DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.02.002

水质条件对厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的影响

李 冬[1],田海成[1],梁瑜海[1],范 丹[1],张 杰[1,2]

(1.水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室(北京工业大学),北京 100124;
2.城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学),哈尔滨 150090)

摘 要:为研究水质条件对厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的影响,采用 16 个 SBR 反应器研究同周期内基质利用阶段与基质匮乏阶段 EPS 含量的变化以及总氮质量浓度、IC/TN、COD/TN 对于厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的影响.结果表明,同周期内,基质利用阶段的 EPS 含量不断升高,基质匮乏阶段 EPS 含量不断降低;总氮质量浓度为 35~280 mg/L 时,提高总氮质量浓度可以提高 EPS 的含量,总氮质量浓度>280 mg/L 时 EPS 含量有所减少;IC/TN 为 0.01~0.2 时,EPS 及其各组分含量随无机碳质量浓度的升高而增加,IC/TN>0.2 时,无机碳质量浓度对于 EPS 及其各组分含量无明显影响;COD/TN<0.5 时,有机物对于 EPS 含量具有促进作用,COD/TN>0.5 时,有机物的提高对于 EPS 含量有抑制作用.在厌氧氨氧化颗粒污泥工艺的实际运行过程中,应避免过长的基质利用阶段与基质匮乏阶段,总氮质量浓度应保持在 150~210 mg/L,无机碳质量浓度应保持在 IC/TN为 0.1~0.2,有机物质量浓度应保持在 COD/TN<0.5.

关键词:厌氧氨氧化;EPS 含量;影响因素;颗粒污泥;微生物活性

中图分类号:X703 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2017)02-0006-07

Effect of water quality of influent on the content of extracellular polymeric substances in anammox granule sludge

LI Dong[1], TIAN Haicheng[1], LIANG Yuhai[1], FAN Dan[1], ZHANG Jie[1,2]

(1.Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering(Beijing University of Technology), Beijing 100124, China;2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment (Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China)

Abstract: Content of EPS affects not only the formation and stability of anammox granular sludge, but also the performance of reactor. To study the effect of influent water quality on the EPS content, sixteen SBR reactors with different total nitrogen concentrations, different IC/TN ratios and different COD/TN were operated and compared. Experimental results indicated that the content of EPS increased during the substrate utilization phase, but declined under the shortage phase. Specifically, the EPS content increased slighty with the increasing of total nitrogen concentration from 35 to 280 mg/L, however, it decreased significantly once the total nitrogen concentration exceeded 280 mg/L. With a IC/TN of 0.01-0.2, the content of EPS increased with a continuous input of inorganic carbon, but the inorganic carbon concentration had no significant effect on EPS content when IC/TN>0.2. Under the condition of COD/TN<0.5, higher organic matter promoted EPS formation, but it inhibited EPS formation when COD/TN>0.5. Thus, long substrate utilization phase and the shortage phase should be avoided during the operation of anammox reactor, and the total nitrogen concentration should be maintained between 150-210 mg/L, IC/TN should be 0.1-0.2, COD /TN should be lower than 0.5.

Keywords: anammox; extracellular polymeric substances content; factors;granular sludge;microbial activity

厌氧氨氧化工艺(anaerobic ammonium oxidation,ANAMMOX)

$$NH_4^+ + 1.32\ NO_2^- + 0.066\ HCO_3^- + 0.13\ H^+ \longrightarrow 1.02\ N_2 + 0.26\ NO_3^- + 0.066\ CH_2O_{0.5}N_{0.15} + 2.03\ H_2O,$$

由于具有能源消耗量低、无需外加有机碳源、污泥产量低等优点而成为当前研究的热点.厌氧氨氧化菌(AnAOB)生长速率缓慢[1],因此,如何实现 AnAOB 的快速富集与有效持留菌体成为制约其工程应用的关键.颗粒污泥技术由于可以有效解决污泥流失的难题,而成为厌氧氨氧化研究应用的主要形式[2-5].而胞外聚合物(extracellular polymeric substances,EPS)是实现颗粒污泥快速形成与稳定维持的关键因素之一,其主要成分是胞外多糖(ploysaccharide,PS)和胞外蛋白(protein,PN).EPS 的形成受水质条件、反应器运行方式、基质消耗速

收稿日期:2015-08-15
基金项目:北京市青年拔尖团队项目(2014000026833TD02)
作者简介:李 冬(1976—),女,教授,博士生导师;
张 杰(1938—),男,教授,中国工程院院士
通信作者:李 冬,lidong2006@ bjut.edu.cn

率以及优势菌种的代谢水平等多种因素影响[6]，同时，EPS 也发生水解并在基质匮乏时充当碳源和能源物质被消耗[7]，因此，反应器内的 EPS 含量是产生与消耗的综合表征.目前，国内外对于 EPS 的研究主要集中于好氧颗粒污泥领域[8-12]，而针对厌氧氨氧化颗粒污泥这种厌氧自养菌形成的颗粒污泥的 EPS 研究较少，且主要侧重于 EPS 对于颗粒污泥快速形成的作用研究[13-17]，而关于水质条件对厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的影响方面的研究较少.

