

MBBR 工艺在污水处理厂提量增效中的应用

路 晖, 辛 涛, 吴 迪, 张晶晶

(青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266500)

摘 要: 采用 MBBR 对某污水厂扩容 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 改造后污水处理规模达到 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 改造时, 保持厌氧缺氧区不变, 好氧区采用两级 MBBR、微动力混合池型, 强化系统抗冲击能力; 好氧区投加 SPR-3 型填料; 同时将二沉池改建为高效沉淀池, 新增转鼓过滤。改造后水量提升 20%, 出水水质稳定达到一级 A 标准, 优化运行后可达到地表水准 IV 类水质; 生化池出水 TN 均值为 10.40 mg/L , TN 去除率为 83.50%, 好氧段可去除 TN $6 \sim 10 \text{ mg/L}$; 生化池出水 TP 为 0.43 mg/L , TP 去除率为 93%, 缺氧段发生显著的 TP 去除现象, 在高效沉淀池投加铁盐絮凝剂后, 出水 TP 可降到 0.30 mg/L 以下; 系统内同步硝化反硝化 (SND) 及反硝化除磷菌 (DPB) 的出现, 实现了碳源限制下的同步强化脱氮除磷, 未投加碳源情况下 TN 和 TP 稳定达标, 通过 SND 途径去除 TN 贡献率为 13.20%, 通过 DPB 途径去除 TP 贡献率为 88%, 实现了节能降耗。

关键词: 移动床生物膜工艺; 扩容; 反硝化除磷菌; 同步硝化反硝化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)04-0100-06

Application of MBBR in Increasing Capacity and Improving Efficiency of a Wastewater Treatment Plant

LU Hui, XIN Tao, WU Di, ZHANG Jing-jing

(Qingdao Spring Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266500, China)

Abstract: A WWTP was scaled up to $120\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ by MBBR, increasing capacity of $20\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ in situ. The anoxic and aerobic zones was kept unchanged. Two-stage MBBR with micro-power mixing tank and SPR-3 carrier was used in aerobic zone to enhance impact resistance ability. Secondary sedimentation was upgraded to high density sedimentation tank and rotary filter was added at the same time. After retrofitting, water quality increased 20% and the effluent stably achieved the first level A criteria in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002), and even level quasi IV in *Environmental Quality Standard for Surface Water* (GB 3838-2002) after optimized operation. Effluent TN of biological tank was 10.40 mg/L by average and TN removal efficiency was 83.50%. About $6 \sim 10 \text{ mg/L}$ of TN was mainly removed in aerobic zone. Effluent TP of biological tank was 0.43 mg/L by average and TP removal efficiency was 93% which mainly occurred in anoxic zone. After adding iron salt flocculants in high density sedimentation tank, effluent TP of WWTP dropped to less than 0.30 mg/L . The presence of SND and DPB in the system enabled simultaneous enhanced nitrogen and phosphorus removal under carbon source constraints, and stable TN and TP

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07106005-04); 青岛市民生科技计划项目(18-6-1-100-nsh)

通信作者: 吴迪 E-mail: hitwudi@126.com

compliance when carbon sources were not added. TN removal rate through SND pathway accounted for 13.20% and TP removal rate through DPB pathway accounted for 88%, achieving energy saving and consumption reduction.

Key words: MBBR; increasing capacity; DPB; SND

随着城市化进程的不断加快,城市人口及用水量逐步增大,很多城市污水厂面临负荷饱和和需要提量的问题,解决方案包括原厂址内提量、择地新建增量污水厂、全部拆迁扩建等。与新建或扩建相比,原厂提量无疑是最优选择,投资省、见效快。污水厂最大亦是核心的处理构筑物即生化池,具有很大提量空间,尤其是移动床生物膜反应器(MBBR)、膜生物反应器(MBR)等工艺在国内广泛应用后,更增加了多种技术选择,能够实现原池提量。不论是 MBBR 还是 MBR,核心技术思路均为提高生物量,提高处理负荷,强化处理效果,且各具优势,需要具体项目具体分析。

