

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.08.018

MBBR+磁混凝沉淀工艺用于用地受限污水厂改造

沈浩¹, 杨忠启², 汪凡¹, 陈伟华¹, 史成波¹, 殷建文²,
周家中²

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266510)

摘要: 广东省某污水处理厂处理规模为 12×10^4 m³/d, 设计出水水质要求达到广东省《水污染物排放限值》(DB 44/26—2001)第二时段一级标准和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准中的较严值。该污水处理厂提标面临占地受限问题。该项目采用MBBR+磁混凝沉淀工艺, 紧密结合现状工艺设施对原有A²/O工艺进行改造。生化池原位镶嵌MBBR工艺, 无需新建构筑物。深度处理单元采用磁混凝沉淀工艺, 在极小占地条件下完成实施, 保证了SS和TP的高效稳定去除。改造后出水COD为 (15.95 ± 4.16) mg/L、BOD₅为 (4.97 ± 1.40) mg/L、SS为 (7.10 ± 1.68) mg/L、TN为 (10.29 ± 2.59) mg/L、TP为 (0.17 ± 0.11) mg/L、NH₃-N为 (1.24 ± 1.17) mg/L, 出水水质稳定优于设计出水标准。实践证明, MBBR+磁混凝沉淀工艺具有简洁集约、稳定高效的特点, 适用于占地受限型污水处理厂的改扩建或新建。

关键词: 移动床生物膜反应器; 磁混凝沉淀工艺; 提标改造; 脱氮除磷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)08-0112-08

Application of MBBR and Magnetic Coagulation Precipitation Process in Retrofitting of a WWTP with Limited Construction Land

SHEN Hao¹, YANG Zhong-qi², WANG Fan¹, CHEN Wei-hua¹, SHI Cheng-bo¹,
YIN Jian-wen², ZHOU Jia-zhong²

(1. Central & Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China; 2. Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China)

Abstract: A wastewater treatment plant (WWTP) in Guangdong Province with capacity of 12×10^4 m³/d, is required to meet the stricter values of first level criteria in the second period of Guangdong Province local *Discharge Limits of Water Pollutants* (DB 44/26-2001) and of first level A criteria in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). The retrofitting of the WWTP was facing the problem of limited land occupation. The MBBR and magnetic coagulation precipitation process is selected to retrofit the original A²/O process in close combination with the current process facilities. The biochemical tank is embedded with MBBR process in-situ without the need for new construction. In order to ensure the efficient and stable removal of SS and TP, magnetic coagulation precipitation process is adopted in advanced treatment unit to construct with minimal land occupation. After retrofitting, the effluent COD is (15.95 ± 4.16) mg/L, BOD₅ is (4.97 ± 1.40) mg/L, SS is

(7.10±1.68) mg/L, TN is (10.29±2.59) mg/L, TP is (0.17±0.11) mg/L and NH₃-N is (1.24±1.17) mg/L, which are stable and superior to the design effluent standard. The practice shows that the MBBR and magnetic coagulation precipitation process is simple, intensive, stable and efficient, which is applicable to the retrofitting, expansion or new construction of WWTP with limited land occupation.

Key words: MBBR; magnetic coagulation precipitation process; upgrading and retrofitting; nitrogen and phosphorus removal

1 项目概况

1.1 项目背景

广东省某污水厂处理规模为12×10⁴m³/d,采用A²/O微曝氧化沟工艺,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的二级标准。根据环保部等十部委发布的《近岸海域污染防治方案》及广东省发布的《广东省节能减排“十三五”规划》要求,该污水厂所处流域属重点考核流域,需进一步削减向受纳水体的污染物排放量,因此需提升处理标准,提标后出水水质执行广东省《水污染物排放限值》(DB 44/26—2001)第二时段一级标准和国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准中的较严值。设计进、出水水质见表1。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP	SS
设计进水	350	150	30	40	4.5	200
设计出水	40	10	5	15	0.5	10

1.2 现状处理工艺

该污水厂现状工艺流程如图1所示。

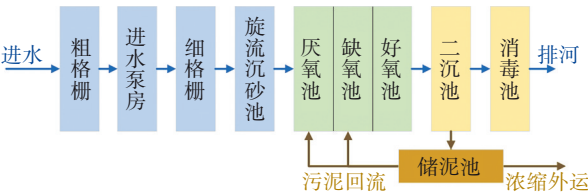


图1 污水处理厂现状处理工艺流程

Fig.1 Current treatment process of the wastewater treatment plant

进水依次通过粗格栅、进水泵房、细格栅及旋流沉砂池后进入A²/O生化处理单元,生化池出水经二沉池沉淀后进行消毒,外排入受纳河流,剩余污泥浓缩脱水后外运至当地垃圾填埋场与城市垃圾

