

论述与研究

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.09.001

低温条件下污水处理厂的除污效果及运行调控分析

茹 春¹, 张 爽¹, 路 晖², 周家中², 苏丹丹², 苑广耀², 吴 迪²

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266555)

摘 要: 东北某新建污水处理厂设计水量为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 采用“改良 Bardenpho - MBBR + 磁加载沉淀”处理工艺。实际运行效果显示, 在 8.7°C 的低温条件下, 出水 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、SS、TN 和 TP 分别为 (0.23 ± 0.13) 、 (0.69 ± 0.85) 、 (7.99 ± 1.73) 和 $(0.15 \pm 0.05) \text{ mg/L}$, 出水水质稳定且优于排放标准。MBBR 工艺保障了低温下系统的硝化效果, 磁加载沉淀工艺强化了深度处理系统应对 SS 冲击的能力。通过调控改良 Bardenpho 工艺的碳源投加点以及系统多点进水、多点回流, 实现了外投碳源的高效利用以及生化系统的高效脱氮除磷效果, 好氧 MBBR 区同步硝化反硝化(SND)的出现助力了外投碳源的节约。

关键词: MBBR; 改良 Bardenpho 工艺; 磁加载沉淀; 低温; 脱氮除磷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4602(2021)09 - 0001 - 06

Pollutants Removal Performance and Operation Regulation of Urban Wastewater Treatment Plant under Low Temperature Condition

RU Chun¹, ZHANG Shuang¹, LU Hui², ZHOU Jia-zhong², SU Dan-dan²,
YUAN Guang-yao², WU Di²

(1. Northwest Engineering Corporation Limited of PowerChina, Xi'an 710065, China; 2. Qingdao Spring Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: Design capacity of a newly-built wastewater treatment plant (WWTP) in Northeast China is $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, and the combined process is modified Bardenpho-MBBR + magnetic loading precipitation. When the temperature was as low as 8.7°C , $\text{NH}_3 - \text{N}$, SS, TN and TP in the effluent were $(0.23 \pm 0.13) \text{ mg/L}$, $(0.69 \pm 0.85) \text{ mg/L}$, $(7.99 \pm 1.73) \text{ mg/L}$ and $(0.15 \pm 0.05) \text{ mg/L}$, respectively, and the effluent quality was stable and superior to the limitations of the discharge standard. The MBBR process enhanced the nitrification performance of the system at low temperature, and the magnetic loading precipitation process strengthened the ability of the advanced treatment system to deal with SS shock. By adjusting carbon source dosing points of the modified Bardenpho process and adopting multi-point feeding and multi-point reflux of the system, efficient usage of the external carbon source and high-efficiency denitrification and phosphorus removal of the biochemical system were realized. The

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07106005); 青岛西海岸新区自主创新重大专项(2019 - 20)

通信作者: 周家中 E-mail: zhoujiazhong@qdspr.com

appearance of simultaneous nitrification and denitrification (SND) in the aerobic MBBR zone helped to save the dosage of external carbon source.

Key words: MBBR; modified Bardenpho process; magnetic loading precipitation; low temperature; removal of nitrogen and phosphorus

我国城镇污水处理厂出水水质大多执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准,但各地水环境容量不同,在一些重点流域和区域(如北京、天津等)已经相继制定了更为严格的地方排放标准,即除 SS 和 TN 外,其他各项指标需满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准。对于北方,冬季低温期间生化处理过程受影响较大,是稳定达标的难点;同时,较高的 TN 和 TP 出水标准,也对运行优化提出了要求,即降低运行能耗和药耗。笔者以东北某新建污水处理厂为例,探讨了“改良 Bardenpho—MBBR+磁加载沉淀”工艺在冬季低温条件下的实际运行效果以及优化运行调控措施,以期类似污水处理厂的设计和运行提供参考。

