



新型膜组件 MBR 启动运行 Anammox 工艺及膜污染控制

运红颖, 孟 皓, 邢芳华, 汪 涛

(河北工业大学能源与环境工程学院, 天津市清洁能源利用与污染物控制重点实验室, 天津 300401)

[摘要] 膜生物反应器(MBR)作为一种高效的厌氧氨氧化(Anaerobic ammonia oxidation, Anammox)反应器受到研究者的广泛关注。然而,膜污染问题制约了MBR在Anammox领域的工程应用。为了减缓膜污染的形成,设计了一种新型伞式膜组件,再在这种膜组件的基础上构建MBR用于启动运行Anammox工艺,通过形成特定的流场结构强化膜附近水流剪切力和水流速度,从而实现膜组件的自清洗,进而延长膜组件的使用周期。该反应器经55 d运行成功启动Anammox工艺,直到运行81 d才达到更换膜组件的条件(跨膜压力达到0.045 MPa)。结果表明,新型膜组件MBR不仅可以缩短Anammox工艺的启动周期,还可以有效缓解膜污染。扫描电镜结果表明,运行81 d的膜组件表面形成了明显的滤饼层,其主要污染物为具有花椰菜结构的厌氧氨氧化菌(AnAOB)及生长代谢产物。同时利用Ansys Fluent模拟工艺运行过程中伞式膜组件周围的流场结构,从流体动力学角度解释了伞式膜组件缓解膜污染的机理。研究表明,膜组件附近强化的水流剪切力和水流速度作用于展开的膜丝,显著减缓滤饼层的形成。

[关键词] 厌氧氨氧化;膜污染;膜生物反应器

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)01-0124-07

New-type membrane module MBR start and operate Anammox process and the control of membrane fouling

YUN Hongying, MENG Hao, XING Fanghua, WANG Tao

(Tianjin Key Laboratory of Clean Energy and Pollutant Control, School of Energy and
Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Membrane bioreactor(MBR), as an efficient Anammox reactor, has attracted extensive attention from researchers. However, membrane fouling restricts the engineering application of MBR in Anammox field. To slow down the formation of membrane fouling, a new-type umbrella membrane module was designed. And then, MBR was used to start Anammox process with this new-type membrane module, which could realize the automatic cleaning, and prolong life span by forming a specific flow field structure to strengthen near water flow velocity and shear force. The Anammox process was successfully started after 55 days of operation, and the condition for membrane module replacement(the transmembrane pressure reached 0.045 MPa) was not reached until 81 d of operation. The results showed that the new membrane module MBR could not only shorten the start-up period of Anammox process, but also effectively alleviate membrane fouling. Scanning electron microscopy(SEM) results showed that obvious cake layer was formed on the surface of the membrane module after 81 days of operation, and the main pollutants were AnAOB with cauliflower structure and their metabolites. At the same time, Ansys Fluent was used to simulate the flow field structure around the umbrella-shape membrane module during operation, and explained the mechanism how the module could alleviate membrane fouling from fluid dynamics perspective. The results showed that the formation of cake layer was significantly controlled by the enhanced shear force and velocity of water flow around the membrane module acting on the unfold membrane wire.

Key words: Anaerobic ammonia oxidation(Anammox); membrane fouling; membrane bioreactor

Anammox工艺作为一种绿色、节能的污水生物脱氮工艺,在处理高氨氮、低碳氮比的污水中发挥了巨大作用^[1-2]。其中在Anammox反应中起主导作用的功能菌被统称为厌氧氨氧化菌(Anammox bacteria, AnAOB)^[3]。目前发现的AnAOB多数属于浮霉菌门,因其对于环境因子变化尤其是温度、pH、游离亚硝酸盐以及溶解氧(Dissolved oxygen, DO)等因子的变化极其敏感,导致倍增时间长,进而导致Anammox启动时间较长,限制了Anammox工艺的工程应用^[4-6]。MBR因其高效的生物截留作用及较长的污泥停留时间可以有效减少菌种流失,实现Anammox工艺的快速启动和高效运行^[7-8]。