一并处理。

厂区主要构筑物包括:粗格栅及进水泵房、细格栅及旋流沉砂池、A²/O生化池、鼓风机房、二沉池、污泥泵房、储泥池、污泥浓缩脱水车间、消毒池及尾水排放泵房等,各构筑物布置紧凑(见图2),基本无新建用地。

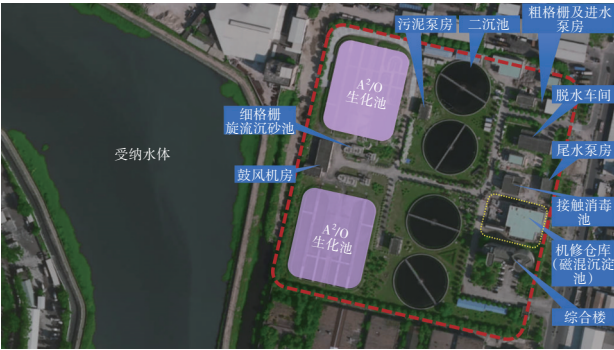


图2 现状污水处理厂整体布局

Fig.2 Current layout of wastewater treatment plant

1.3 现状处理效果与改造要求

该污水厂自2010年投运以来,已运行8年,2018年处理水量为(11.11±0.77)×10⁴m³/d,达到设计值的92.6%,出水水质稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的二级标准。现状设计进、出水水质及2018年全年实际进、出水水质见表2。实际进水氨氮、TN和SS仅达到设计值的60%~70%,其余指标达到设计值的75%~85%,但随着提质增效工作的推进,污水厂进水浓度也在逐步提升。结合目前进水水质情况并充分考虑安全余量,本次设计仍采用原设计进水水质。针对新的排放标准,COD可实现100%达标,但BOD₅的达标率仅为2.47%;氨氮和TN的达标率分别为70.48%和75.06%;TP和SS的达标率分别为74.36%和86.82%。由此可见,本次提标重点是强化脱氮除磷;同时针对现状出水水质波动大的问题,新工艺应考虑具备较强的抗冲击能力;此外,现

状污水厂内构筑物布置紧凑,已基本无可建用地,因此新工艺应具备高效紧凑的特性,且生化工艺应具备原位实施的可能。

表2 现状设计进、出水水质及2018年实际进、出水水质

Tab.2 Current design influent and effluent quality and actual influent and effluent quality in 2018

mg·L ⁻¹						
项 目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP	SS
原设计进水	350	150	30	40	4.5	200
进水最大值	295	140	35.16	59.70	4.15	141
进水最小值	205	13	10.11	15.73	2.41	90
进水平均值	270.84	123.40	14.30	24.70	3.36	113.91
原进水95%保证率	288	134	19.60	34.50	3.92	135
原设计出水	100	30	20		3	30
出水最大值	34	15	19.92	38.88	1.39	28
出水最小值	20	10	4.29	6.55	0.23	8
原出水95%保证率	32	14	12.68	26.28	0.75	22
出水平均值	29.72	12.8	5.82	12.36	0.47	14.86

2 提标改造方案

2.1 对TN、NH₃-N和有机物的去除

该污水厂出水现状执行二级标准,对TN浓度不作要求,改造后处理规模仍维持在 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设计进水TN维持40 mg/L不变,设计出水TN $\leq 15 \text{ mg/L}$,出水氨氮 $\leq 5 \text{ mg/L}$ 。虽然现状运行阶段进水水质低于设计值,但随着配套污水管网的完善及各工业企业的入驻,近几年来实际进水水质浓度已呈现上升趋势,也对本次提标改造提出了更高的要求。对于氨氮的去除,需强化硝化,在不增加用地的情况下,强化硝化的核心是提高好氧区有效菌种即硝化细菌的含量。而对于TN的去除,由于现状出水BOD₅已经超标,继续增大碳源投加量来满足出水TN达标已不可行,因此需要延长缺氧区的停留时间,进而提高总氮的去除量,并同步提高有机物利用率,实现BOD₅和TN的稳定达标。综上,在生化池无新增用地的情况下,需要同时满足强化硝化和反硝化的需求。

近年来,移动床生物膜反应器(MBBR)有效解决了生化池在占地受限条件下脱氮所面临的问题,并在国内获得了广泛的应用^[1-3],2021年4月新发布的《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)也已将MBBR工艺列为应用广泛且运行可靠的工艺之一。该工艺的核心优势在于生化池中原位投加悬浮载体富集生物膜,通过拦截筛网实现微生物专性培

