

鲍任兵, 徐健, 陈鹏, 等. 优化污泥回流方式对多级 AO-MBR 工艺的影响[J]. 净水技术, 2024, 43(3): 92-98,142.

BAO R B, XU J, CHEN P, et al. Influence of optimized sludge reflux mode on multilevel AO-MBR process[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(3): 92-98,142.

优化污泥回流方式对多级 AO-MBR 工艺的影响

鲍任兵^{1,*}, 徐健¹, 陈鹏², 田若², 雷培树¹, 李鹏程¹, 邹磊¹

(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. 武汉市城市排水发展有限公司, 湖北武汉 430070)

摘要 采用处理水量为 0.15 m³/h 的中试装置, 开展多级 AO-MBR 工艺处理低 C/N 城市污水试验研究, 通过优化污泥回流方式、溶解氧及污泥浓度控制等措施, 降低高溶解氧污泥回流对前端生化池的影响, 实现出水水质达到地表水Ⅳ类标准(TN 除外)。结果表明, 在耦合 MBR 工艺的形式下, 经过生化池多级回流能显著保证各反应区的溶解氧环境, 保持各反应区的污泥浓度平衡, 进一步提高出水水质。在水温低于 12 ℃、进水 TN 质量浓度为 23~33 mg/L 时, 采用回流方式 4 能稳定保证 TN 去除率达到 60% 以上, 实现出水 TN 质量浓度达到 10 mg/L 左右; 进水 TP 质量浓度为 2~4 mg/L 时, TP 去除率达到 85% 以上, 实现出水 TP 质量浓度低于 0.3 mg/L 的要求。

关键词 多级 AO 工艺 污泥回流 溶解氧控制 MBR 工艺 多点进水

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)03-0092-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.03.011

Influence of Optimized Sludge Reflux Mode on Multilevel AO-MBR Process

BAO Renbing^{1,*}, XU Jian¹, CHEN Peng², TIAN Ruo², LEI Peishu¹, LI Pengcheng¹, ZOU Lei¹

(1. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

2. Wuhan Urban Drainage Development Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract A test device with treatment scale of 0.15 m³/h was used to carry out an AO-MBR process to treat low C/N urban wastewater. Best sludge return form was explored to reduce the impact of high dissolved oxygen sludge return on the front biochemical tank, by optimizing the sludge return mode, dissolved oxygen and sludge concentration control and other measures. Eventually, the effluent quality to reach the surface level IV standard was achieved. The results showed that in the form of coupled MBR process, biochemical tank could significantly ensure the dissolved oxygen environment of each reaction zone and maintain the balance of sludge concentration in each reaction zone by multi-stage reflux, so as to further improved the effluent quality. When the water temperature was below 12 ℃ and the influent TN was 23~33 mg/L, the reflux mode 4 could stably ensure that the TN removal rate reached more than 60% and the effluent TN reached about 10 mg/L. When the influent TP was 2~4 mg/L, the TP removal rate was more than 85%, and the effluent TP was less than 0.3 mg/L.

Keywords multilevel AO process sludge reflux dissolved oxygen control MBR process multi-point influent

随着我国对污水处理提质增效要求的日益增加, 各地对污水处理厂提出了更加严苛的排放标准。对于新建污水厂, 常规的污水处理工艺已无法满足较高的出水水质要求; 对于多数仍执行一级 A 排放标准的污水厂, 提标改造更是迫在眉睫。特别对于

氮和磷的去除, 在污水厂进水浓度普遍偏低的条件下^[1], 如何保证水质稳定达标, 成为当今研究的热点。目前, 多级 AO 工艺因其占地小、能耗低、脱氮性能好、抗冲击负荷能力强等优点, 工程应用越来越多, 但也存在着生物量不足、冬季低温条件下水质无法达标的难题。为进一步增强脱氮除磷效果, 出现了生物处理与膜过滤组合的工艺形式, 如 AO-MBR^[2]、AAO-MBR^[3]、Bardenpho-MBR^[4]、多级 AO-MBR 等工艺, 均取得了良好的脱氮除磷效果。其中, 多级 AO-MBR 工艺同时具备两种工艺的优

[收稿日期] 2023-03-01

[基金项目] 湖北省建设科技计划项目; 双碳背景下城镇污水处理厂强化脱氮除磷工艺技术研究

[通信作者] 鲍任兵(1991—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为水体污染与防治, E-mail: rbingbao@163.com。