然而膜污染问题限制了MBR广泛的工程应用。微生物生长过程中产生的溶解性微生物产物(Soluble microbial product, SMP)和胞外聚合物(Extracellular polymeric substance, EPS)容易造成膜孔堵塞,进而引发膜组件污染,影响出水水质^[9-11]。物理清洗和化学清洗虽然可以作为被污染膜组件的清洗手段,但仍无法减缓膜污染的形成^[12]。Zuotao ZHANG等^[13]的研究表明,通过磁性载体强化的微生物固定化过程可以有效缓解微生物产物、有机污染物以及无机沉淀造成的膜污染。Mingda ZHOU等^[14]利用膜改性技术增加膜面亲水性,防止疏水分子黏附,进而减缓膜污染的形成。Chuansheng WANG等^[15]利用膜振动的方法减缓膜污染形成,同时提出控制膜污染形成的最佳振动速度为120 r/min,减少了膜清洗的费用。但考虑到上述膜污染缓解技术的成本问题,本试验对膜组件的形式进行改进,设计一种伞式膜组件,建立新型膜组件MBR,通过特定流场结构减缓膜污染速度,在实现Anammox工艺快速启动的同时也实现了膜污染的有效控制。伞式膜组件可为MBR在Anammox领域的长期应用提供一个新的思路。本研究通过跨膜压力监测结合SEM观察分析伞式膜组件膜污染情况及其机理,同时利用Ansys Fluent软件模拟分析伞式膜组件周围的流场结构,探究其膜污染控制机理。

1 材料与方法

1.1 实验装置和运行条件

Anammox-MBR反应装置见图1。
伞式膜组件由一束中空纤维膜丝组成,一端固定,连接出水管,称为固定端;另一端呈松散状,称为

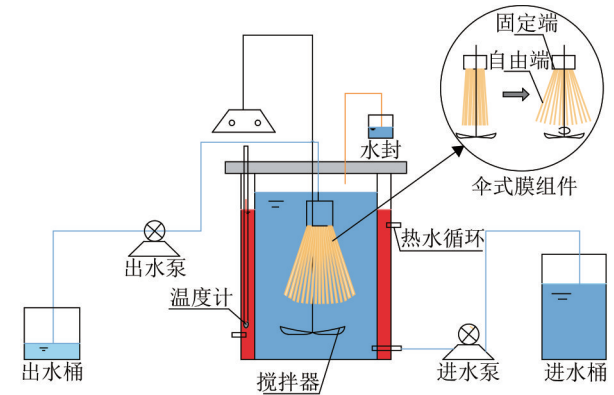


图1 Anammox-MBR反应装置

Fig. 1 Anammox-MBR equipment

自由端。由于反应器中搅拌器的作用,自由端的膜丝会以固定端为支点散开。这种膜组件形式避免了传统膜组件形式(如帘式、柱式中空纤维膜组件等)中悬浮固体在膜丝缝隙间堵塞的问题,通过特定的流场结构减缓膜污染的形成。本试验构建的伞式膜组件MBR用于启动运行Anammox工艺,该反应器记为Anammox-MBR。反应器有效容积为2.6 L,高径比为1.5:1。根据AnAOB适宜的生长代谢条件,反应器温度控制在32℃、pH维持在7.6~8.0且DO控制在0.05 mg/L以下以保证厌氧环境。反应器内部设置搅拌器,其转速控制在80 r/min范围,使污泥呈悬浮状态,保证微生物与基质充分接触^[16-18]。反应器外部用遮光布包裹以避免藻类生长对AnAOB活性的影响^[19]。

1.2 模拟废水与接种污泥

反应器采用人工模拟废水,通过投加适量的硫酸铵和亚硝酸钠为Anammox-MBR提供稳定的基质浓度,模拟废水的组分见表1。

表1 模拟废水组分

Table 1 The composition of simulated waste water	
组分	质量浓度/(mg·L ⁻¹)
NH ₄ ⁺ -N	50
NO ₂ ⁻ -N	50
CaCl ₂	226.5
KHCO ₃	1 250
MgSO ₄	97.5
KH ₂ PO ₄	25
FeSO ₄ ·7H ₂ O	25
EDTA-2Na	1.75
酵母膏	12.5