本实验通过向 16 组完全相同的 SBR 反应器分别接种稳定运行的厌氧氨氧化颗粒污泥，研究同一周期内 EPS 变化以及不同总氮质量浓度、IC/TN、COD/TN 对厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的影响，以期进一步明晰水质条件对于厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的影响，从而提出相应的控制条件，实现厌氧氨氧化颗粒污泥工艺的稳定运行，也为未来厌氧氨氧化颗粒污泥的数学建模提供数据基础.

1　实　验

1.1　实验装置

实验采用 16 个完全相同的 SBR 反应器，反应器由有机玻璃精加工而成，高 18 cm，内径 10 cm，有效容积 1 L.利用六联搅拌机控制相同转速使各反应器内细菌与基质充分混合，搅拌机转速 100 r/min.

1.2　接种污泥与实验水质

接种污泥采用在氨氮质量浓度为 45 mg/L、亚氮质量浓度为 60 mg/L 的人工配水水质条件下稳定运行的 UASB 反应器中的厌氧氨氧化颗粒污泥，反应器容积 24 L，总氮去除率 79%，总氮去除负荷 1.35 kg/(m^3 · d)，颗粒污泥体积平均粒径 2.12 mm.实验水质以 $(NH_4)_2SO_4$、$NaNO_2$、KH_2PO_4 为营养物质，$NaHCO_3$ 为无机碳源，乙酸钠为有机碳源，温度为室温 24~26 ℃.各反应器具体水质条件见表 1.

表 1　各反应器水质条件对比

Tab.1　Comparison of water quality of each reactor

反应器	$\rho(NH_4^+-N)$/(mg · L^{-1})	$\rho(NO_2^--N)$/(mg · L^{-1})	COD/TN	IC/TN	反应器	$\rho(NH_4^+-N)$/(mg · L^{-1})	$\rho(NO_2^--N)$/(mg · L^{-1})	COD/TN	IC/TN
1#	15	20	0	0.100	9#	60	80	0	0.050
2#	30	40	0	0.100	10#	60	80	0	0.200
3#	60	80	0	0.100	11#	60	80	0	0.500
4#	90	120	0	0.100	12#	60	80	0.5	0.100
5#	120	160	0	0.100	13#	60	80	1.0	0.100
6#	150	200	0	0.100	14#	60	80	1.5	0.100
7#	60	80	0	0.010	15#	60	80	2.0	0.100
8#	60	80	0	0.025	16#	60	80	2.5	0.100

1.3　操控条件与运行方法

1#~16#反应器均采用 SBR 的运行方式，每个周期包括瞬时进水、反应(时间为 T)、沉淀(1 min)、排水(1 min).各反应器的反应时间 T 按照氨氧化率达到 90%确定.实验共计运行 3 个周期，每个周期运行前通过循环进水(自来水)—搅拌—沉淀—排水等过程，将上一个周期残留的 NH_4^+-N、NO_2^--N、NO_3^--N、COD、IC 等淘洗干净以排除干扰.为避免溶解氧对于厌氧氨氧化活性的抑制，每周期在加入基质前分别加入 0.1 g 亚硫酸钠以去除进水中的溶解氧至0.1 mg/L以下，反应器运行过程中封闭以避免溶解氧对于厌氧氨氧化菌活性的抑制.

为研究同周期厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 分泌量的变化(以 3#反应器为例)，按基质是否反应完全划分为基质利用阶段与基质匮乏阶段，在 0、5、10、20、40、60、80、100、125、150 min 与 210、270 min 分别取泥水混合样来提取并测定 EPS(PN、PS)含量以及氮化合物含量研究基质利用阶段.为比较不同水质条件对厌氧氨氧化污泥 EPS 分泌量的影响，在各反应周期刚刚结束未静置前取泥水混合样来提取并测定 EPS(PS、PN)含量.