点,逐渐出现在污水厂的新建项目中,但由于工程应用量较少,尚缺乏完善的运行经验和调控措施。

MBR 池内混合液悬浮固体 (MLSS) 质量浓度可达 8 000~10 000 mg/L,可有效缩短生化停留时间、节约占地,具有巨大优势。然而,膜系统通常采用较大的曝气量以增大膜丝抖动,减少污泥沾染和反冲洗次数,提高使用寿命。常规生化处理工艺的好氧区溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 质量浓度为 2~3 mg/L,而由于膜池的高曝气,回流污泥的 DO 质量浓度可达到 6 mg/L 以上,与生化池联用时,若直接回流至前端生化池,将对其环境造成较大影响,削弱缺氧反硝化和厌氧释磷,降低生物脱氮除磷性能。对于常规 AAO-MBR 的污泥回流形式,根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),通过膜池至好氧区的 400%~600%、好氧区至缺氧区 300%~500% 以及缺氧区至厌氧区 100%~200% 的回流形式,逐级降低回流液 DO 的同时实现较大的污泥浓度。然而,多级 AO 工艺的功能区较多,通常为三级“缺氧/好氧”串联,与 MBR 联用时采用何种污泥回流形式暂无相关研究^[5]。本研究通过设置多级 AO 工艺中试装置,对二沉池回流污泥进行曝气充氧,模拟多级 AO-MBR 工艺中膜池高 DO 回流污泥,并进行多种回流方式的对比试验,探究设定进水条件下的最佳污泥回流形式,同时考虑各级反应区污泥浓度和 DO 控制,为今后污水处理厂的新建及提标改造提供技术支持。

1 试验工艺与方案

1.1 工艺流程

如图 1 所示,本试验装置为三级 AO 工艺,设有

多点进水系统、污泥回流系统、曝气系统,其中污泥回流设有 2 组,分别为充氧池至各好氧区、缺氧 2 区和缺氧 3 区至厌氧区。中试规模的 MBR 池运行维护较为困难,无法长期稳定运行,且本次试验主要研究高 DO 污泥回流对生化反应的影响,故采用通过向二沉池回流污泥充氧曝气的形式,模拟 MBR 回流污泥的性能和状态。

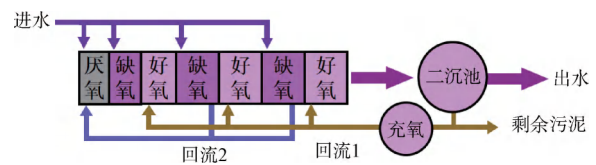


图 1 试验装置工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Test Device

1.2 试验装置与设计参数

本试验处理规模为 0.15 m³/h。如图 2 所示,本试验装置生化池尺寸(长×宽×高)为 2.0 m×1.3 m×1.3 m,有效容积为 2.6 m³。生化池共分为 7 个区域,污水依次通过厌氧区、缺氧 1 区、好氧 1 区、缺氧 2 区、好氧 2 区、缺氧 3 区、好氧 3 区。各级缺氧区与好氧区的容积比设为 2:3,其中,厌氧区与缺氧区内设有立式搅拌器,好氧区内设有曝气盘。二沉池采用竖流式,为实现出水较低的悬浮物(SS),减少 SS 对出水水质的影响,直径为 0.8 m,表面负荷为 0.30 m³/(m²·h)。

试验装置总水力停留时间(HRT)为 19.1 h,其中厌氧区 1.2 h、缺氧 1 区 1.2 h、好氧 1 区 3.5 h、缺氧 2 区 2.9 h、好氧 2 区 4.4 h、缺氧 3 区 2.4 h、好氧 3 区 3.5 h。多点进水系统:由进水管分配至厌氧区、缺氧 1 区、缺氧 2 区、缺氧 3 区,在各进水管上均

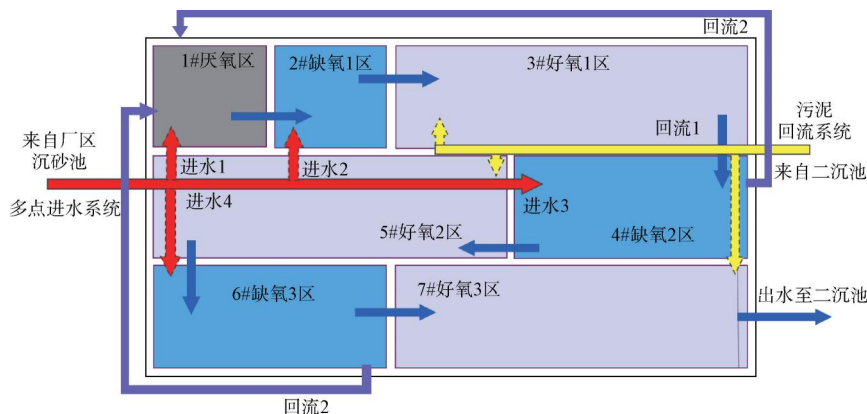


图 2 生化池试验装置

Fig. 2 Biochemical Tank of Test Device

设有阀门和流量计以保证配水均匀,原始进水分配比采用 30% : 20% : 30% : 20%。污泥回流系统:二沉池的回流污泥经充氧曝气后进入 3 段好氧区,缺氧 2 区和缺氧 3 区均回流至厌氧区;通过曝气使污泥充氧池内 DO 质量浓度达到 6~7 mg/L。剩余污泥系统:排放量为 260 L/d(污泥龄为 10 d)。