1 污水处理厂概况

1.1 污水厂设计进、出水水质

该新建污水处理厂位于辽宁省海城市,设计水量为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分为两组,每组的规模为 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,进水主要为生活污水,设计进、出水水质如表 1 所示,设计水温为 9°C 。出水除 TN 要求低于 12 mg/L ,SS 执行 GB 18918—2002 的一级 A 标准外,其余指标需要满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类水质标准。

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Designed influent and effluent quality

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$						
项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
进水	≤450	≤200	≤250	≤50	≤65	≤4
出水	≤30	≤6	≤10	≤1.5(2.5)	≤12	≤0.3

注: 括号内为水温低于 12°C 时的执行标准。

1.2 工艺流程

污水处理工艺流程如图 1 所示。生化段采用基于 MBBR 的改良 Bardenpho 工艺,污水依次经过预缺氧区、厌氧区、前缺氧区、好氧区、后缺氧区和后好氧区,在好氧区投加 SPR-Ⅲ型悬浮载体。共设计 2 座生化反应池,单座有效池容为 $13\,391.9 \text{ m}^3$,设计总变化系数为 1.1,总停留时间为 19.47 h 。MLSS

为 $3.5 \sim 4.0 \text{ g/L}$,污泥回流比和内回流比分别为 100% 和 200%。为便于运行调控,共设计 2 个进水点,2 个污泥回流点和 2 个碳源投加点,其中 2 个进水点分别位于预缺氧区和厌氧区,2 个污泥回流点分别位于预缺氧区和前缺氧区,2 个碳源投加点分别位于前缺氧区和后缺氧区。深度处理采用优化的磁加载沉淀超效分离技术,通过投加磁种形成密实的磁絮体,可有效提高混凝效率和污染物去除效果^[1]。磁加载沉淀系统核心设混合反应池、磁种加载池、絮凝反应池和斜管沉淀池,总 HRT 为 0.85 h 。磁加载沉淀系统后设纤维转盘滤池,并设超越管道,纤维转盘滤池作为应急工艺段,只在 SS 超标的情况下使用。

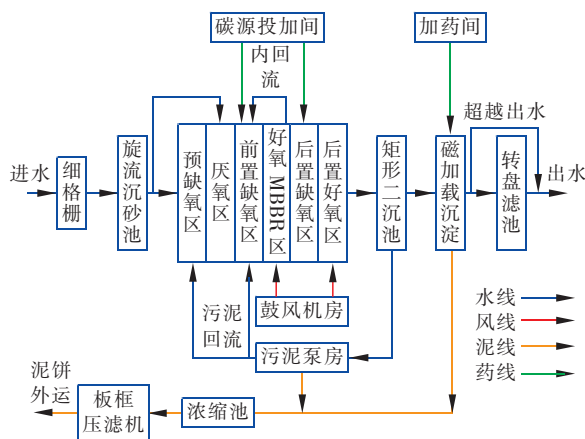


图 1 污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment process

2 试验方法

2.1 小试

为探究生化系统的处理性能并为系统的调控运行提供依据,采用 SBR 法进行小试,反应器总容积为 5 L ,根据试验需求提供搅拌或者曝气。

2.1.1 硝化小试

为分析冬季低温下 MBBR 区悬浮载体生物膜和活性污泥的硝化效果,分别采用两者进行硝化小试。试验用水为前缺氧区出水上清液,共设置纯膜和活性污泥两个系统,主要参数与生化池一致,纯膜

系统的悬浮载体填充率为 30%, 活性污泥系统的污泥浓度为 5 000 mg/L, 以 MBBR 区的停留时间作为最终反应时间, 水温控制在 8~9℃。根据试验结果分别计算其硝化性能, 试验重复 3 次取平均值。

2.1.2 反硝化小试

为探究碳源投加位置对 TN 去除效果的影响, 分别取前缺氧区和后缺氧区的泥水混合液, 污泥浓度均为 5 000 mg/L, 在相同温度下均补充 10 mg/L 的碳源, 控制 HRT 分别为前缺氧区和后缺氧区的实际停留时间, 水温为 8~9℃。根据反应前后的硝态氮浓度分析 TN 去除效果, 试验重复 3 次取平均值。

