

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.19.012

两段式 A/O - MBBR 工艺生物脱氮中试与系统优化

周小琳, 樊星, 毕学军, 陈珊珊, 王晓东, 刘旭阳, 邱晨,
兰杰, 赵洋, 康伟昌

(青岛理工大学环境与市政工程学院 城镇污水处理与资源化国家地方联合工程
中心, 山东 青岛 266033)

摘要: 针对城镇污水处理高标准脱氮的技术难题,构建了集高效生物脱氮与有机物去除为一体的两段式 A/O - MBBR 系统,开展以实际城镇污水为处理对象的中试研究。结果表明,在反应温度为 $(26.8 \pm 1.3)^\circ\text{C}$ 、平均有机负荷[以溶解性 COD(SCOD)计]和氨氮负荷分别为 338.57 和 108.58 $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 条件下,两段式 A/O - MBBR 系统出水 SCOD、氨氮、总无机氮(TIN)浓度分别为 (23.97 ± 1.84) 、 (0.47 ± 0.16) 、 (4.35 ± 0.81) mg/L 。通过两段式 A/O - MBBR 系统优化,可形成反应分区功能化生物膜,在原水碳源高效利用基础上,达到了城镇污水高效脱氮的目标。

关键词: 两段式缺氧/好氧; 移动床生物膜反应器; 生物脱氮; 硝化; 反硝化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4602(2021)19 - 0072 - 06

Pilot-scale Test and System Optimization of Two-stage A/O-MBBR Process for Biological Nitrogen Removal

ZHOU Xiao-lin, FAN Xing, BI Xue-jun, CHEN Shan-shan, WANG Xiao-dong,
LIU Xu-yang, QIU Chen, LAN Jie, ZHAO Yang, KANG Wei-chang
(State and Local Joint Engineering Research Centre of Urban Wastewater Treatment and Reclamation,
School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao
266033, China)

Abstract: A two-stage A/O-MBBR system integrating high-efficiency biological nitrogen removal and organic pollutants removal was constructed to solve the technical problem of high standard nitrogen removal in an urban sewage treatment, and the real urban sewage was treated in the pilot-scale test. When the reaction temperature was $(26.8 \pm 1.3)^\circ\text{C}$, the average organic load [calculated by dissolved COD (SCOD)] and ammonia nitrogen load were 338.57 $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ and 108.58 $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, respectively, the SCOD, ammonia nitrogen and total inorganic nitrogen in the effluent of the two-stage A/O-MBBR system were (23.97 ± 1.84) mg/L , (0.47 ± 0.16) mg/L and (4.35 ± 0.81) mg/L , respectively. The functional biofilm was formed in different areas by optimizing the two-stage A/O-MBBR system. The two-stage A/O-MBBR system achieved the goal of efficient nitrogen removal on the basis of the efficient utilization of the influent carbon source.

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101 - 002 - 006)
通信作者: 毕学军 E-mail: xuejunb@126.com

Key words: two-stage A/O; moving bed biofilm reactor (MBBR); biological nitrogen removal (BNR); nitrification; denitrification

近年来,随着国家《水污染防治行动计划》(简称“水十条”)与污染防治攻坚战“三年行动计划”等要求的提出,加快城镇污水处理设施建设成为改善水环境的重要措施,全国重点区域及流域对城镇污水处理厂出水水质提出了新的要求,尤其对有机物与氮指标的要求趋于更加严格。然而,我国不同地区城镇污水处理厂普遍存在 C/N 值低的问题,无法满足生物脱氮需求^[1],传统的活性污泥法、A²/O 等工艺难以达到理想的生物脱氮效果,开发经济、高效的生物脱氮工艺已成为当前城镇污水处理领域的研究热点。移动床生物膜反应器(MBBR)工艺具有容积负荷高、抗冲击能力强、污泥产量低等特点^[2-3]。笔者采用两段式缺氧/好氧(A/O)的运行模式,构建了集高效生物脱氮与有机物去除为一体的 MBBR 系统,通过以实际城镇污水为处理对象的中试,考察了系统生物脱氮与有机物去除效果,分析了各反应单元对主要污染物的去除能力,旨在为构建一种高效经济的城镇污水生物膜处理技术及其系统的设计与优化运行提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验用水