向模拟废水加入配制好的1.4 mL/L微量元素

液,其组分见表2。

表2 微量元素液的组分

Table 2 The composition of the trace element solution

组分	质量浓度/(mg·L ⁻¹)
EDTA	15 000
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	430
CoCl ₂ ·6H ₂ O	240
MnCl ₂ ·4H ₂ O	990
CuSO ₄ ·5H ₂ O	250
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	220
Na ₂ SeO ₄ ·10H ₂ O	210
Na ₂ WO ₄ ·2H ₂ O	50
H ₃ BO ₃	14

随后运行阶段采用亚硝化反应器实际出水作为 Anammox-MBR 进水,为其提供稳定的反应基质。装置启动运行过程中的实际工况见表3。

表3 MBR 反应器运行工况

Table 3 Operating conditions of MBR

阶段	运行时间	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·L ⁻¹)	NO ₂ ⁻ -N/ (mg·L ⁻¹)	HRT/h
启动阶段	第1天—第55天	50	50	24
	第56天—第65天	40.45~42.73	8.76~12.89	24
运行阶段	第66天—第73天	67.73~70.34	11.23~15.32	24
	第74天—第81天	85.94~87.33	12.45~17.29	24

同时使用天津市某污水处理厂中污泥龄较长的活性污泥作为接种污泥,污泥接种前进行 RTQ-PCR 检测,选择含有少量土著 Anammox 菌种(AnAOB 密度为 0.8×10¹¹ copies/g)的污泥作为接种污泥,同时利用重量法测定接种污泥的 MLSS 和 MLVSS 分别为 3 130 mg/L 和 2 500 mg/L。

1.3 水质分析方法

为更加精确地了解反应器启动过程的变化情况,按照《水和废水监测分析方法》对每日进出水的各项指标进行监测。其中,NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法,NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法(SP-721E 型分光光度计,中国),NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法(MI-41K 型紫外分光光度计,中国)^[20]。进出水 pH 利用便携式 pH 计(SX-620 型,上海三信)进行检测,水中 DO 使用溶解氧仪(JPBJ-608 型,中国雷磁)进行监测。

1.4 扫描电镜(SEM)

使用 SEM 可以在微米甚至纳米级别观察膜组

件的污染层结构,将运行 81 d 的伞式膜组件取样,预处理后使用 SEM 观察膜的表面形态。预处理包括 2.5% 戊二醛固定,磷酸缓冲溶液洗涤,随后将用不同浓度梯度的乙醇脱水以及真空干燥后的样品进行 SEM 分析^[10,21]。

1.5 流场结构模拟

Ansys Fluent 软件可以通过物理建模构建二维的流体模型,并进行数值计算以及条件优化,分析反应器内部流速、剪切应力变化^[22-23]。本试验将 Anammox-MBR 固相(活性污泥)和液相(模拟废水)视为“假想的均一混合相”,采用 Ansys Fluent 软件构建一个简易的二维模型,输入反应器运行过程中的真实数据(包括反应器尺寸、进出口流速、流体黏度等),模拟反应器内部流态变化。通过观察反应器运行过程中膜组件周围的液相速度场变化,分析流场变化对膜面的作用及膜污染的影响,探讨伞式膜组件 MBR 膜污染控制的机理。

2 结果与讨论

2.1 Anammox 启动运行过程

一个膜污染周期内 Anammox 启动及运行过程中氮素的变化见图2。

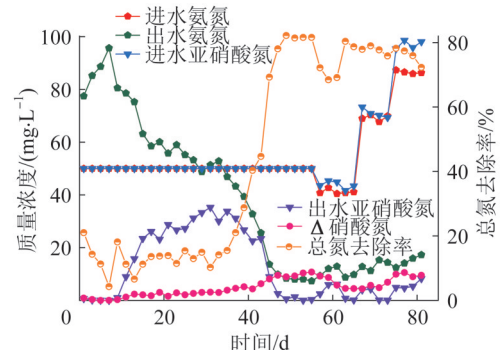


图2 Anammox 启动及运行过程中的氮素变化

Fig. 2 Nitrogen changes during Anammox start-up and operation

由图2可知,反应器经 34 d 运行初步表现出 Anammox 活性,55 d 成功启动 Anammox 工艺,启动过程中进水 NH₄⁺-N 和进水 NO₂⁻-N 均为 50 mg/L。根据启动过程中的菌种状态,一般可以将 Anammox 启动阶段分为三个时期:污泥转换期、停滞期以及活性表现期^[24]。反应器启动初期(第1天—第25天)为污泥转换期,由于模拟废水中未添加有机物,反应器中的异养菌短时间无法适应环境变化,部分微生物

