

进水负荷对厌氧氨氧化膜生物反应器的影响

李龙翔¹, 孟凡刚², 王新华^{1*}

(1. 山东大学环境科学与工程学院, 山东济南 250100; 2. 中山大学环境科学与工程学院, 广东广州 510275)

摘要 [目的] 研究进水负荷对厌氧氨氧化膜生物反应器脱氮性能和膜污染的影响。[方法] 运行期间, 进水的总氮负荷从 150 mg/L 逐步提高到 400 mg/L, 分别对污泥浓度、污泥粒径分布、氨氮和亚硝酸盐的去除率进行测定, 研究进水负荷的改变对反应器脱氮性能的影响。通过对膜组件的跨膜压差以及反应器内污泥混合液和膜表面污染物胞外聚合物 (EPS) 和溶解性微生物产物 (SMP) 中蛋白质和多糖含量的测定, 研究进水负荷的改变对膜污染的影响。[结果] 随着进水负荷的提高, 反应器始终保持良好的脱氮性能; 膜污染速率加快, 膜表面污染物 EPS 和 SMP 中蛋白质和多糖的含量均呈增加趋势, 说明蛋白质和多糖是影响膜污染的主要因素。[结论] 进水负荷的提高对反应器脱氮性能无明显的影响, 但会加剧反应器的膜污染。

关键词 厌氧氨氧化; 膜生物反应器; 进水负荷; 脱氮性能; 膜污染

中图分类号 X 703.1 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)13-0071-04

Effect of Influent Loading on Anammox Membrane Bioreactor

LI Long-xiang¹, MENG Fan-gang², WANG Xin-hua¹ (1. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100; 2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275)

Abstract [Objective] The effect of influent loading on nitrogen removal performance and membrane fouling on anammox membrane bioreactor (AnMBR) was investigated. [Method] The influent loading of TN was increased from 150 to 400 mg/L during the operating time of the reactor, the sludge concentration, particle size distribution of sludge, and the removal rates of ammonia and nitrite were measured respectively, to explore the influence of influent loading on the reactor. To explore the reason for membrane fouling, the transmembrane pressure (TMP) and the concentration of protein (PN) and polysaccharide (PS) in extracellular polymeric substance (EPS) and soluble microbial products (SMP) of the reactor and membrane foulants were further tested. [Result] With the increase of the influent loading, the reactor showed good performance for nitrogen removal, and the membrane fouling rate of the membrane module was accelerated, the concentration of protein (PN) and polysaccharide (PS) in extracellular polymeric substance (EPS) and soluble microbial products (SMP) were increased with the increasing of the influent loading, indicating that PN and PS were key factors to membrane fouling. [Conclusion] The increase of the influent loading showed no significant influence on nitrogen removal performance, but the membrane fouling was aggravated.

Key words Anaerobic ammonia oxidation; Membrane bioreactor; Influent loading; Denitrification performance; Membrane fouling

作为一种新型的生物脱氮工艺, 厌氧氨氧化工艺无需曝气和投加有机碳源, 污泥产量低, 被视为最为经济高效的生物脱氮工艺。近年来, 基于厌氧氨氧化工艺开发了多种新型脱氮工艺^[1-3], 目前已得到广泛应用^[4]。但由于工艺需要严格的条件限制以及厌氧氨氧化菌生长缓慢, 其广泛应用受到一定的限制^[5-7]。

膜生物反应器是将膜分离技术与生物反应器相结合的一种新型污水生物处理工艺, 具有高效固液分离、占地面积小、出水水质好、污泥产量低等优点^[8-9]。将厌氧氨氧化工艺与膜生物反应器相结合, 能够将厌氧氨氧化菌高效地截留在反应器内, 既克服了细菌生长缓慢的缺点, 又使得反应器具有优良的脱氮性能^[10-11], 但膜污染问题仍存在, 制约反应器的长期稳定运行和实际应用^[12-14]。同时, 在处理实际污水时, 进水负荷往往波动较大, 因此有必要研究不同负荷对厌氧氨氧化膜生物反应器脱氮性能和膜污染的影响。笔者研究了厌氧氨氧化膜生物反应器的脱氮性能和膜污染问题, 分析不同进水负荷对其造成的影响, 以为实际应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 反应器及操作条件 试验装置主体为一个内置式的厌