本中试在青岛市某城市污水处理厂进行,进水为该污水处理厂化学强化一级处理出水(即高密度沉淀池出水),进水水质:COD 为 88~344 mg/L,平均值为 199.21 mg/L;溶解性 COD(SCOD)为 76~284 mg/L,平均值为 157.71 mg/L;氨氮为 21.8~85.1 mg/L,平均值为 48.86 mg/L;总无机氮(TIN,氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮的总和)为 25.7~87.8 mg/L,平均值为 49.56 mg/L;TP 浓度为 0.5~1.6 mg/L,平均值为 1.03 mg/L;悬浮物(SS)为 60~150 mg/L,平均值为 109.88 mg/L;pH 值为 6~8,平均值为 7.26。

1.2 两段式 A/O-MBBR 系统的构建与运行条件

两段式 A/O-MBBR 系统的工艺流程如图 1 所示。该系统由串联式两段 A/O 反应单元组成,其中第一段 A/O 反应单元由 2 个缺氧 MBBR(A₁、A₂)与 3 个好氧 MBBR(O₃、O₄、O₅)组成,第二段 A/O 反应单元由 2 个缺氧 MBBR(A₆、A₇)与 1 个好氧 MBBR(O₈)组成。各反应器的有效容积均为 0.70 m³(直

径为 0.8 m、高为 1.7 m、有效水深为 1.4 m)。上述反应器均投加比表面积为 500 m²/m³ 的悬浮生物膜载体,其中缺氧与好氧反应器悬浮生物膜载体的填充率分别控制为 40% 与 50%。缺氧反应器采用机械搅拌,搅拌混合功率为 25 W/m³,溶解氧(DO)浓度均小于 0.5 mg/L;好氧反应器采用穿孔管曝气,为不使 DO 成为限制性因素,控制 DO 浓度为 6~8 mg/L,实际曝气的气水比为 8:1~10:1。系统采用连续进水方式,进水流量为 0.5 m³/h(12 m³/d),试验期间水温为(26.8±1.3)℃。该系统设置利用原水碳源的前置反硝化脱氮,即在第一段 A/O 反应单元设置由 O₅ 反应器至 A₁ 反应器的硝化液回流,回流比为 100%;同时设置后置反硝化脱氮,并按照 C/N 值(SCOD/NO₃⁻-N_{当量})为 5 的条件向 A₆ 反应器中投加外源性碳源(乙酸钠),其中 NO₃⁻-N_{当量} 为 NO₃⁻-N、0.60 倍的 NO₂⁻-N 与 0.35 倍的 DO 三者之和^[4]。两段式 A/O-MBBR 系统在本条件下连续稳定运行 70 d。

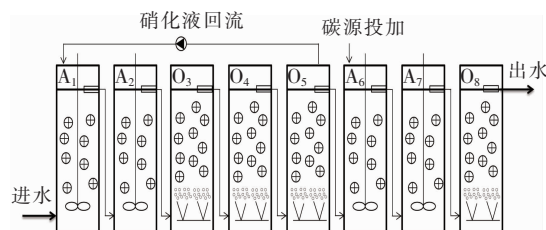


图 1 两段式 A/O-MBBR 工艺流程

Fig. 1 Flow chart of two-stage A/O-MBBR process

1.3 测定方法

COD、SCOD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TP 等常规指标采用《水和废水监测分析方法》(第 4 版)测定,其中用于测定 SCOD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TP 的水样经定性滤纸过滤后,取滤液进行测定;温度、DO 与 pH 值均采用便携式多参数水质分析仪测定;SS 采用便携式悬浮物浓度计测定。

2 结果与讨论

2.1 两段式 A/O-MBBR 系统的运行效果

由于悬浮生物膜载体表面附着生物膜的固有特性,其对非溶解性有机物的降解受系统有机负荷影响较大,当进水膜表面有机负荷率较高时,非溶解性有机物的水解转化率处于较低水平。由于本试验的

水解转化量仅为 5.25 mg/L, 因此针对有机物去除效果的分析, 忽略非溶解性 COD 水解转化的影响, 仅考察进出水 SCOD 的变化。

当两段式 A/O - MBBR 系统平均有机负荷为 $338.57 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ (以 SCOD 计, 下同)、平均氨氮负荷为 $108.58 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, 对 SCOD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TIN 的去除效果如图 2 所示。可知, 出水 SCOD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TIN 的平均浓度分别为 (23.97 ± 1.84) 、 (0.47 ± 0.16) 、 $(4.35 \pm 0.81) \text{ mg/L}$, 相应的平均去除率分别为 83.6%、98.5% 和 91.3%。