细胞自溶^[25],释放出氨氮,造成出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 持续处于高质量浓度状态(55.23~95.67 mg/L)。同时出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 呈现先低后高的趋势即从0逐渐升至25 mg/L左右,且出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 一直处于较低水平(<5 mg/L),推测出现该现象的原因是反应器中存在内源反硝化^[26]。随后反应器进入停滞期(第25天—第33天),此时出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 维持在(50±5) mg/L,与进水相持平,说明菌种逐渐适应环境,自溶现象得到改善。出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 升高至30 mg/L左右,出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 开始积累,内源反硝化过程减弱表明Anammox活性未显现。活性表现期为33~55 d,反应运行至34 d,氨氮和亚硝酸氮同时被去除,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 分别低至7.35 mg/L和0.03 mg/L,说明表现出良好的Anammox活性。反应器运行至55 d时, $\text{NO}_2^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分别稳定在1.17和0.25左右,与理论数值接近,且氨氮和亚硝酸氮去除率分别达到85.30%和99.38%,总氮去除率达到81.6%,表明Anammox工艺成功启动,其启动时间少于以往部分研究(如表4所示)。

表4 几种不同反应器的启动时间及最大总氮去除负荷

Table 4 Starting time and load of several different reactors

反应器	启动时间/d	最大总氮去除负荷/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)
SBR ^[27]	64	0.26
SBBR ^[28]	107	0.58
SMBBR ^[25]	100	0.69
UASB ^[29]	75	0.18
悬浮填料填充床生物膜反应器 ^[30]	90	0.26
本研究伞式膜组件MBR	55	0.08

成功启动Anammox工艺后,采用亚硝化工艺实际出水作为其第56天—第81天的进水,反应器持续运行。此时亚硝化工艺产生的不同形式的氮素随其出水进入到Anammox-MBR中。进水基质浓度阶段性增加,Anammox工艺出水氮素浓度出现小范围波动,但仍维持在较低水平,出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 低于10 mg/L,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 低于18 mg/L,反应器运行至第77天,其总氮去除负荷达到最大,为0.16 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,此时总氮去除率达到82%。反应器共运行81 d,表现出良好的脱氮效果以及系统稳定性,说明伞式膜组件MBR可以快速启动Anammox工艺,同时具有良好的富集和截留菌种的能力。