1.3 试验原水水质及分析

试验原水取自污水处理厂曝气沉砂池出水。试验原水水质如表 1 所示,本试验进水 C/N(BOD₅/TN)为 2.0~2.7,而根据《室外排水设计规范》(GB 50014—2006),C/N(BOD₅:TKN)宜大于 4,可见进水中的有机碳源严重不足,需要重点关注各反应区内 DO 的实现条件,控制微氧运行,减少各好氧区的碳源损耗,以增强脱氮效果。

表 1 试验原水水质

Tab. 1 Raw Water Quality in Test

项目	数值
COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	124~265
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	53~75
TN/(mg·L ⁻¹)	20~36
氨氮/(mg·L ⁻¹)	13~17
TP/(mg·L ⁻¹)	2.5~4.3

1.4 接种污泥及试验方案

(1) 污泥接种

试验装置厌氧区、缺氧区和好氧区活性污泥分别取自厂区生化池相应区域。经一周时间稳定运行后,装置内 MLSS 达到稳定,沉降性能良好。为进一步模拟 MBR 工艺的高污泥浓度,进一步向反应池内补充污泥直至 MLSS 为 8 000 mg/L 左右。

(2) 试验方案

多级 AO 工艺通常存在 3 组“好氧/缺氧”单元,与 MBR 耦合形式下,膜池污泥回流形式选择性较多,将对污染物去除性能产生较大影响。鉴于三级 AO 工艺存在好氧区至缺氧区的串联形式,对比 AAO-MBR 工艺可减少好氧区至缺氧区的回流,将膜池回流至好氧 1 区或好氧 2 区,然后直接由缺氧区回流至厌氧区,因此,可采用缺氧 2 区或缺氧 3 区作为回流点。如图 3 所示,经过研究存在 4 种多级 AO-MBR 工艺污泥回流方式。

方式 1: MBR 池回流至好氧 1 区前端,缺氧 2 区回流至厌氧区前端[图 3(a)]。

方式 2: MBR 池回流至好氧 1 区前端,缺氧 3 区回流至厌氧区前端[图 3(b)]。

方式 3: MBR 池回流至好氧 2 区前端,缺氧 3 区回流至厌氧区前端[图 3(c)]。

方式 4: MBR 池回流分别回流至各好氧区前端,缺氧 3 区回流至厌氧区前端[图 3(d)]。

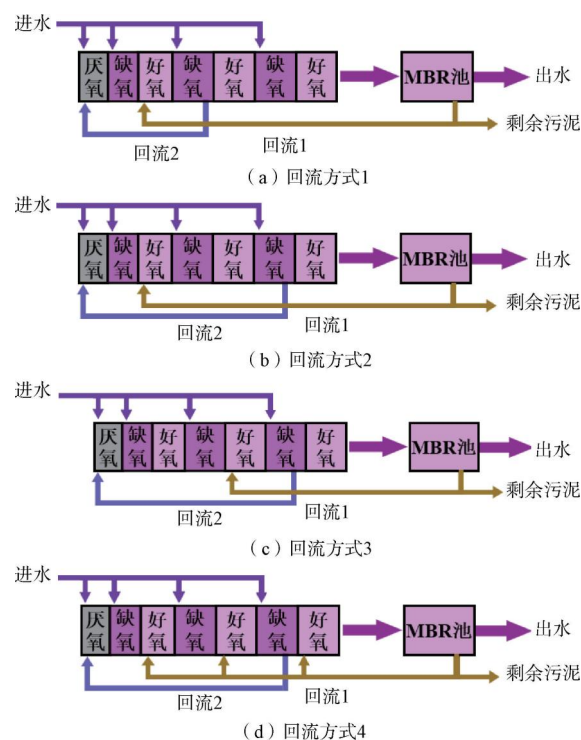


图 3 多级 AO-MBR 工艺污泥回流方式

Fig. 3 Sludge Return Mode of Multilevel AO-MBR Process

为探究多级 AO-MBR 工艺的推荐回流方式,本阶段分别对上述 4 种工艺形式进行试验研究(每种运行工况运行为期一周),对比分析不同回流形式下水 COD_{Cr}、氨氮、TN 和 TP 的去除效果,为今后污水处理厂的新建及改、扩建工艺选择及优化路径提供技术支持。

1.5 检测指标及分析方法

中试装置稳定运行后,每日进行进出水水质监测。检测指标包括: COD_{Cr}、BOD₅、氨氮、TN、TP、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、pH、DO、电导率、MLSS/MLVSS 等,测试方法参照《水和废水监测分析方法》(第四版)。为使出水模拟 MBR 装置出水,本试验出水采用滤后水检测。

2 结果与讨论

2.1 对照试验

为探究膜池污泥直接回流至厌氧区后对多级

AO 工艺的影响,设置对照试验,即二沉池污泥经充氧曝气后直接回流至前端厌氧区。根据相关研究,多级 AO 工艺进水分配为 5:4:3 时,低 C/N 下实现了良好的脱氮效果^[6],考虑到本试验装置 3 级 AO 单元 HRT 比为 5.9:7.3:5.9,将进水分配优化为 5:3:2。