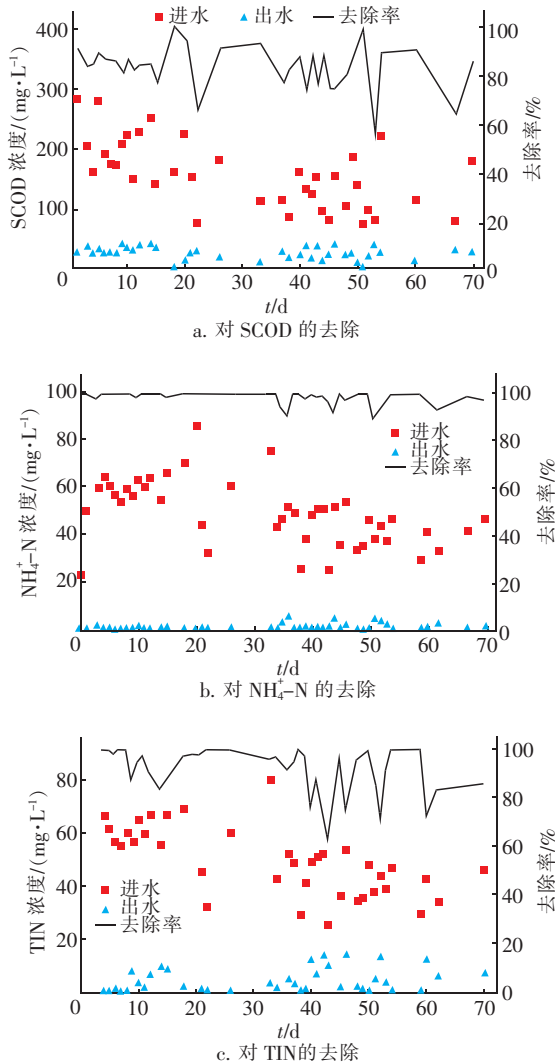


图 2 对 SCOD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TIN 的去除效果

Fig. 2 Removal efficiency of SCOD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TIN

系统出水 SS 为 $(101 \pm 49) \text{ mg/L}$, 主要为脱落的生物膜与进水中无法转化降解的非溶解性 COD, 同时由于纯膜 MBBR 系统不具备生物除磷能力, 因此对于纯膜 MBBR 系统, 可采用气浮池、高密度沉

淀池等高效泥水分离技术对 SS 进行澄清分离, 并根据出水总磷的去除目标进行协同化学除磷。

2.2 SCOD 去除过程分析

本系统中, 第一、二段 A/O - MBBR 反应单元的平均出水 SCOD 浓度分别为 25.77 和 23.97 mg/L, 其差值仅为 1.80 mg/L。同时由于第二段 A/O - MBBR 反应单元通过外加碳源来满足后置反硝化对电子供体的需求, 该反应单元以利用外源性碳源为主, 其对原水 SCOD 的去除贡献几乎可忽略不计。因此, 进水 SCOD 主要在第一段 A/O - MBBR 反应单元中被去除。由此分析第一段 A/O - MBBR 反应单元各反应器对原水 SCOD 的去除贡献, 结果如图 3 所示。可以看出, 进水中 SCOD 在缺氧 A_1 与 A_2 反应器内作为反硝化碳源被利用, 其去除贡献率达 64.6%; 反硝化残留的剩余 SCOD 在后续好氧反应器中被去除, 其中 O_3 、 O_4 、 O_5 反应器的去除贡献率分别为 30.1%、4.1%、1.2%。

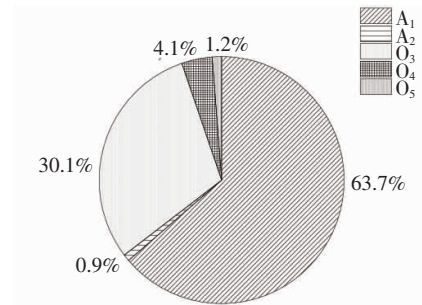


图 3 第一段 A/O - MBBR 反应单元各反应器对进水 SCOD 的去除贡献

Fig. 3 Removal contribution rate of influent SCOD by each MBBR in the first stage A/O-MBBR