华东某污水厂扩容提效项目以 MBBR 为核心,实现原厂提量 20%,可为国内具有类似需求污水厂改造提供技术参考。

1 项目背景

1.1 项目概况

该污水厂占地约 7 hm² (104 亩),历经四期工程建设。一期设计处理能力为 2.5 × 10⁴ m³/d,采用三沟式氧化沟工艺,于 1995 年建设,1999 年投入运营;二、三期工程设计处理能力均为 3 × 10⁴ m³/d,采用 A/A/O 工艺,分别于 2006 年、2008 年初建设,二期工程 2007 年投入运营,三期工程 2009 年 1 月投入运营;2012 年实施的四期工程为已建工程的改扩建,将一期工程规模扩建至 4 × 10⁴ m³/d,扩建后总处理规模达到 10 × 10⁴ m³/d,出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。

近几年,随着城区的企业、居民增加和排污管网的完善,污水排放量也不断增加,该污水厂现有规模及处理能力已不能满足城区污水量增长的需要,因此拟根据污水量增长的情况对现状污水处理厂采用 MBBR 工艺进行原池扩容改造,扩容后规模为 12 × 10⁴ m³/d,出水水质仍满足一级 A 标准,并保留水厂再次提标的可能性。

设计进、出水水质如表 1 所示。各期水量及池容如表 2 所示。

表 1 升级改造设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

mg · L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	氨氮	SS	TN	TP
进水	650	350	50	300	75	8
出水	50	10	5	10	15	0.5

表 2 各期水量及池容

Tab. 2 Water intake and tank capacity

项目	设计水量/ (10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)	厌氧池 池容/m ³	好氧池 容/m ³	总池容/ m ³
二期	3	12 870	12 402	25 272
三期	3	12 870	12 402	25 272
四期	4	16 228	18 572	34 800

1.2 改造难点

本项目的改造难点包括:

① 原厂区内提量,水量从 10 × 10⁴ m³/d 增加到 12 × 10⁴ m³/d,厂内已无生化池扩建用地,污水厂两边临海,另两边为居民区,无法扩建。

② 进水水质波动较大,与当地季节有关,旅游季节人口增加,水质浓度也随之变化较大。

③ 工期紧,污水厂已超负荷运行,出水因超负荷波动,对环境有较大压力。

④ 在提高处理水量的同时应保留未来进一步提升至地表准Ⅳ类水的可能性。

2 方案设计与系统调试

2.1 技术方案

初步确定在 MBR 与 MBBR 方案中进行比选。

MBR 方案,即对现有四期生化池进行改造,使其处理能力由 4 × 10⁴ m³/d 提高至 6 × 10⁴ m³/d,总处理能力达到 12 × 10⁴ m³/d。MBR 方案采用 A/A/O + MBR 的组合,工艺成熟、稳定、可靠,同时结合膜分离技术,其占地小、流程较短、耐水质冲击、出水稳定可靠、控制管理方便,能够保证出水水质稳定达标,出水可以直接成为多种用途的回用水源。但需要新建曝气设备间且安装整套膜处理设备,整个项目投资为 570.8 元/m³。同时 MBR 工艺的运行需要较高的曝气,且需要定期冲洗,所以运行成本相对较高,单位处理成本 > 1.5 元/m³。MBR 直接与生

物处理工艺相结合对膜的寿命影响也较大,更换成本较高。采用 MBR 方案,需对膜设备间、新曝气系统、二沉池出水管线进行改造,施工周期为 45 d。

MBBR 方案,即对现有二级处理设施进行改造,二期、三期、四期增加处理能力,总处理规模增加 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。MBBR 方案工艺成熟,目前国内应用超过 $800 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,已在无锡芦村^[1]、青岛团岛^[2]等项目中应用。在提量方面,已在山东兖州^[3]、青岛李村河^[4-5]、崇福污水厂等应用,处理效果较好。综合考虑二、三期二沉池运行情况,MBBR 方案运行管理简单,核心组件 15 年不需要更换,运行成本较低。整个项目投资为 500 元/ m^3 ,单位处理成本为 1.03 元/ m^3 。MBBR 方案需对生物池进行部分改造,对二沉池进行改造,施工周期为 40 d。