2.2 膜污染情况

在Anammox-MBR运行的81 d中,跨膜压差(TMP)变化所反映的伞式膜组件膜污染的情况见图3。

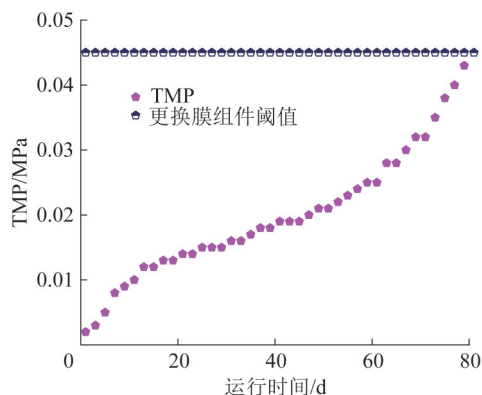


图3 伞式膜组件的TMP情况

Fig. 3 TMP condition of umbrella-shape membrane module

由图3可知,在反应初期,膜污染增长速率逐渐增加,膜组件表面空隙被细胞自溶产物以及内源反硝化产物堵塞,造成TMP不断升高。随着菌种对环境的逐渐适应,在Anammox启动过程的停滞期期间,上述活动逐渐变弱,膜污染的情况有所缓解,膜污染速度趋于稳定且缓慢。第34天AnAOB表现出活性后,反应器中菌种稳定性提高,生长代谢速率提升,伴随着产生的生长代谢产物堵塞膜孔,膜污染速度提高,膜污染加剧。第55天Anammox反应成功启动,此时伞式膜组件的跨膜压差为0.023 MPa,未达到更换膜组件的TMP阈值(0.045 MPa),说明在Anammox工艺启动过程中无需更换膜组件。随着反应的持续运行,内部菌种生长代谢作用增强,膜孔和膜表面发生的吸附等作用导致蛋白质及多糖类物质进一步增加,膜污染持续累积^[31-32]。反应器运行至第60天时,随着进水基质浓度的改变,膜污染速度提升,膜污染情况加剧,直至第81天达到更换膜组件的TMP阈值(0.045 MPa)。Zhao NIU等^[10]以浸没式MBR启动Anammox工艺,采用中空纤维膜,反应器运行50 d,TMP达到0.024 MPa,膜污染严重。Lingfeng NI等^[33]同样采用浸没式MBR启动Anammox工艺,使用板式膜组件,反应器运行31 d,TMP达到0.034 MPa,需要更换膜组件。相比于这些研究的膜污染情况,本试验采用的膜组件污染较轻。由此可见,伞式膜组件可以有效控制和显著缓解MBR

启动 Anammox 过程中的膜污染情况。

2.3 流场分析

研究表明,流体的剪切力可以有效清除沉积在膜表面上的污染物质^[34]。又有研究表明,流场对 MBR 膜污染有重要影响。因此,流场结构优化可以有效地缓解膜污染。使用 Ansys Fluent 软件模拟反应器运行过程中内部流体流速变化,模拟结果为动态过程。任选反应过程中搅拌器的一个旋转周期中的四个时间节点,观察其液相速度场情况,结果见图 4。

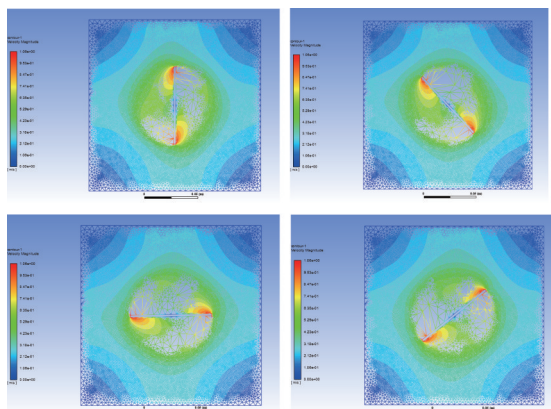


图4 反应器内部流速变化

Fig. 4 Velocity change inside the reactor

由图 4 可知,该图为俯视图,左侧标注为流体流速对照,颜色由蓝色到红色表示流速数值增大。可以明显观察到搅拌器运行时(逆时针转动),膜组件周围的流速变化情况,其周围流速均高于反应器四周流速,最大液相流速可达 1.0 m/s,高于以往传统 MBR 中膜组件附近的液相流速^[23,35],在反应器中间形成稳定的边界层涡旋区。在边界层涡旋区,有涡旋不断从搅拌器表面脱落,带动周围流体速度从作用点沿逆时针方向变化,引起速度梯度变化,相对应的剪切力较强。同时,尾流作用导致周围流体扰动剧烈,剪切力增强,有利于减缓伞式膜污染的形成。强化的水流剪切力和水流速度可以加快膜组件表面污染物的脱落,实现膜组件的自清洗。此外,新型伞式膜组件运行状态与传统形式膜组件相比有所不同。在反应器的运行过程中,伞式膜组件膜丝以固定端为支点展开,避免了传统形式膜组件固体性污染物在膜丝空隙堵塞的问题。