氧氨氧化膜生物反应器, 其结构见图 1。有效容积为 12 L, 水力停留时间为 5 h, 污泥停留时间为 120 d, 反应器整体置于 30 ℃ 水浴箱中并进行遮光处理。内置膜为 2 块相同的 PVDF 平板膜, 出水流量分别为 8 和 16 L/(m²·h), 竖直放置于液面以下。机械搅拌器置于 2 块膜中间, 保证反应器内泥水混合均匀。通过蠕动泵调节出水以保证 2 块膜的出水

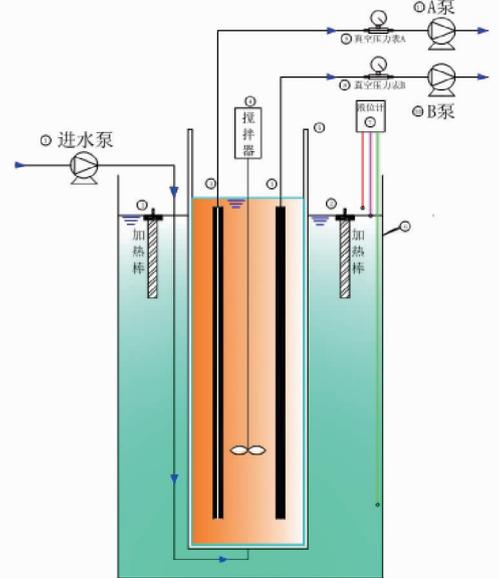


图 1 反应器结构

Fig. 1 Structure of the reactor

基金项目 国家自然科学基金项目 (51778344); 山东大学基本科研业务费专项 (2015JC025)。

作者简介 李龙翔 (1992—), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 研究方向: 环境生物技术。* 通讯作者, 副教授, 博士, 从事环境生物技术方面的研究。

收稿日期 2018-02-07

通量稳定。

1.2 进水组成 整个试验过程的进水均为合成废水,组成成分和对应浓度见表1,pH为7.5~7.8。进水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度比为1:1,在反应器长期稳定运行之后,将进水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度逐步从75 mg/L提高到200 mg/L,考察不同进水负荷对厌氧氨氧化膜生物反应器脱氮性能和膜污染的影响。

表1 合成废水成分及浓度

Table 1 Composition and concentration of synthetic wastewater mg/L

组成成分 (大量元素) Composition	含量 Content	组成成分 (大量元素) Composition	含量 Content
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	75 ~ 200	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.160
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	75 ~ 200	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.240
NaHCO_3	771.60	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.204
KH_2PO_4	79.20	$\text{NiCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.190
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	9.140	$\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.220
H_3BO_3	0.011	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.440
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.900	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.720

1.3 测定项目与方法

1.3.1 常规指标。反应器的常规指标包括溶解氧、pH、温度、污泥浓度(MLSS)、挥发性污泥浓度(MLVSS)、总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$),均根据标准方法进行测定。跨膜压差(TMP)通过连接在膜组件和蠕动泵之间的真空压力表读数得出。反应器内污泥的粒径分布使用 Mastersizer 3000 激光粒度分析仪(品牌/产地:Malvern/英国)测定。

1.3.2 溶解性微生物产物(SMP)和胞外聚合物(EPS)。取污泥混合液50 mL,置于2个离心管内,等重,置于离心机内3 500 r/min、4 °C离心15 min;离心后,将上清液用15 μm 的定性滤纸过滤,即得SMP;将去除上清液的污泥与50 mL 0.05%的NaCl溶液混合,倒入锥形瓶,置于60 °C的水浴锅加热30 min,加热后,将锥形瓶内的混合液等重分装到2个离心管内,在12 000 r/min、4 °C离心15 min后,将上清液用15 μm 的定性滤纸过滤,即得EPS。

