悬浮载体上生物膜的生物丰富度和多样性均高于活性污泥,悬浮载体在微生物富集方面优于活性污泥。

Venn图能够反映3个样品中共有和独有的OTU数目,从而表明各个样品之间的种群差异性,如图5所示。

由图5可见,3个样品的OTU数目共计1 458个,其中3个样品共有的OTU数目为789(占总OTU数目的54.1%)。共有的OTU中,Actinobacteriota(放线菌门)、Firmicutes(厚壁菌门)、Proteobacteria(变形菌门)、Chloroflexi(绿弯菌门)、Acidobacteriota(酸杆菌门)、Patescibacteria(骸骨菌门)和Bacteroidota(拟杆菌门)的相对丰度分别为34.74%、26.14%、18.15%、9.19%、3.58%、2.60%、2.58%。活性污泥、一级MBBR和二级MBBR中独有的OTU数目分别为113、90、88个,共计291个,仅占总OTU数目的20.0%,表明独有OTU并不是引起样品间物种差异的主要因素。

3个样品在门水平上的物种丰度如图6(a)所示。

活性污泥和两种悬浮载体中丰度较高的微生物包括Actinobacteriota、Firmicutes、Proteobacteria和Chloroflexi等。在活性污泥中,Actinobacteriota、Firmicutes、Proteobacteria和Chloroflexi的相对丰度分别

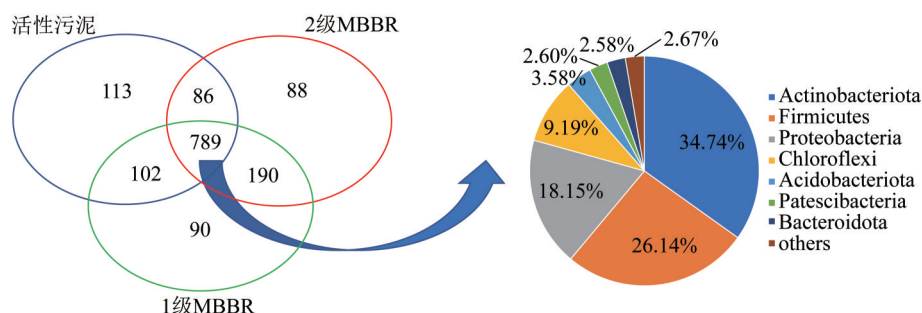


图5 活性污泥和生物膜上微生物群的差异

Fig. 5 Differences in microbial community on activated sludge and biofilms

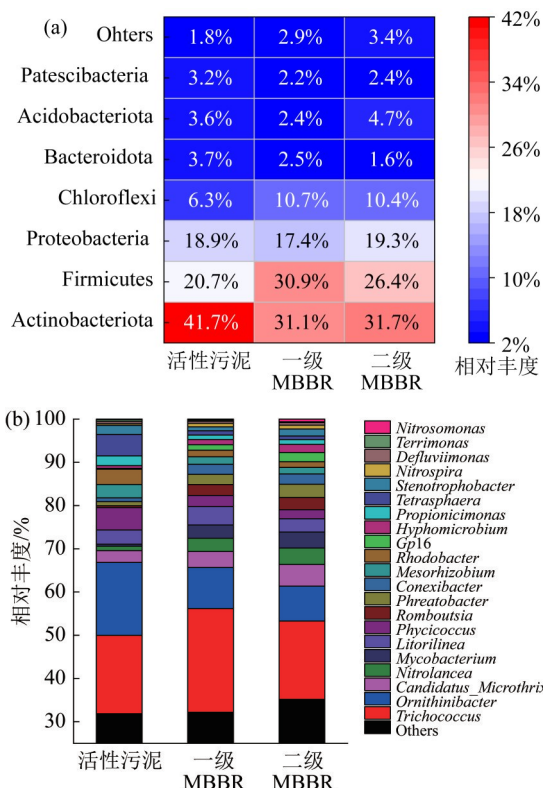


图6 门水平(a)和属水平(b)上的物种相对丰度

Fig. 6 Relative abundance distribution at phylum (a) and genus level (b)