结合该污水处理厂现有条件,综合考虑用地、处理效果、投资及运行等因素,MBBR 方案先进、可靠、稳定,因此采用 MBBR 工艺作为本次扩容工程的处理工艺。

2.2 改造方案

本项目最终的工艺流程如图 1 所示。

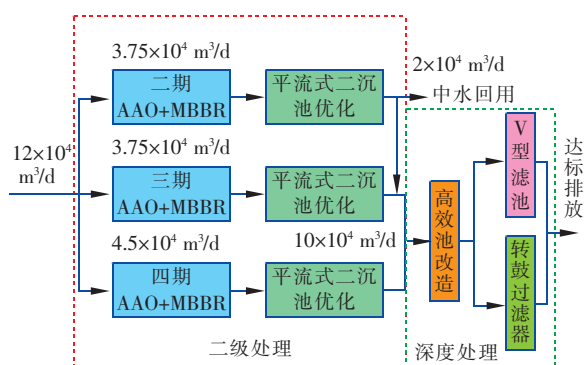


图1 扩容后工艺流程

Fig.1 Process flow diagram after expansion

改造方案主要包括 5 部分:

① 提量水量分配,对增加的 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的水量,其中二、三期设施各增加 $7500 \text{ m}^3/\text{d}$,四期设施增加 $5000 \text{ m}^3/\text{d}$,生化池的改造在原池基础上进行,将原 A/A/O 工艺的 O 段镶嵌入 MBBR 工艺,满足提量要求,强化处理效果,提高系统稳定性。

② MBBR 功能区设计,为了尽可能缩短工期,在改造过程中厌氧区保持不变,把原缺氧区和好氧区的前 40% 部分变为缺氧区;好氧区采用两级 MBBR 设计,采用微动力混合池型,强化系统抗冲击能力,且实际运行过程中可以根据氨氮和总氮的去

除情况,灵活调控第一级 MBBR 区溶解氧,实现同步硝化反硝化(SND),平衡氨氮和总氮处理效果;选用 SPR-3 型填料,有效比表面积为 $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$,符合《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体填料》(CJ/T 461—2014)行业标准^[6],具有水力特性好、能耗低、使用寿命长等优点;设计时考虑今后进一步提标的可能性,控制填充率 $< 45\%$,为今后的提标留有余地。

③ 二沉池改造,考虑提量后二沉池表面负荷增大的影响,对二、三、四期平流沉淀池采取增加水力挡板和集水槽优化等措施,改造刮吸泥设备。

④ 高效沉淀池改造,新增混合区,将原有混合区改为絮凝区,混合和絮凝设备重新优化选型,对加药和回流位置进行优化调整。增加絮凝时间,使其处理能力达到 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,沉淀区尺寸为 $29.73 \text{ m} \times 31.10 \text{ m}$,混合时间为 1 min,絮凝沉淀时间为 8 min,上升流速为 15.30 m/h 。

⑤ 新增转鼓过滤器。现有 V 型滤池尺寸为 $30 \text{ m} \times 38 \text{ m}$,设计规模为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,滤料采用石英砂均质滤料,有效粒径 d_{10} 为 $0.9 \sim 1.2 \text{ mm}$,不均匀系数 $K_{80} \leq 1.4$,滤料厚度为 1.20 m ,滤速为 5.97 m/h ,运行时间为 175 min。反冲洗时间为 25 min;考虑到水厂现有空地及工期问题,选用转鼓过滤器对高效沉淀池出水进行过滤,去除 SS,设计进水量为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出水 $\text{SS} \leq 10 \text{ mg/L}$ 。

2.3 系统调试

调试初期,系统受到冲击,进水 COD 和氨氮远高于设计值。调试分为两个阶段:第一阶段使系统恢复正常,第二阶段填料挂膜。其中,填料挂膜关键是调节好填料的流化状态,根据出水情况逐步提升水量,控制 MBBR-1 区溶解氧为 $2 \sim 3 \text{ mg/L}$,控制 MBBR-2 区溶解氧为 $3 \sim 4 \text{ mg/L}$,外回流比为 100%,内回流比为 200%,系统恢复正常后经过约 30 d 的调试运行,水量达到设计值($12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),稳定运行。

3 运行效果及分析

3.1 系统的 COD 和氨氮处理效果

调试初期(1~4 d)进水 COD 远高于设计值,约为 $800 \sim 1000 \text{ mg/L}$,疑似部分垃圾渗滤液进入污水管线,正常条件下(5~100 d)生物池进水 COD 均值为 600 mg/L ,生化系统对 COD 去除效果如图 2 所示。调试初期,考虑到系统受到冲击,加大排泥量,