养,在悬浮载体流化的过程中,实现了微生物的高效富集和动态更新^[4],实现了微生物的“量变”和“质变”。有研究显示,生物膜对于硝化细菌的富集能力是活性污泥的10倍以上^[5]。MBBR工艺能够与现有工艺充分结合,实现原池升级,同时,由于好氧MBBR区高效的硝化效果,为缺氧区池容的扩大提供了条件。通过切割好氧区改造为缺氧区,延长缺氧区停留时间,好氧区投加悬浮载体形成MBBR区的形式,可实现生化池同时强化硝化和反硝化效果^[6]。如佛山某污水处理厂原工艺为A²/O微曝氧化沟工艺,采用MBBR工艺对生化池进行原池改造,未新增生化池用地,改造后出水稳定达到排放标准^[7]。因此,本项目采用MBBR工艺进行生化池的原池改造。

2.2 对TP和SS的去除

项目改造前,以生化除磷为主,出水TP达到0.5 mg/L尚有难度,所以需要增加化学除磷工艺实现TP的稳定达标。由于厂内未规划预留提标用地,且现状构筑物布置紧凑,故本次提标改造拟拆除现有维修车间、新建深度处理单元,根据实际可用有效面积核算沉淀池的表面负荷约 $20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,因此需综合考虑深度处理单元的处理效果与占地情况。高效沉淀池虽然应用广泛,但《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)给出的设计表面负荷一般为 $6 \sim 13 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,不满足本项目需求,所以在此基础上寻求加载沉淀技术,以获得更大的水力负荷。

磁混凝沉淀工艺是在污泥循环加载型沉淀技术的基础上投加磁粉,微细的磁粉颗粒作为沉淀析出晶核,使得水中胶体颗粒与磁粉颗粒更容易碰撞脱稳而形成絮体,可大大提高悬浮物的去除效率,超高比重磁粉也使得絮体密度远大于常规混凝絮体,从而大幅提高沉淀速度,占地极低,仅为传统沉淀池的30%左右;磁混凝反应池内污泥浓度较高,原水污泥浓度变化不影响磁混凝系统正常运行,抗冲击能力强^[8]。由于本项目可用地面积极少,表面水力负荷高,且出水TP和SS浓度要求高,在极小占地条件下磁混凝沉淀工艺可以较好实施,因此本次改造选用磁混凝沉淀工艺作为深度处理工艺,以实现TP和SS的稳定去除,同时由于磁混凝沉淀池出水浊度低,可省去后续过滤工艺,进一步节省占地与成本。

2.3 改造工艺路线

改造后工艺流程如图3所示。

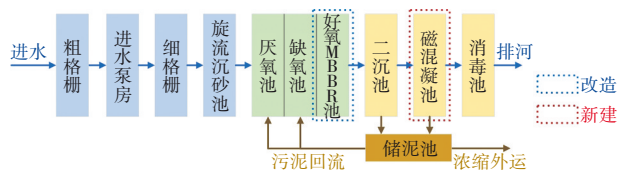


图3 改造后工艺流程

Fig.3 Flow chart of treatment process after retrofitting

进水依次通过粗格栅、进水泵房、细格栅及旋流沉砂池后进入A²/O生化处理单元,其中生化段通过切割好氧池容补足缺氧需求,并在好氧池投加悬浮载体形成好氧MBBR区,满足硝化需求,生化池出水经二沉池沉淀后进入磁混凝系统进一步去除SS及TP,以实现全指标达标,出水消毒后外排入受纳河流,剩余污泥浓缩脱水后外运处理。

3 工艺设计

3.1 现状处理设施

本次提标改造维持处理规模 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 不变,主要进行生化池原位改造和深度处理单元新建,其余部分构筑物及设备已按照该处理规模建设,可进行充分利旧使用。

① 粗格栅。1座,设计流量 $0.94 \text{ m}^3/\text{s}$,过栅流速 0.8 m/s ,栅条间距 20 mm 。设有机械粗格栅2台,格栅宽 1.4 m 。

② 进水泵房。旱季平均流量 $2500 \text{ m}^3/\text{h}$ 、高峰流量 $3385 \text{ m}^3/\text{h}$,配水泵4台,其中 $Q=1950 \text{ m}^3/\text{h}$ 两台,1用1备, $Q=950 \text{ m}^3/\text{h}$ 两台,两用。

③ 细格栅。2座,单座设计规模 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设计过栅流速 0.8 m/s ,栅条间隙 5 mm ,采用循环齿耙式细格栅除污机2套,电机功率 1.5 kW 。

④ 旋流沉砂池。2座,单座设计规模为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,最大设计流量 $4100 \text{ m}^3/\text{h}$,表面负荷 $86.4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。配空压机3台,单台风量 $2 \text{ m}^3/\text{min}$,风压 60 kPa ,2用1备;砂水分离器1台, $N=0.37 \text{ kW}$ 。

⑤ 鼓风机房。1座,选用国外进口悬浮式单级高速离心鼓风机,共设5台,其中大机组3台,单台风量 $163 \sim 194 \text{ m}^3/\text{min}$,压差 $0.05 \sim 0.07 \text{ MPa}$,电机功率 225 kW ,2用1备;小机组2台,单台风量 $108.5 \sim 140 \text{ m}^3/\text{min}$,压差 $0.05 \sim 0.07 \text{ MPa}$,电机功率 150 kW ,2用。设计最大供气量 $29000 \text{ m}^3/\text{h}$,设计平均供气量 $21000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