如表 2 所示,装置稳定运行后出水 COD_{Cr}、BOD₅ 和氨氮均能够稳定达到地表准 IV 类标准(TN

除外),去除率分别为 88.31%±0.91%、91.57%±0.69%和 95.83%±0.59%,说明在此运行条件下,有机物氧化和硝化反应较充分。因此,相较于常规多级 AO 工艺,较高的污泥浓度和 DO 能够在低温条件下(11~12℃)保持较高的好氧反应程度。然而出水 TN 和 TP 去除效果较差,去除率仅分别为 32.37%±3.13%和 59.77%±0.94%,尚不能达到一级 A 排放标准。

表 2 对照试验组进出水水质

Tab. 2 Influent and Effluent Water Quality of Test Control Group

项目	COD _{Cr}	BOD ₅	TN	氨氮	TP
进水/(mg·L ⁻¹)	145.00±9.63	55.00±2.00	26.11±3.03	14.10±0.41	3.04±0.38
出水/(mg·L ⁻¹)	17.00±2.16	4.65±0.55	17.56±1.20	0.59±0.10	1.22±0.13
去除率	88.31%±0.91%	91.57%±0.69%	32.37%±3.13%	95.83%±0.59%	59.77%±0.94%
一级 A 标准/(mg·L ⁻¹)	≤50	≤10	≤15	≤5	≤0.5
地表 IV 类/(mg·L ⁻¹)	≤30	≤6	≤1.5	≤1.5	≤0.3

如图 4 所示,在对照试验下对各反应区的 DO 进行检测。当污泥充氧区内 DO 质量浓度保持在 6~7 mg/L、污泥回流比为 300% 下,厌氧区和缺氧 1 区内 DO 质量浓度分别为 2.0 mg/L 和 1.0 mg/L 左右,已经无法满足厌氧释磷和缺氧反硝化的 DO 环境要求。另外,本试验阶段污泥回流比较大,为常规多级 AO 工艺污泥回流比的 3 倍,即污水流经各反应区域的实际 HRT 将减小近 50%,因此,采用膜池污泥直接回流至生化池厌氧区,无法实现前端厌氧区和缺氧区较低的 DO 控制,导致出水水质无法达标。进一步对 3 段好氧区污泥浓度(MLSS 和 MLVSS)进行检测。如图 5 所示,MLSS 和 MLVSS 逐级降低且幅度较大,f 值(MLSS/MLVSS)也由 0.46

逐级降低至 0.38,远小于要求的 0.75,说明微生物占比相较于常规多级 AO 工艺有所下降,整体较高的 DO 和较低的进水浓度不足以支撑较高污泥浓度下的稳定运行。

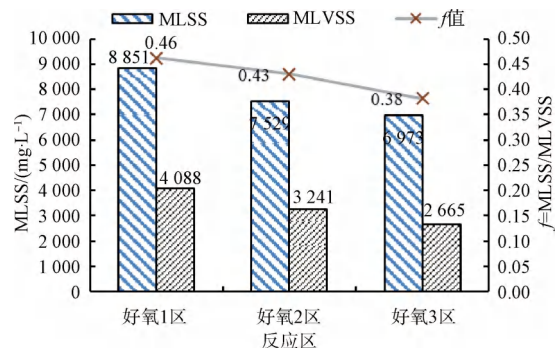


图 5 对照试验组各反应区污泥浓度变化

Fig. 5 Changes of Sludge Concentration in Each Reaction Zone of Test Control Group

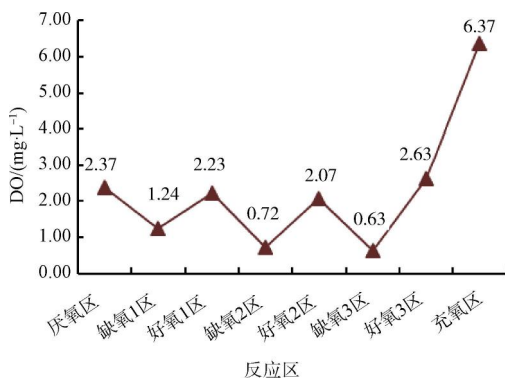


图 4 对照试验组各反应区 DO 控制

Fig. 4 DO Control in Each Reaction Zone of Test Control Group

2.2 污泥曝气回流方式研究

2.2.1 多种回流方式运行参数分析

在本试验阶段,调整污泥回流为预设的 4 种回流方式,其中回流 1 设为 300%,回流 2 设为 200%,并在各运行工况下对各反应区域进行 DO 和污泥浓度的对比分析。如图 6 所示,回流方式 1 至回流方式 3 将污泥充氧区 DO 质量浓度为 6~7 mg/L 的污泥单独回流至好氧 1 区或好氧 2 区后,调整该区域最低曝气量情况下,DO 质量浓度仍位于 3~4 mg/L,进