及时将受到冲击的污泥排出系统,促进新的活性污泥的生长。生化系统降解 COD 的变化规律分为 3 个阶段:第一阶段是系统恢复期(5~22 d),出水 COD 均值为 42.48 mg/L;第二阶段为系统恢复后(22~52 d),生物池出水 COD 均值为 28 mg/L;第三阶段为填料成熟后(52~100 d),生物池出水 COD 均值为 22 mg/L。填料挂膜后出水 COD 比之前降低 21.40%,分析原因可能是随着好氧池填料的投加,某些污泥龄较长的专性菌种在填料上富集,提高了 COD 的去除效果。

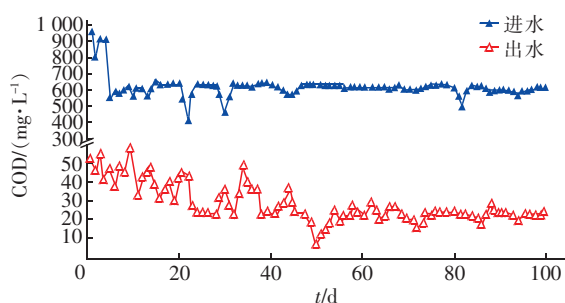


图 2 生化系统对 COD 的去除效果

Fig. 2 COD removal by biological system

调试初期,生化系统已遭受进水冲击,进水 COD 和氨氮远超设计值,出水波动严重。系统恢复后,水质波动仍然存在,进水氨氮最大值为 72.00 mg/L、最小值为 35.00 mg/L、均值为 53.30 mg/L,超出设计值,但出水水质已经达标,并且随着填料上生物膜的成熟,出水氨氮降低到 1.00 mg/L 以下。生化系统对氨氮的去除效果如图 3 所示。

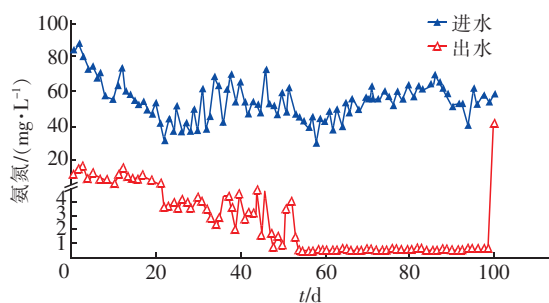


图 3 生化系统对氨氮的去除效果

Fig. 3 Ammonia nitrogen removal by biological system

对比系统恢复后(22~52 d)和生物膜成熟后(52~100 d)的氨氮数据,生物池出水氨氮均值分别为 4.20 mg/L 和 0.50 mg/L,去除率分别为 92.12% 和 99.06%。这主要是两方面的原因:一是随着悬浮填料的投加,容易使污泥龄较长的硝化菌在填料

表面大量生长,增强了系统的硝化能力;二是随着硝化反应的进一步加强,回流的确态氮浓度升高,在缺氧区发生的反硝化反应消耗了更多的碳源,降低了好氧区的 COD 负荷,促进了硝化反应的进行。对于冲击,实质上是有机物超过设计值进入了好氧区,挤占了悬浮态污泥中硝化菌群的代谢和增殖空间,使之在污泥中占比不足,难以达到预期效果;而加入悬浮载体后,尽管仍存在水质冲击,但可提供空间让硝化菌群逐步富集,系统的抗冲击能力提升,处理效果逐步改善。

3.2 系统的 TN 去除效果

生物池进水 TN 均值为 63.00 mg/L,系统恢复后(5~22 d)和生物膜成熟后(52~100 d)生化池出水 TN 均值分别为 13.70 mg/L 和 10.40 mg/L,去除率分别为 78.25% 和 83.50%,出水 TN 稳定达标。生化系统对 TN 去除效果如图 4 所示。