2.4 膜组件表面形态

MBR 运行 81 d 后,膜组件表面已经形成致密的滤饼层,其 SEM 见图 5。

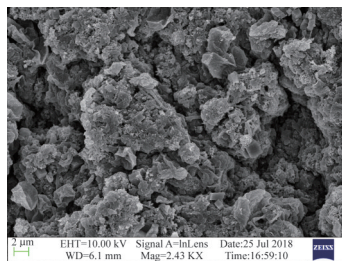


图5 第81天膜组件表面污染物的SEM

Fig. 5 SEM of membrane assembly at eighty-first day

研究表明,滤饼层污染物组成通常为微生物及其微生物产物^[13]。由图 5 可知,伞式膜组件膜面污染物主要是呈花椰菜结构的菌群及其生长代谢产物,这可能与悬浮状态的 AnAOB 在膜丝表面附着生长有关。而且,SEM 分析还表明,菌群形态以球状菌为主,掺杂着少量的丝状菌和杆菌。由球状菌或短杆菌形成的花椰菜结构是 AnAOB 菌群的特征之一^[36-37]。结合反应器的 Anammox 性能及附着在膜组件上菌群的微观形态特征,可以推测滤饼层上的菌种主要是 AnAOB。图中还存在一些胶状物,可能是 AnAOB 菌种的生长代谢产物。附着在膜丝表面的 AnAOB 及其生长代谢产物造成膜孔堵塞,导致 TMP 不断升高,进而形成滤饼层,造成膜污染。

3 结论

(1)使用一种新型优化的膜组件形式(伞式膜组件)构建 Anammox-MBR,能够在 55 d 内快速启动反应器。该反应器在表现出良好脱氮效果的同时还具有良好的耐膜污染特性。反应器 TMP 增长速度较慢,膜污染显著缓解。反应器经 55 d 运行,TMP 才达到 0.023 MPa。反应器运行到 81 d,TMP 才达到更换膜组件的阈值(0.045 MPa)。

(2)新形式的伞式膜组件可以通过自清洗的方式有效控制 Anammox-MBR 膜污染。流体力学分析表明,伞式膜组件周围形成强化的水流剪切力和水流速度,在一定程度上增加了对膜面的冲刷效果,可以有效减缓膜污染的形成;同时膜组件的使用过程中一端呈现松散状,可以有效避免膜丝间的黏连和堵塞等问题的发生。