2.2 MBBR 区沿程 TN 分析

为分析 MBBR 区对 TN 的去除效果, 对 MBBR 区进、出水进行连续取样测定。分别取 MBBR 区进、出水混合液, 每隔 1.5 h 取样一次, 每天取 6 次, 取完后立即过滤, 滤液在 0~3℃ 保存, 进水和出水的 6 个水样分别等量混合, 然后测定 TN 浓度。

2.3 水质指标测定方法

氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定, 硝态氮采用紫外分光光度法测定, TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, COD 采用重铬酸钾法测定, MLSS 采用重量法测定, DO 浓度和温度采用 WTW Multi3430 离线测定。

3 结果分析与讨论

统计分析了 2019 年 12 月—2020 年 5 月污水厂在低温期对主要污染物的去除效果以及优化调控效果。污水厂实际进水量为 $(1.5 \sim 1.7) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 全系统只运行一组。

3.1 低温条件下系统的硝化能力

系统对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除效果如图 2 所示。

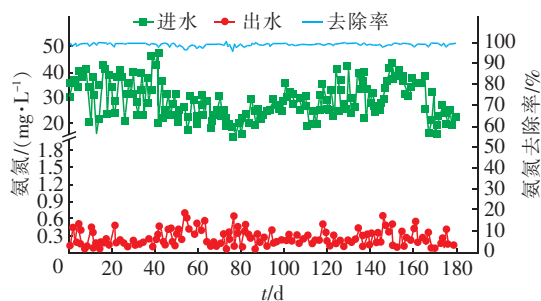


图 2 系统对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除效果

Fig. 2 Removal effect of $\text{NH}_3 - \text{N}$

进水 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 为 $(28.58 \pm 7.35) \text{ mg/L}$, 出水 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 为 $(0.23 \pm 0.13) \text{ mg/L}$, 系统对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的

平均去除率高达 99.13%, 出水 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 浓度稳定优于地表水 IV 类标准。在该阶段, 水温低于 12℃ 的时间共持续 3 个月, 其中最低水温仅为 8.7℃, 此时出水氨氮依然稳定在 0.5 mg/L 以下。

试验期间, 系统的 MLSS 维持在 $(5 \pm 0.5) \text{ g/L}$, 核算实际悬浮态好氧污泥龄为 7.5~8.5 d, 而若采用纯活性污泥法, 则好氧污泥龄至少为 10.73 d (安全系数为 2.0)。悬浮载体的引入, 有效降低了系统的污泥龄。为探究低温条件下生化系统内悬浮载体生物膜和活性污泥的硝化能力, 分别进行了基于悬浮载体生物膜和活性污泥的硝化速率测定, 结果见图 3。可以看出, 在 8~9℃ 的低温条件下, 纯膜系统的硝化速率远高于活性污泥系统。试验条件下悬浮载体生物膜和活性污泥的硝化容积负荷分别为 0.114、0.060 $\text{kgNH}_3 - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 其中活性污泥按污泥负荷换算为 0.012 $\text{kgNH}_3 - \text{N}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 。低温对生物膜的影响程度小于活性污泥, 生物膜具有更强的硝化能力, 保障了系统的硝化性能。已有研究表明, 悬浮载体的加入可以改善微生物的生存环境, 是因为其更易于富集硝化菌等长泥龄菌, 从而提高系统的硝化能力^[2]。另有研究表明, 在低温条件下, 悬浮载体生物膜的温度变化系数较活性污泥的更低, 说明了悬浮载体生物膜的硝化性能受低温影响更小, 耐低温性更强^[3]。相关实际工程运行结果也表明, 在低温条件下, 通过 MBBR 工艺的加载, 可有效保障污水厂出水水质的稳定达标^[4-5]。