SMP和EPS中的蛋白质含量采用Folin-酚试剂法^[15]测定,标准物为牛血清蛋白;多糖含量采用苯酚-硫酸法^[16]测定,标准物为葡聚糖。

1.3.3 膜阻力分布。膜污染阻力通常分为3个部分:膜自身固有阻力、吸附性污染阻力和滤饼层污染阻力,其表达式:

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_t} = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_f + R_c)} \quad (1)$$

式中, J 为膜通量[L/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$)], ΔP 为跨膜压差(Pa), μ 为过滤液体黏度(Pa·s), R_m 为膜自身固有阻力(m^{-1}), R_f 为吸附性污染阻力(m^{-1}), R_c 为滤饼层污染阻力(m^{-1})。

测定膜阻力时,对膜进行逐步清洗,具体步骤:当TMP达20 kPa时,将膜组件从反应器内取出并在固定水压下测定其纯水通量,通过公式计算得到总的膜阻力 R_t ;利用高压自来水对膜表面进行冲洗以去除滤饼层,在固定水压下测定其

纯水通量,通过公式计算得到滤饼层污染阻力 R_c ;之后在3‰ NaClO溶液中浸泡膜组件6 h,利用高压自来水冲洗膜表面后在固定水压下测定其纯水通量,通过公式计算得到吸附性污染阻力 R_f ;膜自身固有阻力 R_m 通过在固定水压下测定新膜的纯水通量计算得出。

2 结果与分析

2.1 反应器的运行 在反应器运行期间,进水中氨氮和亚硝态氮的浓度比始终保持1:1,浓度由最初的75 mg/L逐步提高到100、125、150和200 mg/L,其他运行参数均保持不变,温度严格控制在30~31 °C,溶解氧浓度始终低于0.04 mg/L,进水和反应器内pH平均值分别为7.64和7.96。反应器运行70 d后,反应器内MLSS由最初的4 842 mg/L增加到6 160 mg/L(图2),与之前报道的厌氧氨氧化菌生长速率缓慢的特性^[17]及该研究中实施的排泥策略相符合。MLVSS/MLSS始终稳定在0.5~0.6,显示污泥良好的生物活性。在反应器运行的第7、16、22、30、36、43、50、59和68天,取适量反应器内污泥测定粒径分布,结果见图3。正常情况下厌氧氨氧化菌的平均粒径随反应器的运行呈增大趋势,但显示污泥良好的生物活性。在反应器运行的第7、16、22、30、36、43、50、59和68天,取适量反应器内污泥测定粒径分布,结果见图3。正常情况下厌氧氨氧化菌的平均粒径随反应器的运行呈增大趋势,但由于机械搅拌的存在抑制了厌氧氨氧化菌的颗粒化进程,测定结果显示反应器内污泥的粒径分布和平均粒径并无明显变化。

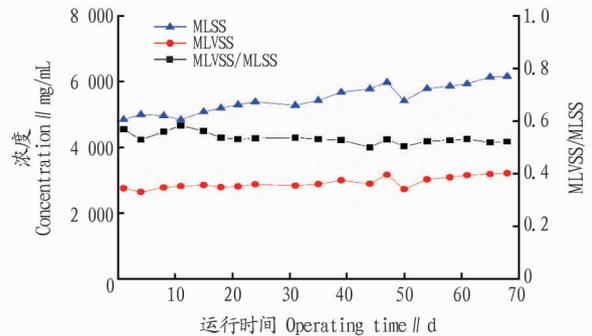


图2 反应器运行期间污泥浓度、挥发性污泥浓度和 MLVSS/MLSS 的变化

Fig. 2 Changes of MLSS, MLVSS and the ratio of MLVSS and MLSS during operation

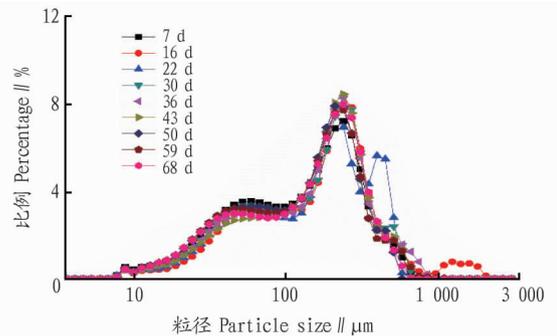


图3 反应器运行期间污泥粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution of sludge during operation