1.4　分析项目与方法

DO、T、pH 均采用 WTW 便携测定仪测定；MLVSS 采用重量法测定；水样分析中 NH_4^+-N 采用纳氏试剂光度法测定，NO_2^--N 采用 N-(1-萘基)乙二胺光度法测定，NO_3^--N 采用紫外分光光度法测定，TIC 采用非色散红外吸收 TOC 测定仪，COD 采用 COD 快速测定仪.EPS 中多糖含量的测定采用苯酚-硫酸比色法，蛋白质含量的测定采用考马斯亮蓝法.EPS 的提取方法为首先取泥水混合样品于 10 mL 离心管中，室温下用离心机以 8 000 r/min 离心15 min，倒掉上清液，加入适量磷酸盐缓冲溶液，将污泥稀释

至原体积,之后将污泥摇散后超声处理3.5 min,接着80 ℃水浴 30 min(每隔 10 min 左右将泥摇匀 1 次),最后用离心机 8 000 r/min 离心15 min,取上清液测定多糖、蛋白质含量,剩余污泥测定 MLVSS.

实验涉及的公式如下:

$$R_{AN}=\frac{\rho_{inf}(NH_4^+-N)-\rho_{eff}(NH_4^+-N)}{HRT\times\rho_{MLVSS}},\tag{1}$$

$$R=\frac{\rho_{inf}(NH_4^+-N)+\rho_{inf}(NO_2^-N)+\rho_{inf}(NO_3^-N)-\rho_{eff}(NH_4^+-N)-\rho_{eff}(NO_2^-N)-\rho_{eff}(NO_3^-N)}{\rho_{inf}(NH_4^+-N)+\rho_{inf}(NO_2^-N)+\rho_{inf}(NO_3^-N)},\tag{2}$$

$$R_{TN}=\frac{\rho_{inf}(NH_4^+-N)+\rho_{inf}(NO_2^-N)+\rho_{inf}(NO_3^-N)-\rho_{eff}(NH_4^+-N)-\rho_{eff}(NO_2^-N)-\rho_{eff}(NO_3^-N)}{HRT}.\tag{3}$$

式中:R_{AN}为平均厌氧氨氧化活性,R 为总氮去除率,R_{TN}为总氮去除负荷,$\rho_{inf}(NH_4^+-N)$、$\rho_{eff}(NH_4^+-N)$为进水、出水氨氮质量浓度,$\rho_{inf}(NO_2^-N)$、$\rho_{eff}(NO_2^-N)$为进水、出水亚氮质量浓度,$\rho_{inf}(NO_3^-N)$、$\rho_{eff}(NO_3^-N)$为进水、出水硝氮质量浓度,mg/L.HRT 为水力停留时间,min.ρ_{MLVSS}为混合液挥发性悬浮固体质量浓度,g/L.平均厌氧氨氧化活性(R_{AN})指单位质量厌氧氨氧化菌在一个反应周期内的平均氨氮氧化速率,其大小直接影响厌氧氨氧化反应器宏观脱氮效果.

2　结果与讨论

2.1　不同反应时期厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的变化

以 3#反应器为典型,研究同周期内不同反应时期的厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的变化.反应器内的基质质量浓度与 EPS 总量变化如图 1 所示.在 0~150 min 内,氨氮与亚硝酸盐氮质量浓度不断下降,反应器总氮去除率为 87%,总氮去除负荷为 1.12 g/(L·d).反应器内的 PS 与 PN 的变化如图 2 所示.在反应周期内,EPS 各组分质量分数不断升高,单位 MLVSS PS 质量分数由开始时的 34.28 mg/g不断升高至结束时的 37.81 mg/g;PN 质量分数由开始时的 89.35 mg/g 不断升高至结束时的94.01 mg/g;EPS 总量由开始时的123.63 mg/g升高至结束时的131.82 mg/g.在整个反应周期内,厌氧氨氧化菌具有充足的基质来维持较高的厌氧氨氧化活性,因此,细菌产生的 EPS 也因不断积累而升高.研究表明 EPS 具有促进细胞絮凝、维持颗粒结构以及提供能源等多种作用[19],不断增加的 EPS 将有助于促进污泥颗粒化同时维持颗粒结构的稳定.由表 2 可知,厌氧氨氧化污泥的 EPS 总量明显高于其他种类污泥,较高的 EPS 含量使得厌氧氨氧化污泥更易于发生细胞凝聚而形成颗粒.研究表明,厌氧氨氧化污泥高度的凝聚性不仅意味着细胞数量的增加,细胞间的信息交换和合作也都将加强,继而增强细胞的代谢和活性,EPS 对于细胞凝聚的促进作用将增加基因表达的稳健性,增强厌氧氨氧化菌对于客观环境变化的容忍性[13].厌氧氨氧化污泥 EPS 中的 PN 组分比例明显高于其他种类污泥,而 Hou 等[13]通过絮凝实验证实了 PN 是影响厌氧氨氧化菌凝聚性的关键物质,因此,厌氧氨氧化污泥 EPS 中较高的 PN 含量将有助于厌氧氨氧化菌的细胞凝聚形成颗粒.