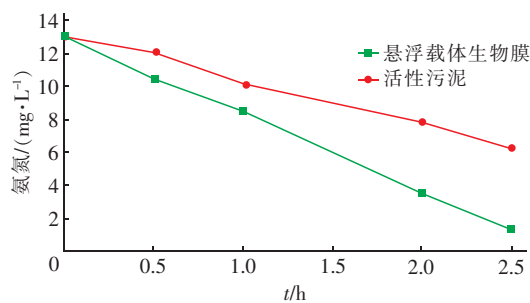


图 3 纯膜系统和活性污泥系统对氨氮的去除效果

Fig. 3 Removal effect of ammonia nitrogen by pure biofilm system and activated sludge system

3.2 二沉池及深度处理对 SS 的去除效果

二沉池采用周进周出矩形二沉池, 设计表面负荷为 $1.05 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 出水进入磁加载沉淀工艺段。磁加载沉淀系统中的沉淀池采用斜管沉淀, 设计表面负荷为 $14.4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 磁加载沉淀工艺

段对 SS 的去除效果如图 4 所示。二沉池出水 SS 为 (18.45 ± 2.76) mg/L, 磁加载沉淀工艺段出水 SS 为 (0.69 ± 0.85) mg/L, 整体对 SS 的平均去除率达到 96.12%。由于磁加载沉淀工艺段出水 SS 已稳定低于排放标准, 所以转盘滤池只作为应急设备并未启用, 在日常运行过程中, 磁加载沉淀工艺段出水超越转盘滤池直接消毒外排。

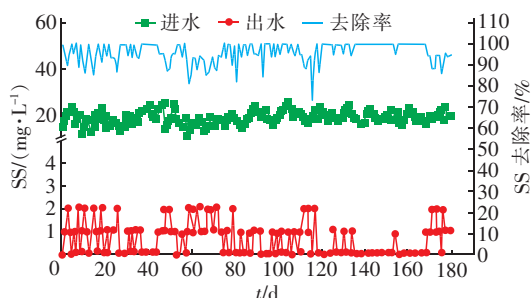


图 4 磁加载沉淀工艺段对 SS 的去除效果

Fig. 4 Removal of SS by magnetic loading precipitation process

二沉池出水 SS 整体较为稳定, 均在 30 mg/L 以下, 但由于进水量的波动, 其日变化值最高也能达到 100 mg/L 以上。通过磁加载沉淀系统, 提高了深度处理系统应对 SS 冲击的能力, 实现了高效、稳定的 SS 去除过程。磁加载沉淀工艺段的磁粉投加量为 3~4 mg/L, 回收率达到 99.6%, 通过优化设备, 极大地提高了磁粉利用率, 降低了系统的运行费用。

表 2 碳源投加点与 TN 去除效果

Tab. 2 Carbon source dosing points and TN removal effect

项 目	调控时间/d	碳源投加地点	水温/℃	TN/(mg·L ⁻¹)		COD/(mg·L ⁻¹)		原水 C/N	碳源投加量/(m ³ ·d ⁻¹)	TN 去除率/%
				进水	出水	进水	出水			
第 1 阶段	58	前缺氧区	8~11	34.94	9.36	173.10	14.55	2.57	0.85	73.21
第 2 阶段	60	后缺氧区	11~14	33.45	8.09	131.31	13.35	2.32	0.85	75.81
第 3 阶段	62	未投加	14~19	33.04	6.40	152.51	15.57	2.31	0	80.63

对比第 1 阶段和第 2 阶段, 碳源投加量均为 0.85 m³/d, 投加点分别位于前缺氧区和后缺氧区, 从 TN 去除效果来看, 出水 TN 平均值分别为 9.36、8.09 mg/L, TN 去除率分别为 73.21% 和 75.81%, 第 2 阶段的 TN 去除效果优于第 1 阶段, 即在后缺氧区投加碳源时, TN 去除效果更好。第 1 阶段和第 2 阶段的进水 C/N 值分别为 2.57 和 2.32, 在投加相同量的碳源之后, 核算系统 C/N 值分别提高至 2.87 和 2.69。根据进出水 TN 以及碳源消耗, 核算两个阶段的实际消耗 C/N 值分别为 7.35 和 6.53, 可以看出, 将碳源投加于后缺氧区时其利用率更高,