⑥ 污泥泵房。2座,单座污泥泵房设污泥回流泵4台,单泵流量 $610 \sim 750 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $45 \sim 70 \text{ kPa}$,轴功率 18.5 kW ;剩余污泥泵2台,单泵流量 $23 \sim 34 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $70 \sim 100 \text{ kPa}$, $N=1.5 \text{ kW}$ 。单池剩余污泥总量 6300 kg/d ,含水率 99.3% ,流量 $900 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

⑦ 辐流式二沉池。4座,池内径 50 m ,有效水深 3.5 m ,污泥区高 0.5 m ,超高 0.4 m ,总高度 4.4 m 。设计流量 $6500 \text{ m}^3/\text{h}$,沉淀时间 4.1 h 。

⑧ 接触消毒池。1座,尺寸(长 \times 宽 \times 高)为 $33.8 \text{ m} \times 24.55 \text{ m} \times 4.9 \text{ m}$,有效水深 4.5 m ,设计流量 $6500 \text{ m}^3/\text{h}$,接触消毒时间 0.5 h 。

3.2 生化池改造

现状A²/O生化池共计4座,单座尺寸(长 \times 宽 \times 高)为 $85.0 \text{ m} \times 31.4 \text{ m} \times 6.8 \text{ m}$,有效水深 6.0 m ,单座平均流量 $1250 \text{ m}^3/\text{h}$,污泥浓度 3.5 g/L ,总停留时间 11 h ,其中厌氧池停留时间 1.3 h ,单座有效容积 1625 m^3 ;缺氧池停留时间 1.6 h ,单座有效容积 2000 m^3 ;好氧池停留时间 8.1 h ,单座有效容积 10125 m^3 。总污泥龄 14 d ,好氧区污泥龄 11 d ,气水比 $4.2:1$,内回流比 200% 。厌氧池设水下推进器2台, $N=4.3 \text{ kW}$,叶轮直径 2.5 m ,缺氧池设水下推进器2台, $N=5.0 \text{ kW}$,叶轮直径 2.5 m ,好氧池设水下推进器6台, $N=5.0 \text{ kW}$,叶轮直径 2.5 m 。好氧池配备进口管膜式微孔曝气器912个,出气量 $6 \sim 9 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$ 。好氧池设循环泵3台, $Q=880 \text{ m}^3/\text{h}$, $N=5.5 \text{ kW}$ 。

将现有A²/O工艺改造为“A²/O+MBBR”工艺后,保持原工艺运行方式不变,保留现有厌、缺氧池的池容不变,分割好氧池容 7429 m^3 改造为缺氧池(见图4),优先满足反硝化脱氮所需池容,同时强化对有机物的去除。改造完成后,实际缺氧区HRT延长至 3.09 h 。剩余池容作为好氧池,并在好氧池中设置MBBR区,投加悬浮载体,强化好氧有机物和氨氮去除效果。4组MBBR池投加SPR-Ⅲ型悬浮载体。悬浮载体直径 25 mm ,高度 10 mm ,有效比表面积 $>800 \text{ m}^2/\text{m}^3$,密度约 $0.94 \sim 0.97 \text{ g/cm}^3$,挂膜后密度接近于水,材质为HDPE,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。好氧MBBR池采用微动力混合池,无需设置推流搅拌器。

更换管膜式微孔曝气器共计 3800 个,曝气量为 $8 \text{ m}^3/(\text{个} \cdot \text{h})$ 。拆除原好氧池24台推流器,重新在

好氧池非 MBBR 区安装 12 台推流器,在新增缺氧池另新增 4 台推流器,叶轮直径 2.5 m,功率 3.5 kW。MBBR 池进、出水端设置进出水拦截系统,确保填料流化不流失。