2.2 反应器的脱氮性能 由图4可知,在整个过程中,氨氮的出水浓度始终低于30 mg/L,去除率高于80%;亚硝态氮的出水浓度始终保持在在一个非常低的水平,去除率高于

95%,脱氮效果稳定,反应器运行状态良好。在每次提高进水负荷的时间点,去除率会有一个较为明显的下降,但短时间内即可恢复到负荷提升之前的去除效果,说明进水负荷的提高会在短时间内影响反应器的脱氮效果,原因可能是负荷突然提高导致厌氧氨氧化反应受到冲击,活性受到抑制,但短时间内即可恢复正常。总氮由氨氮和亚硝态氮组成,在反应器运行过程中,其变化趋势与氨氮及亚硝态氮相似,总氮去除率接近 80%。以上结果表明,在不断提高进水负荷的情

况下,反应器的脱氮性能始终保持在一个较高的水平,尽管在进水负荷发生变化的时间点会产生一定程度的波动,但短时间内即可恢复到之前的正常水平,说明进水负荷在一定范围内的提高并不会对厌氧氨氧化膜生物反应器的脱氮性能造成严重影响。

不同出水通量对厌氧氨氧化膜生物反应器的脱氮性能并无明显影响,因此可以排除不同出水通量对该研究所探究问题造成的干扰和影响。

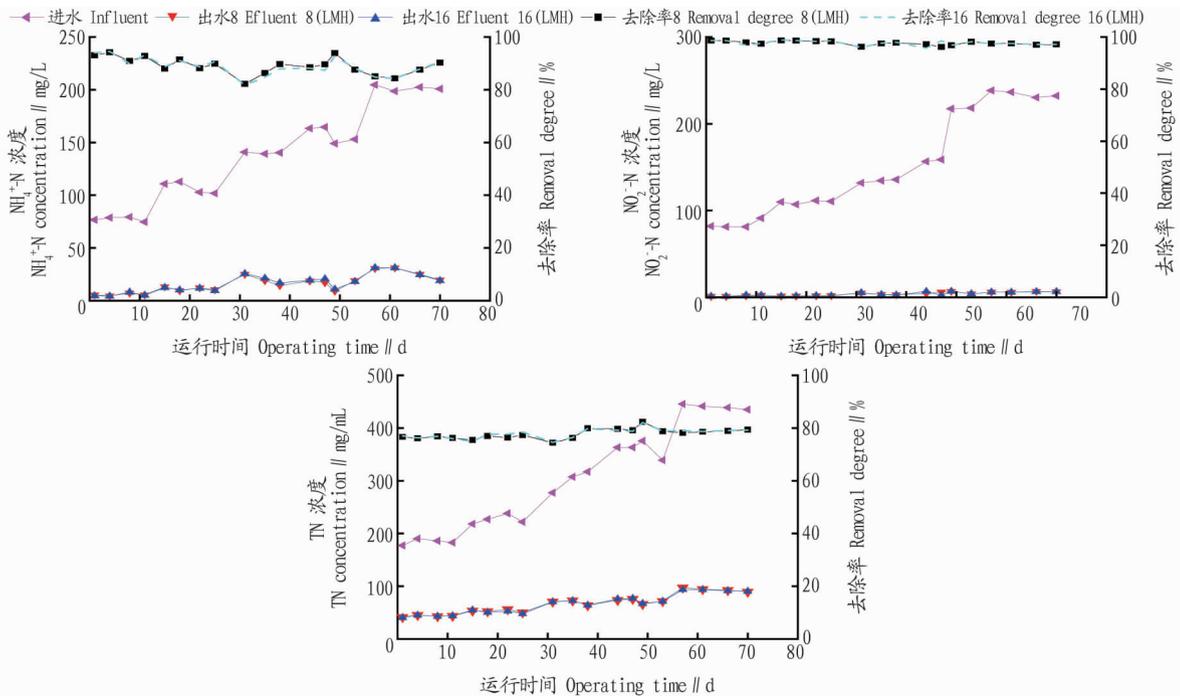


图4 反应器运行期间进出水中氨氮、亚硝态氮和总氮的浓度变化及去除效果

Fig. 4 Concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and TN in the influent/effluent and removal degree of nitrogen during operation