3.3 TN 去除效果以及碳源投加优化

系统对 TN 的去除效果如图 5 所示。进水 TN 为 (33.79 ± 6.67) mg/L, 出水 TN 为 (7.99 ± 1.73) mg/L, 系统对 TN 的平均去除率为 76.35%, 实测低温 (8~11℃) 运行期间污泥的反硝化负荷为 0.010 kgNO₃⁻-N/(kgMLSS·d)。

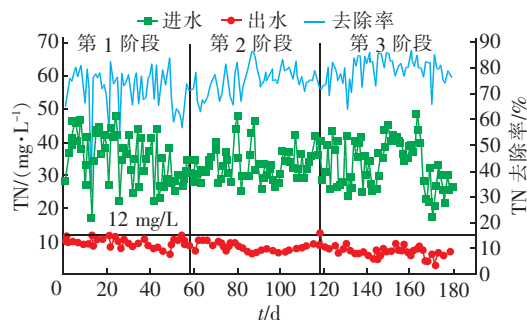


图 5 系统对 TN 的去除效果

Fig. 5 Removal effect of TN

该污水厂实际进水 C/N 值基本在 2.5 左右, 原水碳源量低于理论需求量, 故需要通过外投碳源强化 TN 的去除。设计初期, 生化系统共预留 2 个碳源投加点, 即前缺氧区和后缺氧区。为实现 TN 的高效去除以及碳源的高效利用, 对碳源投加点进行了优化控制, 调控结果如表 2 所示。整个优化控制共分为 3 个阶段, 所投碳源为 25% 的乙酸钠, 核算 COD 约为 180 g/L。

推测主要受进水硝酸盐基质浓度的影响。由于该污水厂进水碳源不足, 对于外投碳源的利用效率, 主要影响因素是反硝化区进水 DO 和基质浓度。对比前后缺氧区, 根据回流比核算, 携带进入的溶解氧总量基本一致, 核心影响是基质浓度。前缺氧区对于回流硝酸盐相当于稀释了一半, 降低了进水硝酸盐浓度, 而后缺氧区硝酸盐浓度未被稀释, 更有利于反硝化削减硝酸盐。为进一步验证上述推测, 分别取前缺氧区和后缺氧区泥水混合液并投加相同量的碳源, 进行反硝化速率测试。结果显示, 在 8~9℃ 的低温条件下, 前缺氧区和后缺氧区的反硝化速率分

别为 $0.004、0.012 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 。在相同的碳源投加量下,后缺氧区能够去除更多的 TN,相当于有更高的碳源利用率。所以对于改良 Bardenpho 工艺的碳源投加位置调控,应优先投加在后缺氧区,前缺氧区应充分利用原水碳源进行反硝化脱氮,从而避免碳源因为 DO 而浪费,并提高原水碳源的有效利用率。

对比第 2 阶段和第 3 阶段,在两阶段进水 C/N 值和 TN 浓度基本一致的情况下,出水 TN 浓度分别为 $8.09、6.40 \text{ mg/L}$,在第 3 阶段未投加碳源的情况下获得了更优的出水效果。分析原因可能是随着悬浮载体生物膜的逐渐成熟,在好氧 MBBR 区发生了同步硝化反硝化(SND)过程,进一步强化了 TN 的去除。为验证 SND 过程,分别取 MBBR 区进出水进行沿程 TN 分析。结果表明,好氧 MBBR 区可以降低 $1 \sim 3 \text{ mg/L}$ 的 TN,与宏观检测效果一致。大量研究表明^[6-7],在泥膜复合 MBBR 工艺系统中,SND 贡献率主要来自悬浮载体生物膜,生物膜分层分布的结构为这一过程奠定了基础。SND 过程的出现可实现 TN 的高效去除并降低外投碳源量,节约了药剂投加费用。核算第 3 阶段实际消耗的 C/N 值仅为 5.65,由于 SND 的增益效果,大大提高了碳源的有效利用率。