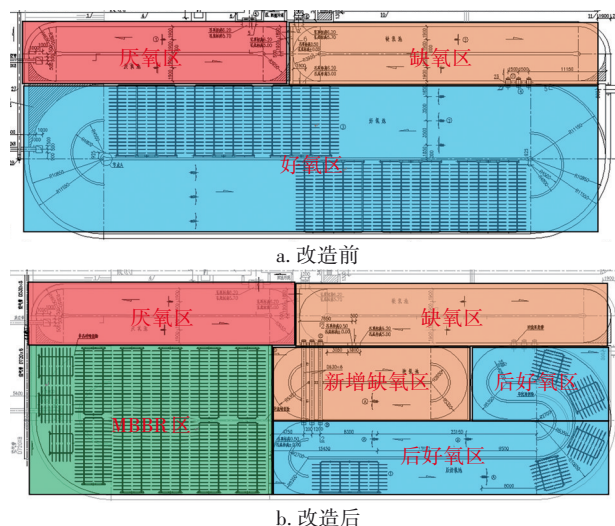


图4 改造前、后生化池池容分配

Fig.4 Capacity distribution of biochemical section before and after retrofitting

3.3 新建磁混凝沉淀池

拆除原机修仓库,新建磁混凝沉淀池。磁混凝沉淀池尺寸为 $30.1\text{ m}\times 30.7\text{ m}\times 6\text{ m}$ 。共设2组,每组设3座反应池、1座沉淀池、1套磁粉回流回收系统。反应池包括快混池(尺寸 $3.2\text{ m}\times 3.2\text{ m}\times 6\text{ m}$,HRT=44 s)、磁混池(尺寸 $3.2\text{ m}\times 3.2\text{ m}\times 6\text{ m}$,HRT=44 s)、絮凝池(尺寸 $4.5\text{ m}\times 4.5\text{ m}\times 6\text{ m}$,HRT=87 s)。沉淀池采用上方下圆单泥斗形式,并附设配套刮泥机,内径13 m,设计表面负荷 $19.93\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,峰值表面负荷约 $25.91\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。一部分污泥直接回流到磁混池,可大幅减少药剂用量,另一部分剩余污泥经过磁粉回收后排至剩余污泥脱水系统。共设置回流污泥泵3台(2用1备),流量 $165\text{ m}^3/\text{h}$,扬程80 kPa,功率11 kW,变频控制,剩余污泥泵3台(2用1备),流量 $30\text{ m}^3/\text{h}$,扬程80 kPa,功率5.5 kW,变频控制。磁粉回收系统包括高剪机和磁分离机,处理量 $100\text{ m}^3/\text{h}$,功率4 kW。高剪机将磁粉与污泥的混合絮体打散,使磁粉通过磁分离机回收,返回混凝反应池,经过磁粉回收后的剩余污泥至污泥脱水系统处理后外运处置。

3.4 新建化学除磷药剂投加系统

聚合氯化铁(PFC)投加系统:共设置2格溶液

池,单格尺寸为 $2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}\times 3.4\text{ m}$,各设溶药搅拌机1台, $N=0.75\text{ kW}$;计量泵4台,3用1备,单台 $Q=500\text{ L/h}$, $P=0.5\text{ MPa}$, $N=0.75\text{ kW}$ 。

PAM投加系统:PAM计量泵4台,2用2备,单台计量泵 $Q=2\,500\text{ L/h}$, $P=0.40\text{ MPa}$, $N=1.5\text{ kW}$ 。

3.5 新建二级提升泵房

为减少深度处理构筑物埋深,确保尾水尽量自流,新建二级提升泵房1座,尺寸为 $11.7\text{ m}\times 11.6\text{ m}\times 5.3\text{ m}$,设计最大流量 $6\,500\text{ m}^3/\text{h}$,扬程45 kPa。配水泵5台,单台流量 $1\,625\text{ m}^3/\text{h}$,扬程45 kPa,功率30 kW,4用1备。

3.6 加氯间设备更换

考虑出水标准提升对出水粪大肠菌群数要求更高以及远期强化色度去除需要,提高了系统投氯量,现有设备无法满足投药需求,因此对加氯间设备进行更换,拆除现状二氧化氯发生器,更换为 $Q=20\text{ kg/h}$ 的二氧化氯发生器,共计4台,3用1备。

4 改造效果

本项目于2019年7月开始进行改造,至2020年11月完成调试验收。随着提质增效工作的推进以及工业企业的入驻,改造后进水水质较改造前有了较大幅度的变化,改造后稳定运行一年的进、出水水质如表3所示,处理水量基本达到设计值($12\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$)。

表3 改造后进、出水水质

Tab.3 Influent and effluent quality after retrofitting
 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项 目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP	SS
现设计进水	350	150	30	40	4.5	200
进水最大值	440	204	65.2	74.5	16.45	416
进水最小值	134	57	5.96	14.71	1.14	60
进水平均值	252.67	104.12	20.98	28.74	5.62	192.85
进水95%保证率	335	155	34	41.2	9.66	304
现设计出水	40	10	5	15	0.5	10
出水最大值	31	8.6	4.94	14.59	0.47	10
出水最小值	6	2	0.03	4.39	0.02	4
出水平均值	15.95	4.97	1.24	10.29	0.17	7.10
出水95%保证率	23	7.5	4.05	14.16	0.41	9

4.1 改造后系统对COD和BOD₅的处理效果

改造后系统对COD及BOD₅的处理效果见图5。本项目由于改造前出水COD浓度已基本满足出水标准,因此COD不是本次改造的难点。如图5所示,改造后进水COD较改造前降低约20 mg/L,出水