为41.7%、20.7%、18.9%、6.3%。与活性污泥相比,一级和二级悬浮载体上 Actinobacteriota 的相对丰度分别降至31.1%、31.7%,而 Firmicutes 的相对丰度分别增至30.9%、26.4%,Chloroflexi 的相对丰度分别增至10.7%、10.4%。上述结果表明,即使共存于相同的污水处理系统中,活性污泥和生物膜上的微生物群落结构依然存在一定的差异性。

为探明系统中功能化微生物的情况,对属水平上的微生物组成进行分析,见图6(b)。*Nitrospira*(硝化螺菌属)适合生长在低基质浓度的环境^[6],既能将

氨氮转化为亚硝酸盐氮,又能将亚硝酸盐氮转化为硝酸盐氮,具备全程硝化的功能。*Nitrosomonas*(亚硝化单胞菌)是常见的氨氧化菌,能够将氨氮转化为亚硝酸盐氮^[7]。*Nitrolancea*是常见的亚硝酸盐氧化菌,能够将亚硝酸盐氮转化为硝酸盐氮^[7]。*Nitrospira*、*Nitrosomonas* 和 *Nitrolancea* 在活性污泥中的相对丰度分别为0.35%、0.14%、1.02%,在一级 MBBR 中的相对丰度为0.81%、0.24%、3.06%,而在二级 MBBR 中的相对丰度分别为0.90%、0.63%、3.81%。悬浮载体中 *Nitrospira*、*Nitrosomonas* 和 *Nitrolancea* 的相对丰度高于活性污泥,表明悬浮载体对硝化功能菌属的富集性强于活性污泥。二级 MBBR 悬浮载体的硝化功能菌属丰度高于一级 MBBR 悬浮载体,与 MBBR 的氨氮去除性能一致,表明一级和二级 MBBR 中悬浮载体上硝化菌属的丰度差异导致了其不同的氨氮去除能力。这可能是有机物对一级 MBBR 硝化性能的影响导致的。*Propionisimonas*(丙酸单胞菌)和 *Tetrasphaera*(四球虫属)是常见的两种聚磷菌属^[8-9],其在活性污泥中的相对丰度分别为2.25%、4.97%,而在 MBBR 悬浮载体中的相对丰度低于1.20%,表明系统的生物除磷性能主要由活性污泥承担。

Trichococcus(束毛球菌属)和 *Candidatus_Microthrix* 分别与脱落生物膜的沉降性有关^[10-11],在缺氧悬浮载体中的相对丰度分别为0.65%、3.61%,在好氧悬浮载体中的相对丰度分别为1.59%、0.15%。*Mycobacterium*、*Mesorhizobium*、*Rhodobacter*、*Hyphomicrobium*、*Defluviimonas* 和 *Terrimonas* 为污水处理系统中常见的反硝化菌属^[12-16],该类菌属的存在保障了系统的脱氮功能。由于污水生物处理系统中反硝化菌属种类繁多且功能多样,因此其相对丰度呈现出不同的变化趋势。未来仍需对反硝化菌属的环境适应性进行深入研究。

8 经济分析

此次升级改造,生物池采用 MBBR 与四级 AO 工艺相结合,实现原池改造,土建少,不额外增加占地面积。生物池采用不停水改造方式,在污水厂正常运转下提高生物池性能,为后续类似工程案例的实施提供了借鉴意义。

该污水处理厂的吨水电耗为 $0.537 \text{ kW} \cdot \text{h}$,按电价 $0.6 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 计,运行电费为 $0.322 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。该项目投加聚合氯化铝(PAC)溶液除磷,PAC 费用总计 $0.012 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。投加聚丙烯酰胺(PAM)固体,PAM 费用总计 $0.034 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。由于项目进水中存在部分工业水,含有一定量的难降解有机物,因此通过投加少量碳源,保证系统的正常运行,外加碳源费用总计 $0.01 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。综合能耗和药耗,该污水处理项目吨水直接运行费用为 0.378 元 ,预估月运行费用 34.02 万元 ,年运行费用 408.24 万元 。