从图 5 整体可以看出,随着系统的优化运行调控,出水 TN 浓度逐步降低,在保障出水 TN 浓度越来越低的同时,也降低了外投碳源费用。

3.4 TP 去除效果与回流方式优化

系统对 TP 的去除效果如图 6 所示。可以看出,

进水 TP 浓度为 $(2.95 \pm 0.78) \text{ mg/L}$,出水 TP 浓度为 $(0.15 \pm 0.05) \text{ mg/L}$,二沉池出水 TP 浓度为 $(0.57 \pm 0.17) \text{ mg/L}$,系统对 TP 的平均去除率为 94.92%,其中生物除磷率为 80.68%,除磷贡献率达到了 85%。

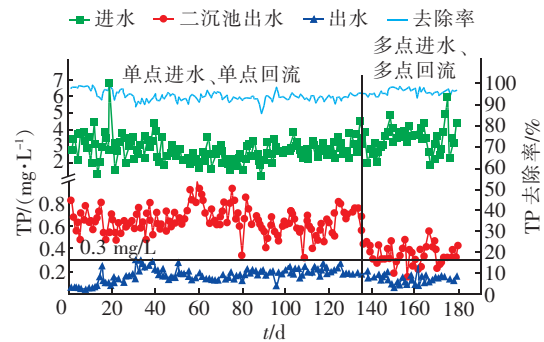


图 6 系统对 TP 的去除效果

Fig. 6 Removal effect of TP

对于以活性污泥法为核心的工艺,应尽可能地通过优化运行提高生物除磷效果,进而降低深度处理中化学除磷的药剂费用。设计初期,改良 Bardenpho 工艺共设 2 个进水点和 2 个污泥回流点,其功能是通过合理分配预缺氧区和厌氧区的进水比例以及预缺氧区和前缺氧区的污泥回流比例,解决传统工艺对厌氧释磷效果的影响。通过对生化段进水点和污泥回流点进行优化,调控进水进入预缺氧区和厌氧区的比例分别为 80% 和 20%;污泥回流进入预缺氧区和前缺氧区的比例分别为 70% 和 30%,分析了由单点进水、单点回流调整为多点进水、多点回流对生物除磷效果的影响,结果如表 3 所示。

表 3 污泥回流点和进水点的位置对生物除磷的影响

Tab. 3 Effect of sludge return point and influent point on biological phosphorus removal

项 目	运行时长/d	污泥回流点	进水点	进水 TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	预缺氧区末端硝态氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	二沉池出水 TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP 去除率/%
单点进水、单点回流	135	预缺氧区	预缺氧区	2.80	3 ~ 5	0.65	76.78
多点进水、多点回流	45	预缺氧区和前缺氧区	预缺氧区和厌氧区	3.41	0 ~ 2	0.34	90.03

从图 6 和表 3 可以看出,经过多点进水、多点回流的调控,二沉池出水 TP 浓度明显降低,由 0.65 mg/L 降低至 0.34 mg/L ,生物除磷率由 76.78% 提高至 90.03%,生物除磷效果明显提高。分析原因主要是通过工艺的优化,降低了进入厌氧区的硝态氮浓度,减少了硝态氮对厌氧释磷的影响^[8],同时通过分段进水提高了厌氧区的 BOD/TP 值,增强了厌氧释磷效果。深度处理通过化学沉淀作用,进一步

强化对 TP 的去除,保障了污水处理厂出水 TP 浓度的稳定达标。

4 结论

① 在东北地区某高标准新建污水处理厂采用“改良 Bardenpho - MBBR + 磁加载沉淀”工艺,实际运行效果显示,系统出水 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、SS、TN 和 TP 分别为 (0.23 ± 0.13) 、 (0.69 ± 0.85) 、 (7.99 ± 1.73) 、 $(0.15 \pm 0.05) \text{ mg/L}$,出水水质稳定而且优于排放