2.3 进水负荷对膜污染的影响 由图 5 可知,在整个运行过程中,在不同进水负荷下,跨膜压差的增长速率随进水负荷的增加有较小程度的加快,说明进水负荷的增加在一定程度上加剧了膜污染,这与之前的报道相符合。进水负荷影响污泥的主要性质,而污泥作为反应器的过滤介质,其性质对膜污染有直接影响,即进水负荷的变化导致污泥性质的变化,进而造成膜污染速率的不同^[18]。

在不同进水负荷阶段,通过测定跨膜压差为 0.02 MPa 时膜阻力分布情况,得知在各个阶段滤饼层阻力占膜污染物总阻力的百分比均超过 90%,说明在整个过程中滤饼层阻力始终为膜污染物阻力的主要来源。随着进水负荷的不断提高,滤饼层阻力占膜污染物总阻力的百分比并未发生明显变化,可见进水负荷的提高并未对膜阻力的分布产生直接影响。

研究表明,反应器的负荷变化并不会对膜污染产生直接影响,负荷的变化会引起反应器内污泥特性的变化,从而对膜污染产生影响^[8,19-21],包括污泥浓度、污泥粒径、EPS、SMP 在内的多种因素均会对膜污染造成不同程度的影响,该研究重点分析了 EPS 和 SMP 对膜污染造成的影响。微生物细胞表面的胞外聚合物 (EPS) 及其释放所产生的溶解性微生物产物 (SMP) 被认为是膜污染物的主要来源^[22-25],但 EPS 和 SMP 组成和形成机制的复杂性导致人们对膜污染机制的认识一直不明确。由图 6 可知,在进水负荷增加的时间点,EPS 和 SMP 中的多糖和蛋白质浓度均有一定程度的波动,原因可能是进水负荷的增加使得微生物的代谢速率发生了变化^[18],微生物自身为适应环境的改变而分泌了更多的 EPS 和 SMP。在反应器运行 70 d 后,EPS 和 SMP 中多糖和蛋白质的含量并