9 结论

高原地区某污水处理厂采用 MBBR 技术进行提标改造。改造后,即使在常年低温和超水量运行的情况下,出水 COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN、SS 和 TP 也能够稳定达到设计标准要求。项目采用不停水改造的施工方式,使污水厂在正常运行的情况下实现了生物池的升级,占地紧凑,节省土建成本。悬浮载体对硝化菌属的富集能力强于活性污泥,而活性污泥对聚磷菌属的富集性强于悬浮载体。二级 MBBR 悬浮载体的氨氮去除能力强于一级 MBBR,而一级 MBBR 悬浮载体的有机物去除性能强于二级 MBBR。

改造后运行电费 $0.322 \text{ 元}/\text{m}^3$,直接运行费用 $0.378 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。此项目可为今后类似污水改造项目的实施提供借鉴。

参考文献

- [1] 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.
- [2] QU Jiahui, WANG Hongchen, WANG Kaijun, et al. Municipal wastewater treatment in China: Development history and future perspectives[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2019, 13(6): 1-7.
- [3] 王娜, 张军港, 姚晓然, 等. 滨海工业园区初期雨水 MBBR 工艺

预处理研究[J]. 工业水处理, 2021, 41(11): 61-64.

WANG Na, ZHANG Jungang, YAO Xiaoran, et al. Initial rain treatment using moving bed biofilm reactor in coastal industrial clusters[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(11): 61-64.

- [4] 孙浩浩, 黄开龙, 张徐祥, 等. 不同四环素废水处理系统中的抗生素抗性基因研究[J]. 工业水处理, 2021, 41(6): 105-110.

SUN Haohao, HUANG Kailong, ZHANG Xuxiang, et al. A study on the antibiotic resistance genes in different tetracycline wastewater treatment systems[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(6): 105-110.

- [5] WANG Sen, GAO Mengchun, SHE Zonglian, et al. Long-term effects of ZnO nanoparticles on nitrogen and phosphorus removal, microbial activity and microbial community of a sequencing batch reactor[J]. Bioresource Technology, 2016, 216: 428-436.

- [6] 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.

- [7] 栾志翔, 李志伟, 王江宽, 等. 北方某污水处理厂抗氯离子冲击效果分析[J]. 给水排水, 2020, 56(1): 32-38.

LUAN Zhixiang, LI Zhiwei, WANG Jiangkuan, et al. Effectiveness analysis of anti-chloride ion shock in a wastewater treatment plant in Northern China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(1): 32-38.

- [8] 耿淑英, 付伟章, 王静, 等. SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4715-4724.

GENG Shuying, FU Weizhang, WANG Jing, et al. Treatment efficiency and microbial community diversity in a magnetic field enhanced sequencing batch reactor (SBR) [J]. Environmental Science, 2017, 38(11): 4715-4724.

- [9] HANADA S, LIU W T, SHINTANI T, et al. Tetrasphaera Elongata sp. nov., a polyphosphate-accumulating bacterium isolated from activated sludge[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2002, 52(Pt 3): 883-887.

- [10] 陆鑫, 刘波, 谭云飞, 等. 低温条件下城市污水厂污泥膨胀的生物学成因[J]. 环境工程学报, 2016, 10(7): 3925-3930.

LU Xin, LIU Bo, TAN Yunfei, et al. Biological causes of sludge bulking in municipal wastewater treatment plant under low-temperature condition[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7): 3925-3930.

- [11] NIERYCHLO M, MCILROY S J, KUCHERYAVSKIY S, et al. *Candidatus amarolinea* and *Candidatus microthrix* are mainly responsible for filamentous bulking in Danish municipal wastewater treatment plants[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 1214.

- [12] CHOI M S, HWANG Y, LEE T J. Nitrogen removal using a membrane bioreactor with rubber particles as the fouling reducer[J]. Applied Sciences, 2021, 11(8): 3578.