COD 为 (15.95 ± 4.16) mg/L, 稳定达到出水排放标准, 去除率均值为 92.51%。改造后 BOD₅ 去除效果有明显改善, 缺氧区池容的增大有利于 BOD₅ 的利用, 改造前出水 BOD₅ 新标准达标率仅为 2.47%, 而改造后出水 BOD₅ 为 (4.97 ± 1.40) mg/L, 去除率均值为 95.04%, 达标率为 100%。

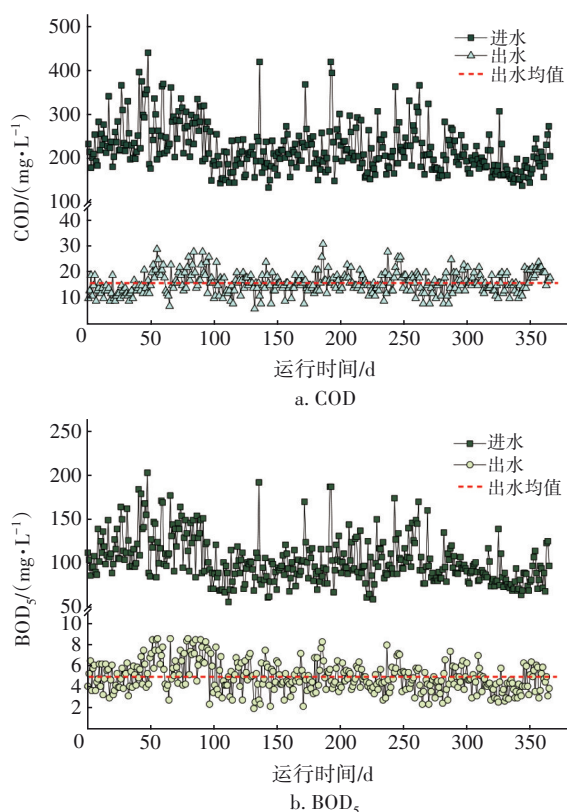


图5 改造后系统对 COD 及 BOD₅ 的处理效果

Fig.5 COD and BOD₅ removal efficiency after retrofitting

4.2 改造后对 NH₃-N 和 TN 的处理效果

改造后系统对 NH₃-N 和 TN 的处理效果如图 6 所示。改造前进水 NH₃-N 为 (14.30 ± 2.86) mg/L, 出水 NH₃-N 为 (5.82 ± 3.93) mg/L, 新标准达标率为 70.48%, 改造后进水 NH₃-N 为 (20.98 ± 6.51) mg/L, 出水 NH₃-N 为 (1.24 ± 1.17) mg/L, 出水达标率为 100%。改造后, 进水 NH₃-N 较改造前提高 6.5 mg/L 左右, 且好氧池池容切割 18.34% 改造为缺氧池, 但系统对 NH₃-N 的去除效果明显优于改造前, 在面临进水 NH₃-N 最高达到 65.2 mg/L 时依然能够保证出水达标, 抗冲击性能显著增强。主要原因在于改造后生化池镶嵌了 MBBR 工艺, 通过悬浮载体的投加, 为长泥龄的硝化细菌提供了可以附着生长的载体, 提高了其富集效率, 生化段出水即可实现 NH₃-N 的

稳定达标。分别取悬浮载体生物膜和同系统活性污泥进行高通量测序, 结果表明, 生物膜上硝化菌相对丰度为 6.49%, 而活性污泥仅为 1.03%。因此本项目改造时虽然减少了好氧池的池容, 但在悬浮载体的加持下硝化效果得以大幅提升, 并且系统具有较强的抗冲击能力, 保障了出水 NH₃-N 稳定达标。