O_3 、 O_4 、 O_5 反应器膜表面 SCOD 去除负荷率与膜表面 SCOD 负荷率的关系如图 4 所示。从图 4 可以看出, O_3 反应器膜表面 SCOD 负荷率为 $3.41 \sim 10.37 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 膜表面 SCOD 去除负荷率为 $0.68 \sim 7.37 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 其膜表面 SCOD 去除负荷率与膜表面 SCOD 负荷率呈一级反应 ($P < 0.01$); O_4 与 O_5 反应器膜表面 SCOD 负荷率分别为 $1.09 \sim 6.01$ 、 $0.78 \sim 5.58 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 而膜表面 SCOD 去除负荷率分别仅为 (0.35 ± 0.22) 、 $(0.08 \pm 0.08) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。因此, O_4 与 O_5 反应器的实际膜表面 SCOD 去除负荷率处于非常低的水平。从反应器布置结构来看, 好氧 O_3 反应器承担了好氧过程中有机物降解的主体功能, 该反应器内生物膜载体表面形

成了以异养微生物为主的好氧生物膜结构^[5],该结构性特征在一定程度上保证了 SCOD 在 O_3 反应器内的高效降解,从而使 O_4 与 O_5 反应器处于较低的有机负荷状态,为好氧硝化生物膜的生长创造了有利条件。

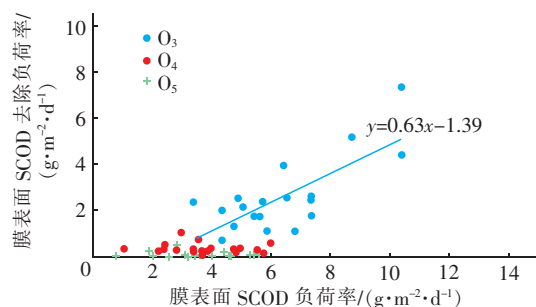


图 4 第一段 A/O-MBBR 反应单元各好氧反应器膜表面 SCOD 去除负荷率与膜表面 SCOD 负荷率的关系

Fig. 4 Relationship between SCOD biofilm surface removal rate and SCOD biofilm surface load in the aerobic MBBR of the first stage A/O-MBBR

2.3 $NH_4^+ - N$ 去除过程分析

本系统中,第一、二段 A/O-MBBR 反应单元平均出水 $NH_4^+ - N$ 浓度分别为 2.38 和 0.47 mg/L,即 $NH_4^+ - N$ 主要在第一段被去除,而第二段 A/O-MBBR 反应单元可以起到保障作用。第一段 A/O-MBBR 反应单元内, O_3 反应器的进水可生物降解 SCOD(BSCOD)与膜表面 $NH_4^+ - N$ 负荷率分别为 1.64 ~ 6.41、1.64 ~ 6.45 $g/(m^2 \cdot d)$,其对应的膜表面 $NH_4^+ - N$ 去除负荷率为 0.34 ~ 1.60 $g/(m^2 \cdot d)$,膜表面 $NH_4^+ - N$ 去除负荷率与进水膜表面 BSCOD 负荷率的关系如图 5 所示,其中 BSCOD 为进水 SCOD 与 O_5 反应器出水 SCOD 的差值。

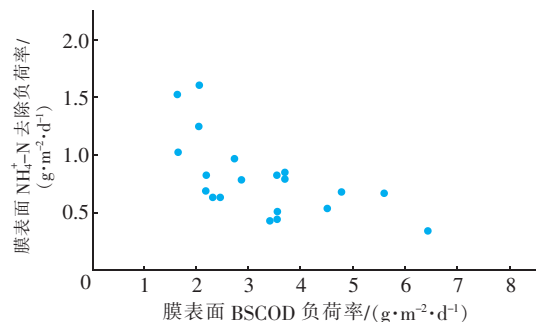


图 5 O_3 反应器膜表面 $NH_4^+ - N$ 去除负荷率与膜表面 BSCOD 负荷率的关系

Fig. 5 Relationship between $NH_4^+ - N$ biofilm surface removal rate and BSCOD biofilm surface load in O_3 reactor

由图 5 可以看出,膜表面 $NH_4^+ - N$ 去除负荷率随进水膜表面 BSCOD 负荷率的升高而呈下降趋势,当进水膜表面 BSCOD 负荷率为 1.64 $g/(m^2 \cdot d)$ 时, O_3 反应器的膜表面 $NH_4^+ - N$ 去除负荷率为 1.54 $g/(m^2 \cdot d)$;但当进水 BSCOD 膜表面负荷率为 6.41 $g/(m^2 \cdot d)$ 时,膜表面 $NH_4^+ - N$ 去除负荷率仅为 0.34 $g/(m^2 \cdot d)$ 。Sen 等^[6]发现,当 BSCOD 浓度水平较高时,MBBR 生物膜内的硝化能力受 BSCOD 影响较大,但并不受反应器内 $NH_4^+ - N$ 浓度的影响,与本中试获得的结果一致。