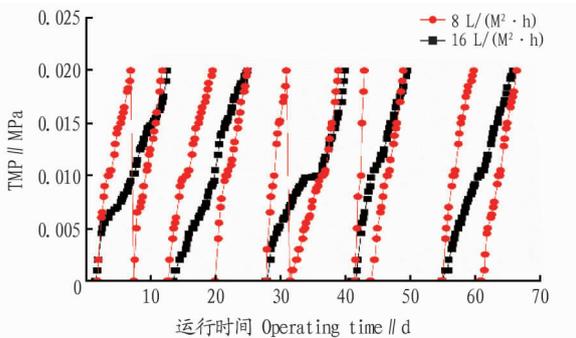


图5 反应器运行期间跨膜压差随时间的变化

Fig. 5 Changes of transmembrane pressure (TMP) during operation

未发生明显变化,说明在较低的进水负荷下,污泥混合液并未产生更多的EPS和SMP,整个系统运行稳定。

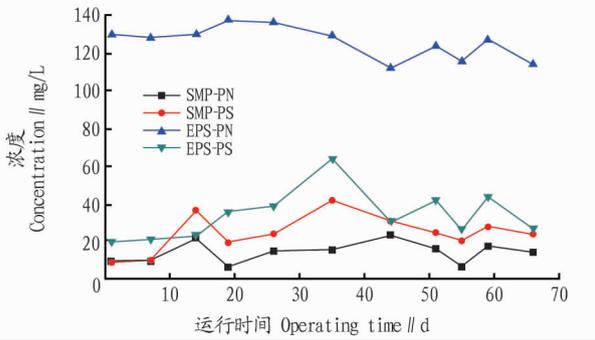


图6 反应器运行期间EPS和SMP中多糖和蛋白质浓度的变化

Fig.6 Concentration of polysaccharide and protein in EPS and SMP during operation

表2 不同进水负荷阶段膜污染物EPS和SMP中蛋白质和多糖的浓度

Table 2 Concentration of PS and PN in EPS and SMP at different influent loading phases

TN 浓度 mg/L	膜通量 LMH // L / (m ² · h)	TMP MPa	SMP - PN g/m ²	SMP - PS g/m ²	EPS - PN g/m ²	EPS - PS g/m ²
200	8	0.02	0.507 9	0.221 5	0.678 0	0.081 5
250	8	0.02	0.560 2	0.226 9	0.575 5	0.118 6
300	8	0.02	0.541 3	0.353 3	0.705 1	0.199 3
400	8	0.02	0.557 2	0.265 5	0.697 1	0.141 3
200	16	0.02	0.312 1	0.112 1	0.551 3	0.045 5
250	16	0.02	0.412 6	0.274 7	0.550 1	0.139 7
300	16	0.02	0.416 4	0.216 3	0.486 4	0.169 4
400	16	0.02	0.433 1	0.226 8	0.590 6	0.131 9

管在进水负荷发生变化的时间点会产生一定程度的波动,但在短时间内即可恢复到之前的正常水平,说明进水负荷在一定范围内的提高并不会对厌氧氨氧化膜生物反应器的脱氮性能造成严重的影响。

在不同进水负荷下,跨膜压差的增长速率随进水负荷的增加有较小程度的加快;在进水负荷增加的时间点,反应器内污泥混合液EPS和SMP中多糖和蛋白质的浓度均有一定程度的增加,在整个运行过程中,EPS和SMP中多糖和蛋白质的含量随进水负荷的提高有增加趋势;随着进水负荷的提高,膜污染物中EPS和SMP的浓度均呈增加趋势,说明进水负荷的提高会加剧厌氧氨氧化膜生物反应器的膜污染,EPS和SMP中蛋白质和多糖是造成膜污染的主要物质。

参考文献

[1] KUAI L, VERSTRAETE W. Ammonium removal by the oxygen-limited autotrophic nitrification-denitrification system [J]. Applied & environmental microbiology, 1998, 64(11): 4500 - 4506.

[2] VAN DER STAR W R L, ABMA W R, BLOMMERS D, et al. Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: Experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam [J]. Water research, 2007, 41(18): 4149 - 4163.

[3] SLIEKERS A O, DERWORT N, GOMEZ J L, et al. Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor [J]. Water research, 2002, 36(10): 2475 - 2482.

[4] VAN DE GRAAF A A, DE BRUIJN P, ROBERTSON L A, et al. Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing micro-organisms in a fluidized bed reactor [J]. Microbiology, 1996, 142(8): 2187 - 2196.

[5] STROUS M, KUENEN J G, JETTEN M S. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation [J]. Applied and environmental microbiology, 1999, 65

为探究EPS和SMP对膜污染的影响,分别在进水负荷的不同阶段,测定跨膜压差为0.02 MPa时污染物EPS和SMP中蛋白质和多糖的浓度,结果见表2。由表2可知,随着进水负荷的提高,在相同阶段膜污染物EPS和SMP中蛋白质和多糖的浓度均呈上升趋势,为造成膜污染的主要物质,蛋白质和多糖浓度的增加势必会加剧膜污染。在整个过程中,膜表面微生物自身分泌的EPS和污泥上清液的SMP分别是膜污染物在严重膜污染阶段蛋白质和多糖的根本来源,这也与之前研究结果一致^[14,26]。

3 结论与讨论

在反应器运行期间,进水的总氮负荷从150 mg/L逐步提高到400 mg/L,总氮的去除率接近80%,氨氮和亚硝酸盐氮的去除率分别高于80%和95%。在不断提高进水负荷的情况下,反应器的脱氮性能始终保持在较高的水平,尽

(7): 3248 - 3250.