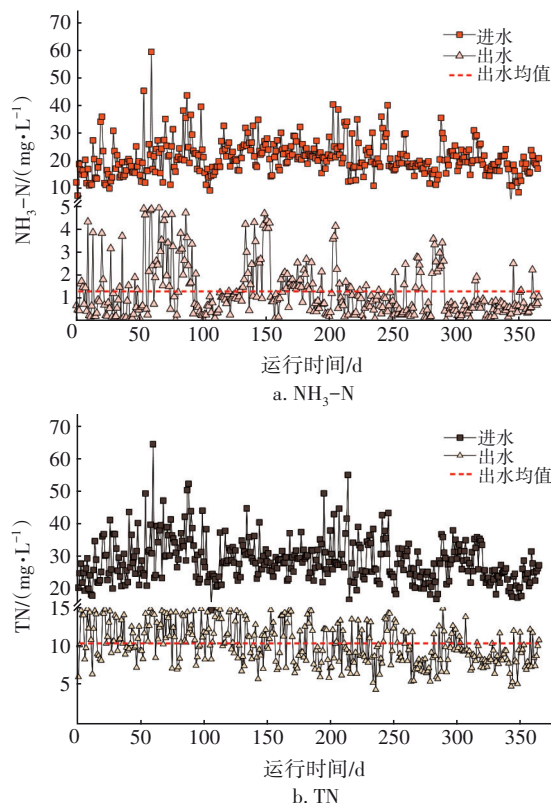


图6 改造后系统对 NH₃-N 及 TN 的处理效果

Fig.6 NH₃-N and TN removal efficiency after retrofitting

改造前进水 TN 为 (24.70 ± 3.68) mg/L, 出水 TN 为 (12.36 ± 5.67) mg/L, 新标准达标率为 75.06%, 改造后进水 TN 为 (30.74 ± 6.79) mg/L, 出水 TN 为 (10.29 ± 2.59) mg/L, 出水达标率为 100%。改造后内回流比保持 200% 不变, 进水 TN 较改造前提高约 6 mg/L, 出水 TN 反而降低约 2 mg/L, 且出水浓度更加稳定。硝化效果的大幅提升为缺氧池 TN 去除提供了基础, 同时, 改造后缺氧池的池容增加近一倍, 停留时间的延长也保证了 TN 的稳定去除, 生化段出水已实现 TN 的稳定达标。同时, 改造后在好氧区存在 TN 去除现象, 去除量约 1.5 mg/L, 占总去除量的 5%~7%, 在利用 MBBR 进行改造的工艺中, 好氧 MBBR 区常会出现同步硝化反硝化 (SND) 现象,

这主要是由于悬浮载体生物膜出现了功能菌分置现象,外层富集好氧硝化菌,而内层存在厌/缺氧微环境,会富集反硝化菌,利用内碳源进行反硝化作用,强化了对TN的去除。

4.3 改造后系统对SS和TP的处理效果

改造后系统对SS及TP的处理效果如图7所示。

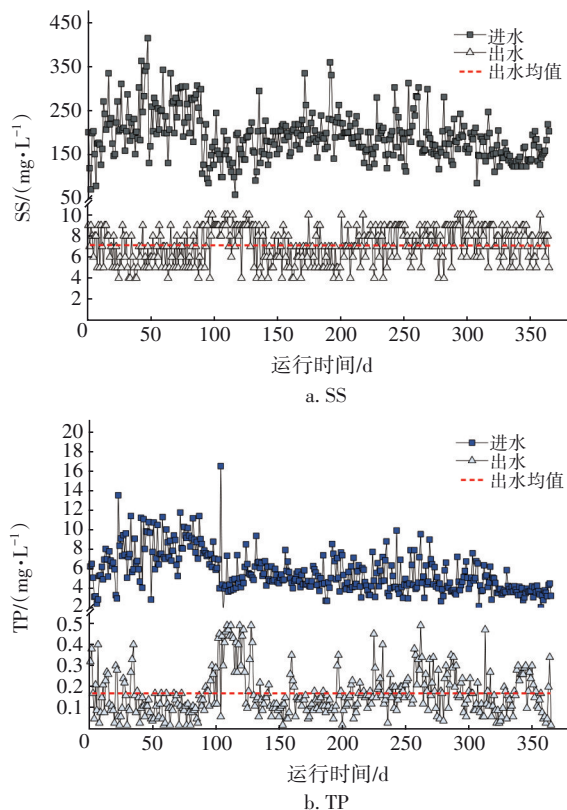


图7 改造后系统对SS及TP的处理效果

Fig.7 SS and TP removal efficiency after retrofitting

磁混凝沉淀工艺的使用,保证了出水SS的稳定达标。改造前进水SS为 (113.91 ± 13.29) mg/L,出水SS为 (14.86 ± 3.65) mg/L,新标准达标率为86.82%,改造后进水SS为 (192.85 ± 55.07) mg/L,出水SS为 (7.10 ± 1.68) mg/L,达标率为100%。改造后进水SS较改造前提高约69.30%,且波动性较大,但出水浓度较改造前明显降低,二沉池出水SS一般保持在30 mg/L以下,但受水量波动影响,二沉池出水SS最高达到约90 mg/L,磁混凝沉淀池出水SS仍可保持在10 mg/L以下,磁混凝沉淀工艺提高了深度处理单元应对SS冲击的能力,实现了稳定达标。

改造前进水TP为 (3.36 ± 0.32) mg/L,出水TP为 (0.47 ± 0.24) mg/L,新标准达标率为74.36%,改造后进水TP提高至 (5.62 ± 2.13) mg/L,出水TP为

(0.17 ± 0.11) mg/L,虽然进水TP大幅提高67.26%,但出水TP较改造前有明显降低,且更加稳定。磁混凝沉淀工艺的加载使得系统对TP的去除效率有了大幅提升,且除磷稳定性提高。由于磁混凝沉淀工艺对SS和TP具有良好的处理效果,出水可稳定优于一级A标准,因此本项目后续未设置滤池等过滤工艺,进一步节省了占地及投资运行费用。