O_4 与 O_5 反应器的平均进水 BSCOD 浓度分别为 6.19、3.25 mg/L,均处于低膜表面有机负荷状态。 O_4 和 O_5 反应器膜表面 $NH_4^+ - N$ 负荷率与膜表面 $NH_4^+ - N$ 去除负荷率的关系如图 6 所示。

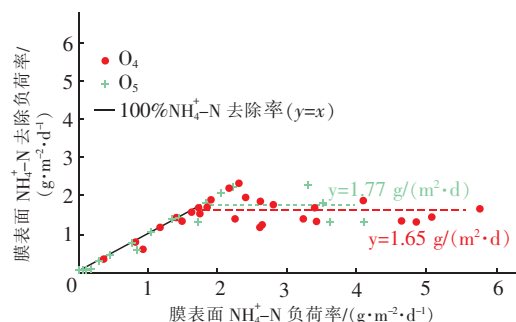


图 6 O_4 和 O_5 反应器膜表面 $NH_4^+ - N$ 去除负荷率与膜表面 $NH_4^+ - N$ 负荷率的关系

Fig. 6 Relationship between $NH_4^+ - N$ biofilm surface removal rate and $NH_4^+ - N$ biofilm surface load in O_4 and O_5 reactors

O_4 反应器膜表面 $NH_4^+ - N$ 负荷率为 0.37 ~ 5.78 $g/(m^2 \cdot d)$,当其小于 1.65 $g/(m^2 \cdot d)$ 时,膜表面 $NH_4^+ - N$ 去除负荷率与膜表面 $NH_4^+ - N$ 负荷率呈一级反应关系,斜率接近 1.0;当 O_4 反应器膜表面 $NH_4^+ - N$ 负荷率大于 1.65 $g/(m^2 \cdot d)$ 时,膜表面 $NH_4^+ - N$ 去除负荷率与膜表面 $NH_4^+ - N$ 负荷率呈现零级反应关系,并且膜表面 $NH_4^+ - N$ 去除负荷率维持在 1.65 $g/(m^2 \cdot d)$ 左右。 O_5 反应器膜表面 $NH_4^+ - N$ 负荷率为 0 ~ 4.11 $g/(m^2 \cdot d)$,当其小于 1.77 $g/(m^2 \cdot d)$ 时,膜表面 $NH_4^+ - N$ 去除负荷率与膜表面 $NH_4^+ - N$ 负荷率呈一级反应关系,斜率接近 1.0;当 O_5 反应器膜表面 $NH_4^+ - N$ 负荷率大于 1.77 $g/(m^2 \cdot d)$ 时,膜表面 $NH_4^+ - N$ 去除负荷率与膜表面 $NH_4^+ - N$ 负荷率呈现零级反应关系,并且膜表面 $NH_4^+ - N$ 去除负荷率维持在 1.77 $g/(m^2 \cdot d)$ 左右。

魏小涵等^[7]采用 MBBR 处理人工配制的废水,在反应温度为 22 ℃ 条件下,膜表面 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除负荷率最高可达 $1.66 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; Ashkanani 等^[8]采用 MBBR 处理实际污水,在反应温度为 35 ℃ 条件下,膜表面 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除负荷率为 $(1.42 \pm 0.06) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,均与本中试 O_4 与 O_5 反应器的膜表面 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除负荷率相当。

2.4 TIN 去除过程分析

本系统中, A_2 和 A_7 的出水 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ ($\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 之和) 分别为 2.78 和 1.90 mg/L, O_5 和 O_8 平均出水 TIN 浓度分别为 23.42 和 4.35 mg/L。计算结果表明, A_1 、 A_2 、 A_6 、 A_7 缺氧反应器对 TIN 的去除贡献率分别为 40.6%、7.6%、46.1%、5.7%。从去除 TIN 角度分析,在第一段 A/O - MBBR 反应单元硝化液回流比为 100% 的条件下,其利用进水碳源的前置反硝化 TIN 去除贡献率为 48.2%,可实现对原水碳源的高效利用。在前置反硝化基础上,第一段 A/O - MBBR 反应单元出流 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 进入第二段 A/O - MBBR 反应单元的缺氧反应器内,其通过投加外源性碳源进行反硝化,在 C/N 值为 5 的条件下,其对 TIN 的去除贡献率可达 51.8%。因此,两段式 A/O - MBBR 系统利用前置与后置反硝化的结合,可实现高效脱氮的目标。