参考文献

- [1] HUANG Dongqi, FU Jinjin, LI Ziyue, et al. Inhibition of wastewater pollutants on the anammox process: A review[J]. Science of the Total Environment, 2022, 803: 150009.
- [2] GAO Ruitao, PENG Yongzhen, LI Jianwei, et al. Nutrients removal from low C/N actual municipal wastewater by partial nitrification/anammox (PN/A) coupling with a step-feed anaerobic-anoxic-oxic (A/A/O) system[J]. Science of the Total Environment, 2021, 799: 149293.
- [3] LI Jialin, PENG Yongzhen, ZHANG Qiong, et al. Rapid enrichment of anammox bacteria linked to floc aggregates in a single-stage partial nitrification-anammox process: Providing the initial carrier and anaerobic microenvironment[J]. Water Research, 2021, 191: 116807.
- [4] 张亦弛, 乔雪姣, 余珂. 厌氧氨氧化细菌及其群落内细菌互作关系研究进展[J]. 微生物学通报, 2022, 49(2): 737-755.
ZHANG Yichi, QIAO Xuejiao, YU Ke. Characteristics of anammox bacteria and the interaction with other bacteria in anammox community: A review[J]. Microbiology China, 2022, 49(2): 737-755.
- [5] WANG Shanyun, PENG Yongzhen, MA Bin, et al. Anaerobic ammonium oxidation in traditional municipal wastewater treatment plants with low-strength ammonium loading: Widespread but overlooked[J]. Water Research, 2015, 84: 66-75.
- [6] TOMASZEWSKI M, CEMA G, ZIEMBIŃSKA-BUCZYŃSKA A. Influence of temperature and pH on the anammox process: A review and meta-analysis[J]. Chemosphere, 2017, 182: 203-214.
- [7] ZHANG Xiaojing, LI Dong, LIANG Yuhai, et al. Start-up, influence factors, and the microbial characteristics of partial nitrification in membrane bioreactor[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 54(3): 581-589.
- [8] XIE Guojun, LIU Tao, CAI Chen, et al. Achieving high-level nitrogen removal in mainstream by coupling anammox with denitrifying anaerobic methane oxidation in a membrane biofilm reactor[J]. Water Research, 2018, 131: 196-204.
- [9] SHEN Luwei, YAO Yuan, MENG Fangang. Reactor performance and microbial ecology of a nitrification membrane bioreactor[J]. Journal of Membrane Science, 2014, 462: 139-146.
- [10] NIU Zhao, ZHANG Zuotao, LIU Sitong, et al. Discrepant membrane fouling of partial nitrification and anammox membrane bioreactor operated at the same nitrogen loading rate[J]. Bioresource Technology, 2016, 214: 729-736.
- [11] NI Lingfeng, SHI Qin, WU Min, et al. Fouling behavior and mechanism of hydrophilic modified membrane in anammox membrane bioreactor: Role of gel layer[J]. Journal of Membrane Science, 2021, 620: 118988.
- [12] WANG Siyu, CHEW J W, LIU Yu. An environmentally sustainable approach for online chemical cleaning of MBR with activated peroxymonosulfate[J]. Journal of Membrane Science, 2020, 600: 117872.
- [13] ZHANG Zuotao, LIU Sitong, MIYOSHI T, et al. Mitigated membrane fouling of anammox membrane bioreactor by microbiological immobilization[J]. Bioresource Technology, 2016, 201: 312-318.
- [14] ZHOU Mingda, SHI Qin, WANG Yayi. Application of hydrophilic modified nylon fabric membrane in an anammox-membrane bioreactor: Performance and fouling characteristics[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(4): 5330-5344.
- [15] WANG Chuansheng, NG T C A, NG H Y. Comparison between novel vibrating ceramic MBR and conventional air-sparging MBR for domestic wastewater treatment: Performance, fouling control and energy consumption[J]. Water Research, 2021, 203: 117521.
- [16] TOMASZEWSKI M, CEMA G, ZIEMBIŃSKA-BUCZYŃSKA A. Significance of pH control in anammox process performance at low temperature[J]. Chemosphere, 2017, 185: 439-444.
- [17] HE Shilong, CHEN Yi, QIN Meng, et al. Effects of temperature on anammox performance and community structure[J]. Bioresource Technology, 2018, 260: 186-195.
- [18] JUNG J Y, KANG S H, CHUNG Y C, et al. Factors affecting the activity of anammox bacteria during start up in the continuous culture reactor[J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2007, 55(1/2): 459-468.
- [19] WANG Qintong, WANG Yulan, LIN Jinbiao, et al. Selection of seeding strategy for fast start-up of Anammox process with low concentration of Anammox sludge inoculum[J]. Bioresource Technology, 2018, 268: 638-647.
- [20] 李天皓, 徐云翔, 郭之哈, 等. 低温下废铁屑对厌氧氨氧化系统的影响[J]. 中国环境科学, 2022, 42(4): 1688-1695.
LI Tianhao, XU Yunxiang, GUO Zhihan, et al. Effect of iron scraps on anammox systems at low temperature[J]. China Environmental Science, 2022, 42(4): 1688-1695.
- [21] JIANG Chukuan, TANG Xi, FENG Fan, et al. Distinct membrane fouling characteristics of anammox MBR with low NO_2^- -N/ NH_4^+ -N ratio[J]. Science of the Total Environment, 2022, 817: 152994.
- [22] 韩杰, 朱彤, 黄永刚, 等. 浸没板式膜生物反应器中流体运动的数值模拟[J]. 化学与生物工程, 2008, 25(11): 44-47.
HAN Jie, ZHU Tong, HUANG Yonggang, et al. Numerical simulation of fluid movement in submerged flat type membrane bioreactor[J]. Chemistry & Bioengineering, 2008, 25(11): 44-47.
- [23] 王捷, 吴义, 罗南, 等. 用CFD方法模拟膜生物反应器内部流场及布气优化[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(2): 119-125.
WANG Jie, WU Yi, LUO Lan, et al. CFD simulation and optimization of internal hydrodynamic characteristics and aerating distribution in membrane bioreactor[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(2): 119-125.
- [24] YUAN Luzi, WANG Tao, XING Fanghua, et al. Enhancement of Anammox performances in an ABR at normal temperature by the