而导致后续缺氧区 DO 仅能维持在 0.6 mg/L 左右,无法进一步降低。在较大的污泥回流比下,污水进入各反应区域的切换时间缩短,加之碳源在前一段好氧区高 DO 环境下大量消耗,导致后续缺氧区 DO 无法达到要求的 0.5 mg/L 以下。而采用回流方式 4,将污泥等比例分别回流至好氧 1 区、好氧 2 区和好氧 3 区,能够有效降低高 DO 对各区域的冲击,能够保持前两段好氧区 DO 质量浓度位于 1.5~2.0 mg/L,后续缺氧区达到 0.2~0.3 mg/L。如图 7 所示,相较于对照试验组,各回流方式对于平衡各区域的污泥浓度均有作用,其中回流方式 2 和 3 条件下,好氧 1 区和好氧 2 区内的 MLSS 相差较小,回流方式 4 下各区域 MLSS 趋于平衡。

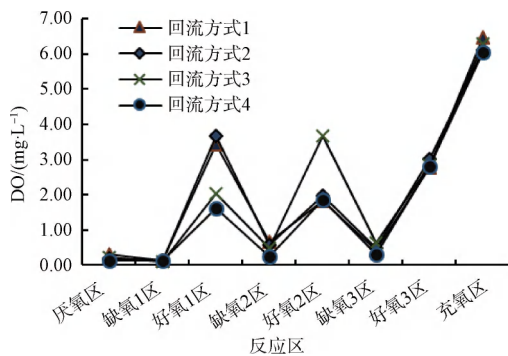


图 6 各运行工况各反应区 DO 控制

Fig. 6 DO Control in Each Reaction Zone under Each Operation Condition

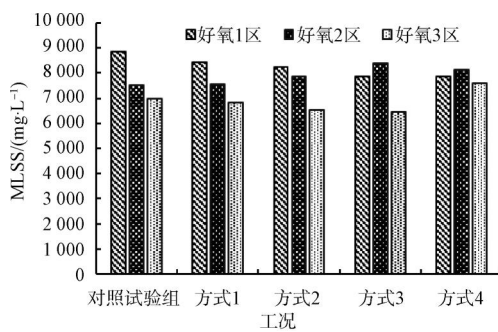


图 7 各运行工况下好氧区 MLSS 变化

Fig. 7 Variation of MLSS in Each Aerobic Zone under Each Operation Conditions

2.2.2 污染物去除性能分析

(1) COD_{Cr} 去除性能分析

试验装置对 COD_{Cr} 的去除效果如图 8 所示。进水 COD_{Cr} 质量浓度在 124~165 mg/L 时,4 种回流方式 COD_{Cr} 去除率均达到 90% 左右,出水 COD_{Cr} 能稳

定达到地表水 IV 类标准 (30 mg/L 以下),说明多种污泥回流系统下均达到了很好的生物降解性能。12 月 24 日水温由 15 °C 降至 9 °C,导致 COD_{Cr} 去除率有所降低,但仍保持了较高的处理效果,可见在较高的污泥浓度下多级 AO-MBR 工艺有较好的稳定性。然而经过两个月运行后,污泥 *f* 值位于 0.45~0.58,仍然低于要求的 0.75,还有时出现二沉池浮泥,可见较低的进水有机物浓度对于高污泥浓度的稳定运行还存在一定影响。通过计算,反应池内好氧区的食微比为 0.02 kg BOD₅/(kg MLSS·d),远小于传统活性污泥法要求的 0.2~0.4 kg BOD₅/(kg MLSS·d)。可见进水较低的 BOD₅ 无法满足较高的 MLSS 微生物生长,造成生化池内食微比失衡,部分微生物无法获取充足的有机物,导致老化现象。加大排泥后,浮泥现象有所缓解。因此,通过提高污泥浓度,在低温下能保持较高的污染物去除性能,但无法长期运行。对于污水厂的调控,可在冬季条件下加大污泥回流实现较高的污泥浓度,保证出水效果;水温升高后通过加大排泥,根据进水水质恢复到常规浓度,保证食微比平衡,以免造成污泥老化。

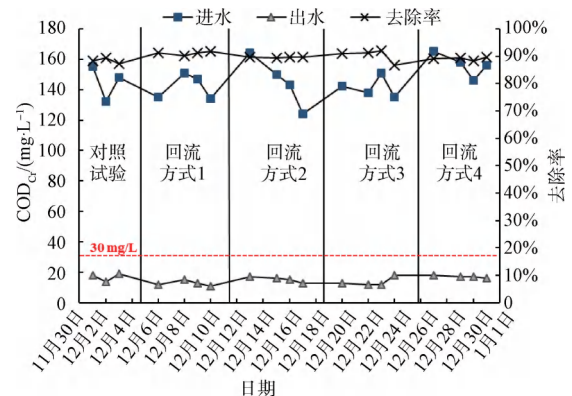


图 8 各运行工况 COD_{Cr} 变化及去除性能

Fig. 8 Variation and Removal Performance of COD_{Cr} under Each Operation Conditions