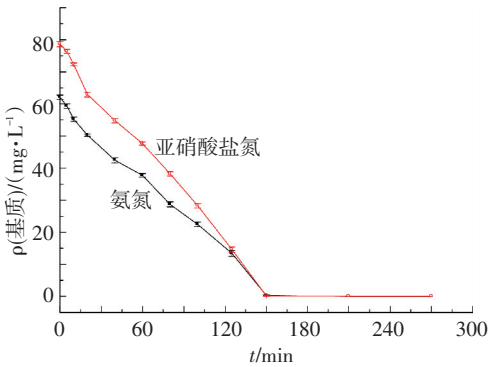

图 1　同周期内基质质量浓度与 EPS 总量变化

Fig.1　Changes of matrix concentration and total amount of EPS in the same cycle

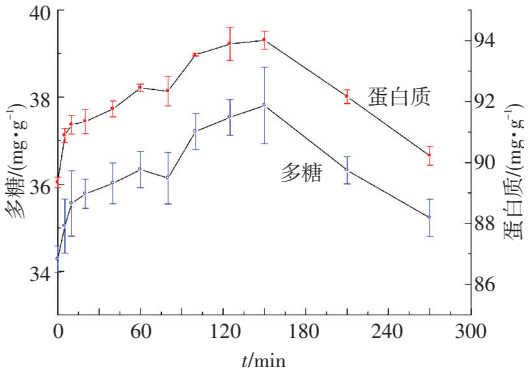

图 2　同周期内胞外多糖与蛋白质质量分数变化

Fig.2　Changes of polysaccharide and protein content in the same cycle

为研究基质匮乏状态下厌氧氨氧化菌 EPS 含量的变化,反应器继续运行 2 h,PS 质量分数逐步下降至 35.23 mg/g,PN 逐步下降至 90.22 mg/g,EPS 总量下降至 125.45 mg/g.在周期结束后的 150~270 min,EPS 的形成过程由于基质匮乏而停滞,但是部分 EPS 依然通过水解等作用释放到液相中且部分可生物降解的 EPS 又被充当能源物质而消耗,以维持细菌的正常代谢.吴昌永等[11]通过厌氧/好氧交替的运行方式研究了好氧颗粒污泥在基质利用阶段与基质匮乏

阶段 EPS 的变化,结果也表明基质利用阶段储存的 EPS 在基质匮乏阶段可以被利用,从而保证了 EPS 含量的稳定而更有利于促进颗粒的形成;李冬等[20]研究了亚硝化污泥在一个典型周期内 EPS 含量的变化,结果表明 PN 和 PS 均呈逐渐增加趋势,而在基质匮乏阶段,PN 和 PS 又被当做能源物质而消耗,这些现象与本研究的厌氧氨氧化污泥 EPS 含量在基质匮乏阶段的变化趋势相同.由于 EPS 在基质利用阶段不断升高而又在基质匮乏阶段不断下降,SBR 工艺所具有的间歇进料特性将有利于维持反应器内 EPS 含量的稳定,避免由于 EPS 持续升高而导致基质传递通道受阻继而降低微生物活性的问题;但是基质匮乏阶段较长也会造成 EPS 含量大幅下降,造成颗粒解体继而影响污泥颗粒化.因此,SBR 工艺在实际控制过程中应避免过长的反应阶段以及闲置阶段,因不利于反应器脱氮性能的发挥以及颗粒结构的稳定.

表 2　不同种类污泥 EPS 各组分对比

Tab.2　Comparison of contents of EPS in different kinds of sludge

污泥类型	PS/(mg·g^{-1})	PN/(mg·g^{-1})	文献
好氧颗粒污泥	16.35	54.12	[21]
厌氧颗粒污泥	17.23~38.30	2.77~9.12	[22]
亚硝化颗粒污泥	9.89~24.74	3.06~4.42	[20]
厌氧氨氧化颗粒污泥	25.3	67.3	[13]
	42.7±6.5	83.2±7.9	[16]
	71.8~112.1	164.4~298.2	[17]
	34.28~37.81	89.35~94.01	本文