标准。

② 系统运行期间最低温度仅为 8.7℃, MBBR 工艺保障了低温条件下系统的硝化效果;磁加载沉淀工艺强化了深度处理系统应对 SS 冲击的能力,保障了出水 SS 的稳定达标。

③ 通过在改良 Bardenpho 工艺后缺氧区投加碳源,可以提高碳源的有效利用率,提高系统对 TN 的去除效果,好氧 MBBR 区同步硝化反硝化的出现助力了 TN 的高效去除,并节约了外投碳源。

④ 通过将改良 Bardenpho 工艺的单点进水、单点回流调节为多点进水、多点回流,提高了生物除磷效果,节约了深度处理化学除磷的药剂费用。

参考文献:

- [1] 卢立念,韩文杰,吴迪,等. 基于磁加载沉淀的超效分离工艺的应用[J]. 市政技术,2019,37(6):209-213.
LU Linian, HAN Wenjie, WU Di, *et al.* Application of super-efficiency separation technology based on magnetic loading precipitation [J]. Municipal Engineering Technology, 2019, 37(6): 209-213 (in Chinese).
- [2] 郑志佳,白华清,孟涛,等. 低温下 MBBR 强化硝化原理分析和应用[J]. 中国给水排水,2019,35(23):6-11.
ZHENG Zhijia, BAI Huaqing, MENG Tao, *et al.* Principle analysis and application of MBBR enhanced nitrification at low temperature [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(23): 6-11 (in Chinese).
- [3] 周家中,韩文杰,吴迪,等. MBBR 泥膜复合系统泥膜竞争关系的影响因素[J]. 中国环境科学,2020,40(11):4735-4743.
ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, WU Di, *et al.* Factors influencing the competition between activated sludge and biofilm in hybrid MBBR nitrification system [J]. China Environmental Science, 2020, 40(11): 4735-4743 (in Chinese).
- [4] 刘强,王泰,沈淳,等. MBBR 工艺用于污水厂提标改造的低温运行效果[J]. 中国给水排水,2020,36(13):7-13.
LIU Qiang, WANG Tai, SHEN Bo, *et al.* Operation effect of MBBR applied in upgrading and reconstruction of a wastewater treatment plant in Tianjin at low temperature [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13): 7-13 (in Chinese).
- [5] 肖宁,吴辰平,吴迪,等. 新疆某污水厂氧化沟工艺 MBBR 改造效果分析[J]. 中国给水排水,2019,35(21):11-16.
XIAO Ning, WU Chenping, WU Di, *et al.* Retrofitting effect of oxidation ditch process by MBBR in a wastewater treatment plant in Xinjiang [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(21): 11-16 (in Chinese).
- [6] 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).
- [7] 栾志翔,吴迪,韩文杰,等. 北方某污水厂 MBBR 工艺升级改造后的高效脱氮除磷效果[J]. 环境工程学报,2020,14(2):333-341.
LUAN Zhixiang, WU Di, HAN Wenjie, *et al.* Effect of high efficiency nitrogen and phosphorus removal in a wastewater treatment plant in North China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(2): 333-341 (in Chinese).
- [8] 陈航,刘惠成. 惠阳污水厂 CAST 工艺总磷超标原因分析及应对措施[J]. 中国给水排水,2010,26(14):131-133.
CHEN Hang, LIU Huicheng. Reason analysis and counter measures for exceeding-standard TP in CAST process in Huiyang WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(14): 131-133 (in Chinese).

作者简介:茹春(1988-),男,河南三门峡人,硕士,工程师,主要从事污水处理等环保行业的运营管理工作。

E-mail:823906391@qq.com

收稿日期:2020-12-31

修回日期:2021-01-22

(编辑:刘贵春)