4.4 经济分析

本项目建设总投资为7 073.34万元,稳定运行期间运行电耗为 $0.25 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,较改造前提高约15%,主要是由于进水基质浓度及出水标准提高,风机风量随之提高且新增了深度处理单元,增加了电耗。剩余污泥量为 (46.48 ± 9.22) t/d,与改造前基本一致。磁混凝沉淀池混凝剂PFC投加量为 (4.44 ± 0.81) t/d,絮凝剂PAM投加量为 (0.15 ± 0.02) t/d,磁粉投加量为 (0.06 ± 0.01) t/d,药剂投加费用为 $0.05 \text{ 元}/\text{m}^3$,综合处理费用为 $0.24 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

5 结论

本项目采用“MBBR+磁混凝沉淀工艺”紧密结合现状工艺设施对原有A²/O工艺进行改造,生化池原位镶嵌MBBR工艺,无需新建构筑物,仅进行池容的重新分配即可满足同时强化硝化反硝化的需求。深度处理单元采用磁混凝沉淀工艺,在极小占地条件下完成实施,保证了SS和TP的高效稳定去除。改造后出水COD为 (15.95 ± 4.16) mg/L、BOD₅为 (4.97 ± 1.40) mg/L、SS为 (7.10 ± 1.68) mg/L、TN为 (10.29 ± 2.59) mg/L、TP为 (0.17 ± 0.11) mg/L、NH₃-N为 (1.24 ± 1.17) mg/L,出水水质稳定优于设计出水标准,改造后较改造前进水水质浓度提高且不稳定,但出水仍可稳定达标。

“MBBR+磁混凝沉淀工艺”工艺流程简洁,在节省占地基础上提高了污染物的去除能力及抗冲击负荷的能力,适用于占地受限型污水处理厂的改扩建或新建。

参考文献:

- [1] 周家中,宋平周,张爽,等. 占地受限下北方某高标准新建污水厂工程设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 76-82.
ZHOU Jiazhong, SONG Pingzhou, ZHANG Shuang, et al. Engineering design of a new high-standard wastewater treatment plant with limited footprint area in

- north China[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12):76-82(in Chinese).
- [2] 郭莉芳,朱宇峰,滕良方,等. MBBR用于南方某污水厂强化脱氮效果分析[J]. 中国给水排水,2020,36(7):101-107.
- GUO Lifang, ZHU Yufeng, TENG Liangfang, et al. Analysis of denitrification efficiency of a wastewater treatment plant in south China enhanced by MBBR[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(7):101-107(in Chinese).
- [3] 郑志佳,连来喜,刘彦华,等. MBBR+磁混凝用于CAST工艺升级改造的效果分析[J]. 中国给水排水,2020,36(1):7-12,17.
- ZHENG Zhijia, LIAN Laixi, LIU Yanhua, et al. Upgrading and reconstruction of CAST process by MBBR and magnetic coagulation process [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(1):7-12,17(in Chinese).
- [4] 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 Jiazhong, WU Di, ZHENG Lin'ao. Engineering application of pure MBBR process at home and abroad [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22):37-47(in Chinese).
- [5] 韩文杰,吴迪,周家中,等. 长三角地区MBBR泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析[J]. 环境科学,2020,41(11):5037-5049.
- HAN Wenjie, WU Di, ZHOU Jiazhong, et al. Microbial diversity analysis of WWTPs based on hybrid-MBBR process in a low temperature season in the Yangtze River Delta[J]. Environmental Science, 2020, 41(11):5037-5049(in Chinese).
- [6] 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).
- [7] 夏超,吴志京,郑临奥,等. MBBR用于A²/O微曝氧化沟工艺提标改造设计与运行[J]. 市政技术,2020,38(3):238-242.
- XIA Chao, WU Zhijing, ZHENG Lin'ao, et al. Design and operation of the MBBR for upgrading A²O micro aeration oxidation ditch process [J]. Municipal Engineering Technology, 2020, 38(3):238-242(in Chinese).
- [8] 施园. 磁混凝澄清工艺在污水厂提标中的应用[J]. 水处理技术,2018,44(11):136-137,140.
- SHI Yuan. Application of magnetic coagulation precipitation technology in reconstruction of wastewater treatment plant [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(11):136-137,140(in Chinese).
- 作者简介:**沈浩(1983-),男,河南洛阳人,硕士,工程师,主要研究方向为水污染控制,曾获广东省土木建筑学会科学技术奖一等奖。
- E-mail:**znszyst@vip.sina.com
- 收稿日期:**2022-01-28
- 修回日期:**2022-03-12

(编辑:衣春敏)

加强湖泊管理保护
改善湖泊生态环境
维护湖泊健康生命