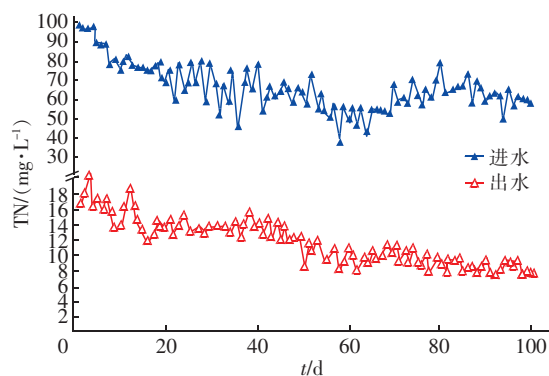


图 4 生化系统对 TN 的去除效果

Fig. 4 TN removal by biological system

改造前,系统的 TN 去除率平均为 75%,且需要投加碳源 20.00 mg/L(BOD₅ 计,乙酸钠)以保证处理效果稳定;改造后,未投加碳源、水量增加 20% 的情况下,TN 去除率提高至 83.50%。之所以改造后系统 TN 去除性能显著提升:一方面,系统硝化彻底为反硝化提供了基质,是反硝化良好的前提;另一方面,系统改造后,硝化主要由悬浮载体承担,污泥龄控制在 8~12 d,显著低于改造前的污泥龄(10~20 d),泥龄的降低使得污泥活性进一步提升;同时,系统的总回流比为 300%,理论上 TN 去除率为 75%,实际 TN 去除率高于理论值,推测伴随着其他途径的 TN 去除方式。对生化系统好氧 MBBR 区进出水 TN 进行了测定,可去除 TN 6~10 mg/L,连续测定一周的平均值为 8.30 mg/L,对 TN 去除率贡献

为13.20%。从国内其他污水厂运行结果看,MBBR生物膜分层分布的结构,有利于SND现象的产生,且一般TN去除量为3~10 mg/L^[4-7]。

3.3 系统的TP去除效果

生物池进水TP均值为6.13 mg/L,系统恢复后和生物膜成熟后生物池出水TP均值分别为1.47 mg/L和0.43 mg/L,去除率分别为76.02%和93.00%,在进水TP基本不变的条件下,TP去除率增加了17个百分点,对比改造前TP去除率平均为60%更是有大幅度的提升,生物除磷效果改善显著,生化系统对TP的去除效果如图5所示。分析原因,MBBR的采用使得污泥龄较改造前大幅降低,为聚磷菌群创造有利条件;厌氧段ORP在-260~-230 mV,厌氧段TP均值为13.24 mg/L,厌氧条件下释磷效果好;缺氧段出水TP均值为0.74 mg/L,至缺氧末端系统的TP去除率已达到88%,TP在缺氧段去除,具备典型的反硝化除磷效果,实现一碳两用;虽然进水碳源相对充足(C/N>4),但对于同步脱氮除磷碳源(C/N>7)是不足的,而反硝化除磷效果的出现对于碳源可极大节约,使得无需投加碳源情况下,满足脱氮除磷需求。

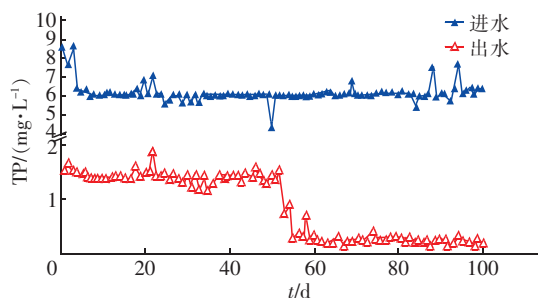


图5 生化系统对TP的去除效果

Fig.5 TP removal by biological system

好氧段出水TP均值为0.43 mg/L,TP去除率达到了93%;系统进水STP/TP在67%左右,进水SS的含磷率为0.67%,污泥含磷率为3.82%,污泥含磷率达到了较高的水平。缺氧段TP的去除率为88%,好氧段TP的去除率为5%,通过对比缺氧段和好氧段的聚磷量,缺氧聚磷起主要作用,这不同于对传统A/A/O工艺中缺氧段(主要作用是脱氮)的认知。聚磷菌在厌氧段主要是释磷并合成PHB,进入缺氧区,部分聚磷菌以硝酸盐作为电子受体分解细胞内的PHB,降低了聚磷菌体内PHB含量。反硝化除磷菌(DPB)的出现,对系统氮磷在碳源限制下

的同步达标作出了主要贡献。但对于DPB现象的出现,仍需进一步研究,需要做到量化控制,也需要在其他污水厂验证。

3.4 二沉池与高效池运行

二沉池作为泥水分离的主要场所,其运行效果的好坏直接影响着生化段的处理效果。改造后二期和三期二沉池的表面负荷从0.75 m³/(m²·h)增加到0.94 m³/(m²·h),四期二沉池表面负荷从0.72 m³/(m²·h)增加到0.81 m³/(m²·h)。为了进一步降低二沉池出水悬浮物以及强化除磷效果,高效沉淀池在混合区投加三氯化铁10 mg/L,在絮凝区为了进一步增加絮体体积,增加絮体的沉降性,投加絮凝剂PAM,高效沉淀池出水TP稳定在0.30 mg/L以下。