根据试验进水水质, BOD/COD_{Cr} 约为 0.38,可见难降解 COD_{Cr} 含量较大,而出水 COD_{Cr} 质量浓度能保持 20 mg/L 左右,说明多级 AO-MBR 工艺对这部分 COD_{Cr} 有一定去除能力,分析其原因可能是三级 AO 由于分段进水,有效降低了各 AO 反应单元的污染物负荷,增大了微生物对难生物降解 COD_{Cr} 的吸附作用。另外,好氧和缺氧的不断切换以及较高的污泥浓度,有助于将难降解大分子有机

物转化为小分子易降解形式,并进一步增大污泥活性,提高好氧反应性能,实现了更好的有机物去除能力^[7]。

(2) 氨氮去除性能分析

试验场地所在污水厂执行准IV类出水标准,氨氮质量浓度要求低于 1.5 mg/L。根据实际运行情况,在夏季出水可稳定达到 1.0 mg/L 以下,但冬季低温下会偶尔出现接近 1.5 mg/L。因此,在低温条件下探索出水氨氮稳定达标的条件至关重要。

如图 9 所示,在水温为 8~20 ℃,进水氨氮质量浓度在 13~18 mg/L 时,4 种运行工况下水均能稳定达到 1.5 mg/L 以下,去除率基本达到 95% 以上。在 12 月中旬和月底偶尔出现出水氨氮质量浓度达到 1.0 mg/L 以上的情况,原因可能是这两个时间段下,水温突降至 12 ℃ 以下,硝化细菌受到一定影响,但总体尚能达标。可见在 MLSS 为 8 000 mg/L 左右,控制好氧区 DO 质量浓度位于 1.6~2.8 mg/L 下能实现较高的氨氮去除性能。由于本试验进水氨氮浓度较低,基本能达到地表水IV类标准,若进水氨氮达到 20 mg/L 以上时,尚无法保证出水稳定达到 1.5 mg/L 以下。

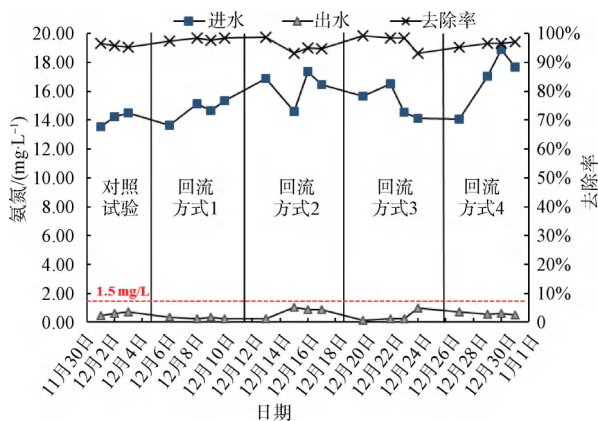


图 9 各运行工况氨氮变化及去除性能

Fig. 9 Variation and Removal Performance of Ammonia Nitrogen under Each Operation Conditions

(3) TN 去除性能分析

如图 10 所示,各回流方式下 TN 去除率由对照试验阶段的 32.37%±3.13% 显著提升到 50% 以上,进水 TN 质量浓度为 23~33 mg/L 时,能稳定达到一级 A 排放标准(15 mg/L 以下),说明在耦合 MBR 工艺的形式下,经过多级回流(膜池至好氧区、好氧区至缺氧区、缺氧区至厌氧区)能显著保证各反应

区的 DO 环境,增强脱氮效果。在回流方式 1 和回流方式 2 下 TN 去除率较稳定,均达到 50% 左右,但出水仅能勉强达标,偶尔还会出现超标现象;回流方式 3 和回流方式 4 下, TN 去除率显著提高,达到 60% 以上,出水 TN 平均值分别能达到 12 mg/L 和 10 mg/L,有较好的脱氮效果。回流方式 1 和回流方式 2 都是将高 DO 污泥回流至好氧 1 区,导致该区域和后续的缺氧 2 区 DO 较高(DO 质量浓度位于 0.6 mg/L 左右),对进水碳源的无效损耗较大,不利于反硝化过程,导致 TN 去除率较低。回流方式 3 下缺氧 2 区 DO 降低至 0.48 mg/L, TN 去除率相应提升了 24.38%,说明缺氧 2 区的 DO 控制对脱氮性能至关重要;回流方式 4 下同样达到了很好的 TN 去除效果,出水质量浓度达到 10 mg/L 以下。因此,水温低于 12 ℃ 时,通过增大 MLSS 到 8 000 mg/L 和 DO 的提高能稳定保证较高的脱氮性能。