- [13] GOMES J, KHANDEPARKER R, BANDEKAR M, et al. Quantitative analyses of denitrifying bacterial diversity from a seasonally hypoxic monsoon governed tropical coastal region [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2018, 156: 34-43.
- [14] 王思宇, 李军, 王秀杰, 等. 添加芽孢杆菌污泥反硝化特性及菌群结构分析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4649-4656.
- WANG Siyu, LI Jun, WANG Xiujie, et al. Denitrification characteristics of *Bacillus subtilis* sludge and analysis of microbial community structure[J]. China Environmental Science, 2017, 37(12): 4649-4656.
- [15] KLOOS K, FESEFELDT A, GLIESCHE C G, et al. DNA-probing indicates the occurrence of denitrification and nitrogen fixation genes in *Hyphomicrobium*. Distribution of denitrifying and nitrogen fixing isolates of *Hyphomicrobium* in a sewage treatment plant[J]. FEMS Microbiology Ecology, 1995, 18(3): 205-213.
- [16] ZHANG Miao, GAO Jing, LIU Quanlong, et al. Nitrite accumulation and microbial behavior by seeding denitrifying phosphorus removal sludge for partial denitrification (PD): The effect of COD/NO₃⁻ ratio[J]. Bioresource Technology, 2021, 323: 124524.
-
- [作者简介] 宋海东(1981—), 高级工程师。E-mail: 358257527@qq.com。
- [收稿日期] 2023-03-21(修改稿)
-
- *****
- (上接第120页)
- [25] LIU Guoqiang, WANG Jianmin. Long-term low DO enriches and shifts nitrifier community in activated sludge [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(10): 5109-5117.
- [26] SAUNDERS A M, ALBERTSEN M, VOLLERTSEN J, et al. The activated sludge ecosystem contains a core community of abundant organisms[J]. The ISME Journal, 2016, 10(1): 11-20.
- [27] MCILROY S J, STARNAWSKA A, STARNAWSKI P, et al. Identification of active denitrifiers in full-scale nutrient removal wastewater treatment systems [J]. Environmental Microbiology, 2016, 18(1): 50-64.
- [28] WANG Bo, WANG Zenghua, WANG Shanyun, et al. Recovering partial nitrification in a PN/A system during mainstream wastewater treatment by reviving AOB activity after thoroughly inhibiting AOB and NOB with free nitrous acid [J]. Environment International, 2020, 139: 105684.
- [29] LI Jiyun, XU Kangning, LIU Tingsheng, et al. Achieving stable partial nitrification in an acidic nitrifying bioreactor [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(1): 456-463.
- [30] YU Heng, TIAN Zhiyong, ZUO Jiane, et al. Enhanced nitrite accumulation under mainstream conditions by a combination of free ammonia-based sludge treatment and low dissolved oxygen: Reactor performance and microbiome analysis [J]. RSC Advances, 2020, 10(4): 2049-2059.
- [31] VADIVELU V M, YUANZhiguo, FUX C, et al. The inhibitory effects of free nitrous acid on the energy generation and growth processes of an enriched nitrobacter culture [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(14): 4442-4448.
- [32] 王增花, 王博, 宫小斐, 等. FNA处理絮体污泥恢复城市污水PN/A工艺短程硝化[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3308-3315.
- WANG Zenghua, WANG Bo, GONG Xiaofei, et al. Restoration of nitrification of the sewage partial nitrification/anammox (PN/A) process using free nitrous acid to treat flocculent sludge [J]. China Environmental Science, 2019, 39(8): 3308-3315.
- [33] 杨庆, 杨玉兵, 杨忠启, 等. 溶解氧对短程硝化稳定性及功能菌群的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3328-3334.
- YANG Qing, YANG Yubing, YANG Zhongqi, et al. Effect of dissolved oxygen on the stability and functional microbial communities of the partial nitrification [J]. China Environmental Science, 2018, 38(9): 3328-3334.
- [34] 彭永臻, 李璐凯, 李夕耀, 等. 不同pH值及碱性物质对短程硝化的影响[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(10): 1554-1562.
- PENG Yongzhen, LI Lukai, LI Xiyao, et al. Influence of pH and alkaline substances on shortcut nitrification [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(10): 1554-1562.
-
- [作者简介] 丁凡(1996—), 硕士。E-mail: dingfann@163.com。通讯作者: 李军, 教授。E-mail: bjutlijun@126.com。
- [收稿日期] 2023-03-15(修改稿)