- low-intensity ultrasonic irradiation[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 73: 105468.
- [25] 姚雪薇, 邵贤明, 王康舟, 等. 不同基质条件下厌氧氨氧化SMBBR启动特性研究[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(10): 4049-4055.
- YAO Xuewei, SHAO Xianming, WANG Kangzhou, et al. Anammox SMBBR fast start-up with different substrates[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(10): 4049-4055.
- [26] 牛晚霞, 袁林江, 有小龙, 等. 进水亚硝氮限制下Anammox去除氨氮研究[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(7): 3212-3220.
- NIU Wanxia, YUAN Linjiang, YOU Xiaolong, et al. Study on removal of ammonia nitrogen by Anammox with or free of nitrite nitrogen[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(7): 3212-3220.
- [27] 张泽文, 李冬, 张杰, 等. 接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(12): 5215-5221.
- ZHANG Zewen, LI Dong, ZHANG Jie, et al. Effect of seeding single/mixed sludge on rapid start-up of an ANAMMOX reactor[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(12): 5215-5221.
- [28] 于英翠, 高大文, 陶彧, 等. 利用序批式生物膜反应器启动厌氧氨氧化研究[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(5): 843-849.
- YU Yingcui, GAO Dawen, TAO Yu, et al. Start-up of anammox in a sequencing batch biofilm reactor (SBBR) [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(5): 843-849.
- [29] 李苏仲, 薛同站, 李卫华, 等. UASB厌氧氨氧化启动研究及三维荧光分析[J]. *安徽建筑大学学报*, 2021, 29(4): 64-70.
- LI Suzhong, XUE Tongzhan, LI Weihua, et al. Study on anaerobic ammonia oxidation initiation of UASB and three-dimensional fluorescence analysis[J]. *Journal of Anhui Jianzhu University*, 2021, 29(4): 64-70.
- [30] 陈胜, 孙德智, 遇光禄. 填充床快速启动厌氧氨氧化反应器及其脱氮性能研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(3): 691-696.
- CHEN Sheng, SUN Dezhi, YU Guanglu. Rapid startup and nitrogen removal characteristic of anaerobic ammonium oxidation reactor in packed bed biofilm reactor with suspended carrier[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(3): 691-696.
- [31] 钱光磊, 谢陈鑫, 滕厚开, 等. 曝气对MBBR联合管式膜MBR处理生活污水的影响及膜污染分析[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(3): 1019-1027.
- QIAN Guanglei, XIE Chenxin, TENG Houkai, et al. The membrane fouling analysis and effect of aeration on the performance of MBBR combined tubular membrane MBR system treating domestic wastewater[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(3): 1019-1027.
- [32] 陈鹏, 张绍青, 张立秋, 等. MBR中膜污染表征手段的研究进展[J]. *工业水处理*, 2021, 41(8): 25-33.
- CHEN Peng, ZHANG Shaoqing, ZHANG Liqiu, et al. Research progress on characterization of membrane fouling in membrane bioreactors[J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(8): 25-33.
- [33] NI Lingfeng, SHI Qin, WU Min, et al. Fouling behavior and mechanism of hydrophilic modified membrane in anammox membrane bioreactor: Role of gel layer[J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 620: 118988.
- [34] BÖHM L, DREWS A, PRIESKE H, et al. The importance of fluid dynamics for MBR fouling mitigation[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 122: 50-61.
- [35] 于艳, 樊耀波, 徐国良, 等. 计算流体力学对膜生物反应器水力学特征的模拟研究[J]. *膜科学与技术*, 2011, 31(4): 9-16.
- YU Yan, FAN Yaobo, XU Guoliang, et al. Hydraulic simulation of MBR with computational fluid dynamics [J]. *Membrane Science and Technology*, 2011, 31(4): 9-16.
- [36] LI Ziyin, XU Xindi, XU Xiaochen, et al. Sustainable operation of submerged Anammox membrane bioreactor with recycling biogas sparging for alleviating membrane fouling[J]. *Chemosphere*, 2015, 140: 106-113.
- [37] ZHU Guibing, WANG Shanyun, MA Bin, et al. Anammox granular sludge in low-ammonium sewage treatment: Not bigger size driving better performance[J]. *Water Research*, 2018, 142: 147-158.
- [作者简介] 运红颖(1998—), 硕士。电话: 18722602246, E-mail: hongyingyun1998@163.com。通讯作者: 汪涛, 副教授。E-mail: wangtao82@hebut.edu.cn。
- [收稿日期] 2022-11-18(修改稿)