4 结论

① 采用MBBR改造,系统水量从10×10⁴ m³/d提升至12×10⁴ m³/d,出水水质稳定达到一级A标准,优化运行后可达到地表水Ⅳ类标准。

② 生化池出水TN均值为10.40 mg/L,TN去除率为83.50%,好氧段发生TN去除现象,可去除TN 6~10 mg/L。

③ 生化池出水TP为0.43 mg/L,TP去除率为93%,缺氧段发生显著的TP去除现象,在高效沉淀池投加铁盐絮凝剂后,TP降至0.30 mg/L以下。

④ 系统内SND及DPB的出现,实现了碳源限制下的同步强化脱氮除磷,未投加碳源情况下TN和TP稳定达标,通过SND途径去除TN贡献率为13.20%,通过DPB途径去除TP达到88%,实现了节能降耗。

参考文献:

- [1] 王翥田,叶亮,张新彦,等. MBBR工艺用于无锡芦村污水处理厂的升级改造[J]. 中国给水排水,2010,26(2):71-73.
Wang Zhutian, Ye Liang, Zhang Xinyan, et al. Application of MBBR process to upgrading and reconstruction of WWTP [J]. China Water & Wastewater,2010,26(2):71-73 (in Chinese).
- [2] 韩萍,许斌,宋美芹,等. 团岛污水厂MBBR工艺的升级改造及运行效果[J]. 中国给水排水,2014,30(12):110-114.
Han Ping, Xu Bin, Song Meiqin, et al. Design features and operational effect of Tuandao WWTP upgrading by

- MBBR in Qingdao [J]. China Water & Wastewater, 2014,30(12):110-114(in Chinese).
- [3] 焦文海,杨红红,徐跃,等. 兖州市污水处理厂改扩建工程设计[J]. 中国给水排水,2010,26(8):78-81.
Jiao Wenhai, Yang Honghong, Xu Yue, *et al.* Design of reconstruction and extension project of Yanzhou Wastewater Treatment Plant [J]. China Water & Wastewater, 2010,26(8):78-81(in Chinese).
- [4] 杨宇星,吴迪,宋美芹,等. 新型 MBBR 用于类地表Ⅳ类水排放标准升级改造[J]. 中国给水排水, 2017, 33(14):93-98.
Yang Yuxing, Wu Di, Song Meiqin, *et al.* Application of new MBBR in WWTP upgrading to meet class Ⅳ surface water standard[J]. China Water & Wastewater, 2017,33(14):93-98(in Chinese).
- [5] 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 process for class Ⅳ of environmental quality standards for surface water[J]. China Water & Wastewater, 2017,33(16):97-102(in Chinese).
- [6] 吴迪. 水处理用悬浮载体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 HDPE suspended carrier for water treatment occupation standard and design of added amount[J]. China Water & Wastewater, 2017,33(16):13-17(in Chinese).
- [7] 吴迪,李闯修. 北方某污水厂 Bardenpho - MBBR 改造运行分析[J]. 中国给水排水,2018,34(9):106-110, 115.
Wu Di, Li Chuangxiu. Operation analysis of Bardenpho - MBBR upgrading and retrofitting in a northern WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(9):106-110,115(in Chinese).



作者简介:路晖(1989-),男,山东淄博人,硕士,工程师,主要从事 MBBR 工艺设计与调试运行工作。

E-mail: qingdaospr@163.com

收稿日期:2018-05-25

(上接第 99 页)

回用的核心工艺,其回用水质好,运行稳定,对后续实现废水零排放起到减量作用。

参考文献:

- [1] 王艳芳,张国宇,孙娜,等. 焦化废水生化处理出水深度处理及回用[J]. 中国给水排水, 2017,33(4):79-82.
Wang Yanfang, Zhang Guoyu, Sun Na, *et al.* Advanced treatment and reuse of coking wastewater biological effluent[J]. China Water & Wastewater, 2017,33(4):79-82(in Chinese).
- [2] 余淦申,郭茂新,黄进勇,等. 工业废水处理及再生利用[M]. 北京:化工工业出版社,2013.
Yu Ganshen, Guo Maoxin, Huang Jinyong, *et al.* Industrial Wastewater Treatment and Reclamation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013(in Chinese).



作者简介:刘丞(1987-),男,北京人,本科,工程师,主要从事水处理工程设计及调试工作。

E-mail: liucheng@jzenvirom.com

收稿日期:2018-05-28