本系统中各缺氧反应器的膜表面 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除负荷率与膜表面 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 负荷率的关系如图 7 所示。可知,各缺氧反应器的膜表面 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除负荷率与膜表面 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 负荷率均呈一级反应关系 ($P < 0.01$)。第一段 A/O - MBBR 反应单元中, A_1 反应器的膜表面 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 负荷率为 $1.26 \sim 2.24 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,对应的膜表面 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除负荷率为 $0.81 \sim 1.98 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 由于大部分 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 在 A_1 反应器中被去除,故 A_2 反应器膜表面 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 负荷率大大下降,为 $0.01 \sim 0.94 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,膜表面 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除负荷率仅为 $0.01 \sim 0.76 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。分析原因, A_1 反应器内缺氧生物膜可利用进水中的碳源进行反硝化脱氮。而 A_2 反应器仅可获得 A_1 反应器利用后的剩余碳源,基质浓度与可利用碳源水平均远低于 A_1 反应器,故导致 A_2 反应器的反硝化速率大大降低^[9]。因此,从系统优化角度出发,可考虑优化 A_2 反应器的设置。第二段 A/O - MBBR 反应单元作为后置反硝化,按照目标要求,其主要承

担第一段 A/O - MBBR 反应单元剩余 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的反硝化任务,本试验条件下 A_6 与 A_7 反应器的膜表面 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 负荷率分别为 $1.22 \sim 2.08$ 、 $0 \sim 0.74 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。根据已有经验,在 C/N 值为 5 的外加碳源条件下,其对应的膜表面 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除负荷率分别为 $1.01 \sim 2.08$ 、 $0 \sim 0.61 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

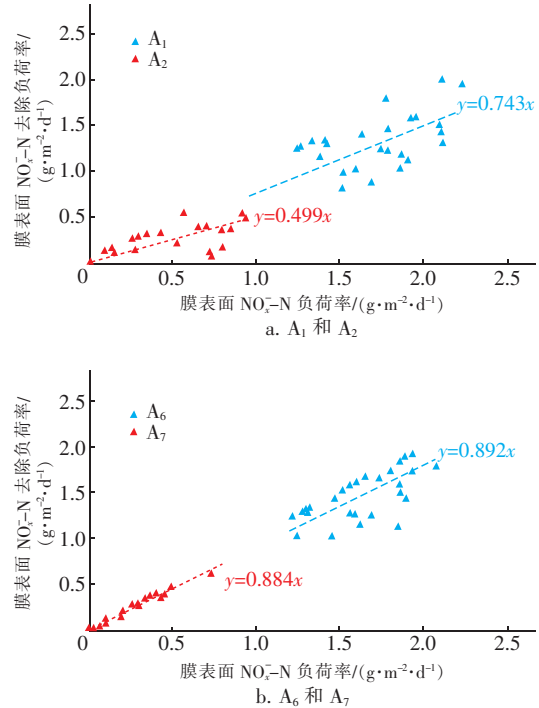


图7 各缺氧反应器膜表面 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 去除负荷率与膜表面 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 负荷率的关系

Fig. 7 Relationship between $\text{NO}_x^- - \text{N}$ biofilm surface removal rate and $\text{NO}_x^- - \text{N}$ biofilm surface load in each anoxic reactor

第一、二段 A/O - MBBR 的缺氧反应器分别利用进水有机物与外加乙酸钠作为反硝化碳源, A_1 与 A_2 反应器作为前置反硝化,利用进水中的有机物作为碳源进行反硝化,其平均 C/N 消耗 5.04,中值为 4.89。 A_6 与 A_7 反应器作为后置反硝化,利用外源性碳源进行反硝化,其平均 C/N 消耗 3.38,中值为 3.35,而剩余未被后置反硝化利用的有机物将在 O_8 反应器中得到进一步去除。