[6] TROJANOWICZ K, PLAZA E, TRELA J. Pilot scale studies on nitrification-anammox process for mainstream wastewater at low temperature [J]. Water science & technology: A journal of the international association on water pollution research, 2016, 73(4): 761 - 768.

[7] REGMI P, HOLGATE B, FREDERICKS D, et al. Optimization of a mainstream nitrification-denitrification process and anammox polishing [J]. Water science & technology: A journal of the international association on water pollution research, 2015, 72(4): 632 - 642.

[8] 孟凡刚. 膜生物反应器膜污染行为的识别与表征[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

[9] ADHAM S, GAGLIARDO P, BOULOS L, et al. Feasibility of the membrane bioreactor process for water reclamation [J]. Water science & technology: A journal of the international association on water pollution research, 2001, 43(10): 203 - 209.

[10] 李子音. 厌氧氨氧化膜生物反应器处理高浓度氨氮废水性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.

[11] TRIGO C, CAMPOS J L, GARRIDO J M, et al. Start-up of the Anammox process in a membrane bioreactor [J]. Journal of biotechnology, 2006, 126(4): 475 - 487.

[12] DREWS A. Membrane fouling in membrane bioreactors—Characterisation, contradictions, cause and cures [J]. Journal of membrane science, 2010, 363(1/2): 1 - 28.

[13] OGNIER S, WISNIEWSKI C, GRASMICK A. Characterisation and modelling of fouling in membrane bioreactors [J]. Desalination, 2002, 146(1): 141 - 147.

[14] MENG F G, CHAE S R, DREWS A, et al. Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material [J]. Water research, 2009, 43(6): 1489 - 1512.

[15] LOWRY O H, ROSEBROUGH N J, FARR A L, et al. Protein measurement with the Folin phenol reagent [J]. Journal of biological chemistry, 1951, 193(1): 265 - 275.

表2 不同立地条件姬星美人生长情况

Table 2 The growth of *S. anglicum* under different site conditions

立地条件 Site condition	春季(3—5月) Spring(Mar. - May)	夏季(6—8月) Summer(Jun. - Aug.)	秋季(9—11月) Autumn(Sep. - Nov.)	冬季(12月—次年2月) Winter(Dec. - Feb.)
庭园 Garden	叶色深,植株矮壮	叶色深,植株矮壮,7—8月茎叶停止生长	叶缘浅红,植株矮壮	茎叶停止生长
坡地 Sloping field	叶色深,植株矮壮	叶色深,植株矮壮,7—8月茎叶停止生长	叶缘浅红,植株矮壮	茎叶停止生长
平地 Flat field	叶色深,植株矮壮	叶色深,植株矮壮,7—8月茎叶停止生长	叶缘浅红,植株矮壮	茎叶停止生长
阳光板大棚 Sun light green house	叶色深,植株正常	叶色深,植株正常,7—8月茎叶停止生长	叶缘浅红,茎正常	茎叶生长速度放缓

表3 同一立地条件不同基质中姬星美人生长情况

Table 3 The growth of *S. anglicum* under the same site condition in different substrates

立地条件 Site condition	基质1中生长情况 Growth state in substrate 1	基质2中生长情况 Growth state in substrate 2
庭园 Garden	春、秋季生长好,7—8月,冬季停止生长	春季生长较好,夏、秋、冬季生长差,25%姬星美人死亡
坡地 Sloping field	春、秋季生长好,7—8月,冬季停止生长	春季生长较好,夏、秋、冬季生长一般
平地 Flat field	春、秋季生长好,7—8月,冬季停止生长	春季生长较好,夏、秋、冬季生长差,20%姬星美人死亡
阳光板大棚 Sun light green house	春、秋季生长好,7—8月,冬季缓慢生长	生长较差