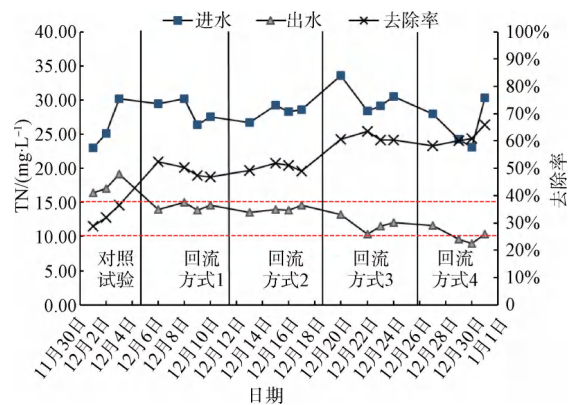


图 10 各运行工况 TN 变化及去除性能

Fig. 10 Variation and Removal Performance of TN under Each Operation Conditions

如图 11 所示,在单独的多级 AO 工艺试验阶段,缺氧 2 区的 NO₃-N 浓度下降较大,说明反硝化主要发生在缺氧 2 区,贡献度约占 65.76%。另外,在好氧 1 区至缺氧 3 区过程中还出现了 NO₂-N 的积累,说明出现了短程硝化反硝化反应。因此,为强化脱氮性能,应重点关注各反应区的 DO 控制,在保证出水 COD_{Cr} 和氨氮达标的前提下尽可能降低整体 DO,有助于实现短程硝化反硝化,提高进水碳源的有效利用,达到低 C/N 进水条件下的 TN 去除性能提升。

(4) TP 去除性能分析

如图 12 所示,进水 TP 质量浓度为 2.0~3.4 mg/L 时,回流方式 1 和 2 下出水 TP 质量浓度均在

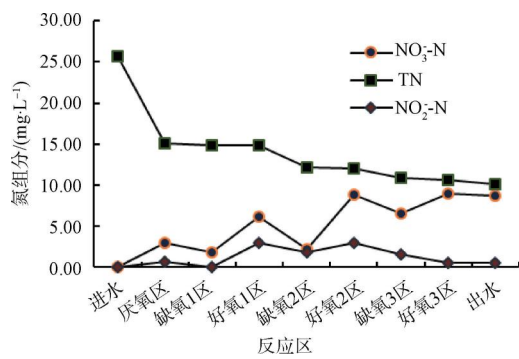


图 11 多级 AO 工艺典型工况氮组分沿程浓度变化

Fig. 11 Variation of Nitrogen Concentration along the Process under Typical Working Conditions of Multilevel AO Process

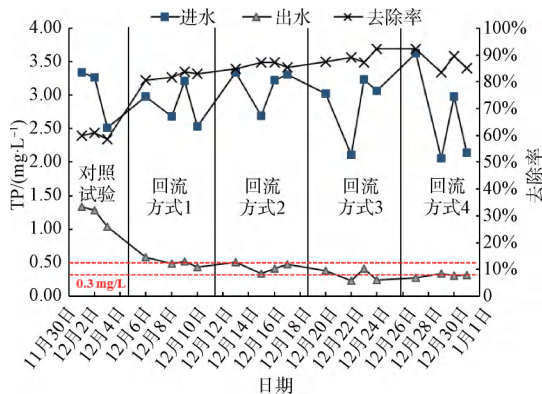


图 12 各运行工况 TP 变化及去除性能

Fig. 12 Variation and Removal Performance of TP under Each Operating Conditions

0.5 mg/L 左右,偶尔会出现超标现象;回流方式 3 和 4 下出水 TP 能稳定达到一级 A 标准,并且实现 0.3 mg/L 左右的出水效果。回流方式 3 和 4 下,均采用缺氧 3 区至厌氧区的回流,根据 TN 变化曲线,这两种回流形势下出水 TN 较低,回流后可有效降低进入厌氧池的硝酸盐,保证厌氧释磷碳源,有助于提高除磷性能。由于本试验未设置实际的膜分离装置,出水 SS 中尚存在部分 TP 无法去除,因此在实际应用中当进水 TP 位于 2~4 mg/L 时,去除率达到 85% 以上,可达到出水低于 0.3 mg/L 的要求。

综上,4 种回流方式对 COD_{Cr} 和氨氮均有较好的去除效果,回流方式 1 和 2 直接回流至好氧 1 区,将导致反应池内整体流速较大,污水流经各反应区的时间降低,增大好氧区与缺氧区内的过渡区,实际缺氧反应不足, TN 去除率较低。回流方式 3 和 4 在保证脱氮效率的同时有效保证了厌氧释磷,实现了

较好的脱氮除磷能力。另外,回流方式 4 下通过向各好氧区均回流一定比例的污泥,能有效保证好氧 3 区内的污泥浓度,在低温下实现更高的好氧硝化性能。因此,本试验推荐回流方式 4 为最佳回流形式,即 MBR 池回流分别回流至各好氧区前端,缺氧 3 区回流至厌氧区前端。

3 结论

(1) 多级 AO-MBR 工艺中膜池高 DO 浓度 (6~7 mg/L) 污泥回流若直接回流至厌氧区,将导致厌氧区和缺氧区均无法达到要求的 DO 环境,导致释磷和反硝化反应无法有效进行,氮、磷去除效果差。