3 结论

① 针对城镇污水处理高标准脱氮的技术难题,构建了生物脱氮与有机物去除为一体的两段式 A/O - MBBR 系统。该系统各反应器内形成了反应分区功能化生物膜,在原水碳源高效利用的基础上,达到了城镇污水高效脱氮的目标。在反应温度为

(26.8 ± 1.3) $^{\circ}\text{C}$ 、平均有机负荷与氨氮负荷分别为 338.57 和 108.58 $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 条件下,两段式 A/O-MBBR 系统出水 SCOD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TIN 浓度分别为 (23.97 ± 1.84)、(0.47 ± 0.16)、(4.35 ± 0.81) mg/L ,平均去除率分别为 83.6%、98.5%、91.3%,具有良好的污染物去除效果。

② 两段式 A/O-MBBR 系统进水 SCOD 主要在第一段被去除,64.6% 的原水 SCOD 作为反硝化碳源在缺氧反应器中被利用,剩余有机物在好氧反应器中被去除。

③ 两段式 A/O-MBBR 系统进水氨氮主要在第一段好氧反应器中被去除, O_3 反应器的膜表面 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除负荷率随着 BSCOD 负荷的升高而降低,处于低有机负荷状态的 O_4 与 O_5 反应器的膜表面 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除负荷率可分别达到 1.65、1.77 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。 O_3 、 O_4 、 O_5 反应器的三级好氧串联结构实现了 SCOD 负荷与氨氮负荷在空间上的优化分配,为系统的硝化作用提供了有利条件。

④ 两段式 A/O-MBBR 系统在硝化液回流比为 100% 的条件下,第一段 A/O-MBBR 反应单元的缺氧反应器作为前置反硝化区,对 TIN 的去除贡献率为 48.2%,平均 C/N 消耗 5.04;第二段 A/O-MBBR 反应单元的缺氧反应器作为后置反硝化区,在投加外源性碳源的情况下,对 TIN 的去除贡献率为 51.8%,平均 C/N 消耗 3.38。

参考文献:

- [1] 景香顺,李鑫玮,张晓红,等. 低碳源市政污水处理优化运行的研究与工程应用[J]. 给水排水,2019,45(11):33-37.
JING Xiangshun, LI Xinwei, ZHANG Xiaohong, *et al.* Research and engineering application of optimized operation of municipal wastewater treatment with low carbon source [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(11): 33-37 (in Chinese).
- [2] YOUNG B, DELATOLLA R, KENNEDY K, *et al.* Post carbon removal nitrifying MBBR operation at high loading and exposure to starvation conditions [J]. Bioresource Technology, 2017, 239: 318-325.
- [3] 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).
- [4] RUSTEN B, HEM L J, ODEGAARD H, *et al.* Nitrogen removal from dilute wastewater in cold climate using moving-bed biofilm reactors [J]. Water Environment Research, 1995, 67(1): 65-74.
- [5] WANG X D, BI X J, HEM L J, *et al.* Microbial community composition of a multi-stage moving bed biofilm reactor and its interaction with kinetic model parameters estimation [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 218: 304-347.
- [6] SEN D, RANDALL C W. Improved computational model (AQUIFAS) for activated sludge, integrated fixed-film activated sludge, and moving-bed biofilm reactor systems, part I: semi-empirical model development [J]. Water Environment Research, 2008, 80(5): 439-453.
- [7] 魏小涵,毕学军,尹志轩,等. 温度和 DO 对 MBBR 系统硝化和反硝化的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 612-618.
WEI Xiaohan, BI Xuejun, YIN Zhixuan, *et al.* Effects of temperature and dissolved oxygen on nitrification and denitrification in MBBR system [J]. China Environmental Science, 2019, 39(2): 612-618 (in Chinese).
- [8] ASHKANANI A, ALMOMANI F, KHRAISHEH M, *et al.* Bio-carrier and operating temperature effect on ammonia removal from secondary wastewater effluents using moving bed biofilm reactor (MBBR) [J]. Science of the Total Environment, 2019, 693: 133425.
- [9] KIM H, KIM Y, HOANG T Q, *et al.* Application of real-time feedback control strategies based on effluent $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_x - \text{N}$ concentrations in an A^2/O process [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2013, 30: 1578-1587.

作者简介:周小琳(1989-),女,江苏沛县人,博士研究生,工程师,研究方向为水污染控制工程。

E-mail:zhouxiaolin2680@163.com

收稿日期:2020-11-26

修回日期:2021-01-30

(编辑:任莹莹)