配以各种立地条件不同的管理措施,是姬星美人在园林绿化中作为地被植物应用的关键。同时,透水性能的好坏影响姬星美人生长。从该试验结果可知,30%田园土+40%青石+30%泥炭土是姬星美人最佳栽培基质。姬星美人能耐-11℃低温,因此适宜在长江流域及其以南地区露地栽植。该研究为姬星美人在园林绿化中的应用提供了依据。

参考文献

- [1] 王成聪. 仙人掌与多肉植物大全[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2011.
[2] 成雅京,赵世伟,揣福文. 仙人掌及多肉植物赏析与配景[M]. 北京:化

学工业出版社,2008.

- [3] 谢维淼. 多肉植物栽培原理与品种鉴赏[M]. 上海:上海科学技术出版社,2011.
[4] 宋正达,朱洪武,陈梅香. 景天科多肉胧月月在立体绿化中的应用研究[J]. 绿色科技,2015(3):90-91.
[5] 宋正达,卞咏梅. 立体绿化与无土基质[J]. 江苏绿化,1997(2):24.
[6] 宋正达,陈梅香. 多肉植物蒂亚定制栽培与色彩变化的研究[J]. 陕西农业科学,2016,62(10):16-17.
[7] HARTMAN H E K. Illustrated handbook of succulent plants:Crassulaceae[M]. Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K:Springer-Verlag,2001.
[8] 宋正达,朱洪武,陈梅香. 室内大厅立体绿化的植物材料及基质的选择[J]. 绿色科技,2013(10):107-108.

(上接第74页)

- [16] DUBOIS M, GILLES K, HAMILTON J K, et al. A colorimetric method for the determination of sugars[J]. Nature, 1951, 168(4265):350-356.
[17] VAN DER STAR W R L. Growth and metabolism of Anammox Bacteria[D]. Delft, The Netherlands; Delft University of Technology Department of Biotechnology Environmental Biotechnology Group, 2008.
[18] 刘阳. 胞外聚合物对膜污染影响的解析研究[D]. 大连:大连理工大学, 2007.
[19] NAGAOKA H, YAMANISHI S, MIYA A. Modeling of biofouling by extracellular polymers in a membrane separation activated sludge system[J]. Water science & technology, 1998, 38(4/5):497-504.
[20] 张树国, 顾国维, 吴志超. 膜生物反应器中污泥特性对膜污染的影响研究[J]. 工业水处理, 2003, 23(12):8-12.
[21] 陈学民, 马雯雯, 伏小勇, 等. 污泥特性对膜污染的影响及膜表面污染

特征[J]. 水处理技术, 2011, 37(3):52-56.

- [22] 李绍峰, 崔崇威, 黄君礼. 胞外聚合物 EPS 对 MBR 膜污染的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(2):266-269.
[23] WANG Z W, WU Z C, TANG S J. Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor[J]. Water research, 2009, 43(9):2504-2512.
[24] MENG F G, ZHANG S Q, OH Y, et al. Fouling in membrane bioreactors: An updated review[J]. Water research, 2017, 114:151-180.
[25] NAGAOKA H, UEDA S, MIYA A. Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge process[J]. Water science & technology, 1996, 34(9):165-172.
[26] MENG F G, ZHOU Z B, NI B J, et al. Characterization of the size-fractionated biomacromolecules; Tracking their role and fate in a membrane bioreactor[J]. Water research, 2011, 45(15):4661-4671.

科技论文写作规范——引言

扼要地概述研究工作的目的、范围、相关领域的前人工作和知识空白、理论基础和分析、研究设想、研究方法和实验设计、预期结果和意义等。一般文字不宜太长,不需做详尽的文献综述。在最后引出文章的目的及试验设计等。“引言”两字省略。