(2) 在耦合 MBR 工艺的形式下,经过生化池多级回流能保证各反应区的 DO 环境,平衡各反应区的污泥浓度;为进一步强化脱氮性能,在保证出水 COD_{Cr} 和氨氮达标的前提下,可通过微氧控制,在低 C/N 进水条件下实现 TN 去除性能的提升。

(3) 在水温低于 12 °C 时,通过提高 MLSS 达到 8 000 mg/L,并采用回流方式 4,在进水 TN 质量浓度为 23~33 mg/L 时,能稳定保证去除率达到 60% 以上,实现出水达到 10 mg/L 左右;TP 去除率也较高,在进水 TP 质量浓度为 2~4 mg/L 时,去除率达到 85% 以上,实现出水低于 0.3 mg/L 的要求。

(4) 在冬季条件下可通过加大污泥回流,实现较高的污泥浓度,保证出水效果,但长期运行会导致污泥老化;水温升高后,根据进水水质可通过加大排泥恢复到常规污泥浓度,促进活性污泥再生。

参考文献

- [1] 李激, 罗国兵, 李冰冰, 等. 城镇污水处理厂一级 A 标准运行评估与再提标重难点分析[J]. 环境工程, 2020, 38(7): 1-12.
LI J, LUO G B, LI B B, et al. Operation evaluation of urban sewage treatment plants implemented grade I-A standard and analysis on empassis and difficulties in upgrading the discharge standard [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(7): 1-12.
- [2] 呼永锋, 王坤, 曹孟京, 等. A/O+MBR 工艺在分散式污水处理工程中的应用[J]. 水处理技术, 2022, 48(1): 150-152.
HU Y F, WANG K, CAO M J, et al. Application of AO+MBR process in decentralized wastewater treatment project [J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(1): 150-152.
- [3] 周友飞. 上海安亭污水处理厂三期全地下式扩建工程思考[J]. 给水排水, 2021, 57(2): 35-39.

(下转第 142 页)

- pretreatment of refractory organic nitrogen wastewater [J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(9): 21-25.
- [10] 马睿莉, 徐乐中, 陈茂林. 高有机氮废水 AO 工艺脱氮研究进展[J]. *工业水处理*, 2022, 40(10): 8-13, 19.
- MA R L, XU L Z, CHEN M L. Research progress on treatment of high organic nitrogen wastewater with AO process [J]. *Industrial Water Treatment*, 2022, 40(10): 8-13, 19.
- [11] 高廷耀, 顾国维, 周琪. *水污染控制工程*[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- GAO T Y, GU G W, ZHOU Q. *Water pollution control engineering* [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2015.
- [12] 栗文明, 白永刚, 周军, 等. 臭氧催化氧化应用于工业园区污水处理厂深度处理工艺的选择及设计[J]. *给水排水*, 2019, 55(5): 90-93.
- LI W M, BAI Y G, ZHOU J, et al. Selection and design of catalytic ozonation in wastewater advanced treatment of industrial park [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 55(5): 90-93.
- [13] 赵红兵, 余琴芳, 许江军, 等. 臭氧高级氧化对某工业园区污水处理厂生化出水处理试验[J]. *净水技术*, 2022, 41(6): 96-102.
- ZHAO H B, YU Q F, XU J J, et al. Experiment of ozone advanced oxidation process for biochemical effluent treatment of a WWTP in an industrial park [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(6): 96-102.

(上接第 98 页)

- ZHOU Y F. Discussion on the phase III underground expansion project of Anting wastewater treatment plant in Shanghai [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 57(2): 35-39.
- [4] 吴念鹏, 贾芳芳, 王国华, 等. 高出水标准地下式再生水厂运行难点探讨[J]. *给水排水*, 2019, 55(10): 42-46.
- WU N P, JIA F F, WANG G H, et al. Discussion on difficulties in operation of underground reclaimed water treatment plant with high discharge standard [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 55(10): 42-46.
- [5] 鲍任兵, 马民, 徐健, 等. AAO 及改良型工艺耦合 MBR 工艺应用研究综述[J]. *净水技术*, 2022, 41(3): 26-31, 62.
- BAO R B, MA M, XU J, et al. Technological research overview on AAO and modified process coupled with MBR [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(3): 26-31, 62.
- [6] 王敏, 张智, 陈杰云, 等. 不同流量分配比对多级 A/O 工艺去除有机物及脱氮的影响[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(4): 1430-1434.
- WANG M, ZHANG Z, CHEN J Y. Influence of different influent flow distribution ratios on biological nitrogen and carbon removal by multi-stages A/O process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(4): 1430-1434.
- [7] 朱兆亮, 门业伟, 刘昌明, 等. 多级 AO 工艺在印染废水处理提标改造中的应用及其启动运行问题[J]. *净水技术*, 2019, 38(12): 31-35.
- ZHU Z L, MEN Y W, LIU C M, et al. Application of multistage AO processes in upgrading and reconstruction for printing and dyeing wastewater treatment and the startup operation problem [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(12): 31-35.