2.2　总氮质量浓度对厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的影响

为研究总氮质量浓度对于厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的影响,采用 1#~6#反应器进行对比,结果如图 3、4 所示.总氮质量浓度在 35~210 mg/L 时,PS 质量分数由 35.23 mg/g 升高至38.92 mg/g,继续增加总氮质量浓度至350 mg/L时,PS 质量分数下降至 36.54 mg/g;总氮质量浓度在 35~280 mg/L 时,PN 质量分数由90.46 mg/g升高至 96.81 mg/g,继续增加总氮质量浓度至 350 mg/L 时,PN 质量分数下降至 95.34 mg/g;总氮质量浓度在 35~280 mg/L 时,EPS 总量由 125.69 mg/g 升高至134.5 mg/g,继续增加总氮质量浓度至350 mg/L时,EPS 总量下降至 131.88 mg/g.综上,总氮质量浓度在一定范围内时,EPS 及各组分含量随着基质质量浓度的升高而升高,超过一定范围,继续提高总氮质量浓度反而会使 EPS 及各组分含量降低.当总氮质量浓度较低时,提高总氮质量浓度意味着基质消耗速率的提高,而研究表明 EPS 的形成速率与基质消耗速率呈比例关系,同时反应时间的延长也将使基质利用阶段产生的 EPS 增多;但是基质质量浓度较高时,过长的反应时间将使得 EPS 的含量过高,易堵塞基质向颗粒内部传递的通道,而且 EPS 黏性较强也会增加基质向颗粒内部传递的阻力[23],降低微生物活性,且研究表明过高的亚氮质量浓度也会对厌氧氨氧化菌的活性造成抑制,微生物活性降低反过来也会导致 EPS 的形成量降低,不利于颗粒污泥的形成与结构稳定性的维持.李冬等[20]对亚硝化污泥 EPS 含量的研究结果也进一步证实了过高的基质质量浓度不利于 EPS 的分泌.综上,总氮质量浓度过高不利于 EPS 含量的提高,也不利于厌氧氨氧化活性的充分发挥.实验中,总氮质量浓度在 35~150 mg/L 时,R_{AN} 由 92.82 mg/(g·d)不断升高至 110.95 mg/(g·d),继续提高总氮质量浓度至 350 mg/L 时,R_{AN} 不断下降至67.95 mg/(g·d).由图 2 可知,在实际工艺运行过程中,通过调节容积交换率的方式控制反应初期的总氮质量浓度在 150~210 mg/L 时,既可以实现较高微生物活性及反应器的脱氮性能,还可以形成较高的 EPS 含量促进污泥颗粒化以及结构稳定性.

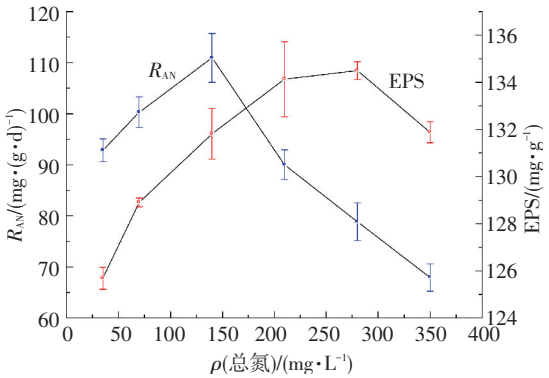

图 3　总氮质量浓度对厌氧氨氧化活性与 EPS 总量的影响

Fig.3　Effects of total nitrogen concentration on anaerobic ammonia oxidation activity and total amount of EPS

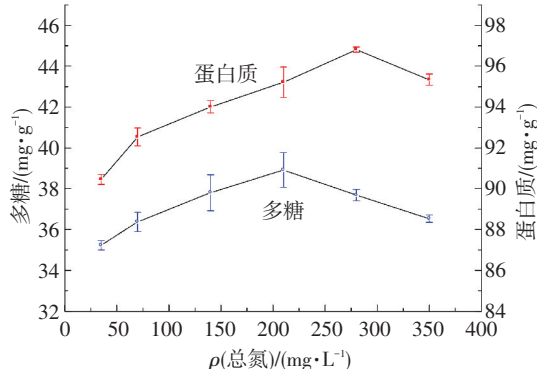

图 4　总氮质量浓度对胞外多糖与蛋白质质量分数的影响

Fig.4　Effects of total nitrogen concentration on extracellular polysaccharide and protein content

2.3　无机碳对于厌氧氨氧化污泥 EPS 含量的影响

为研究无机碳对于厌氧氨氧化菌 EPS 含量的

影响,采用 3#、7#~11#反应器进行对比,结果如图 5、6所示.

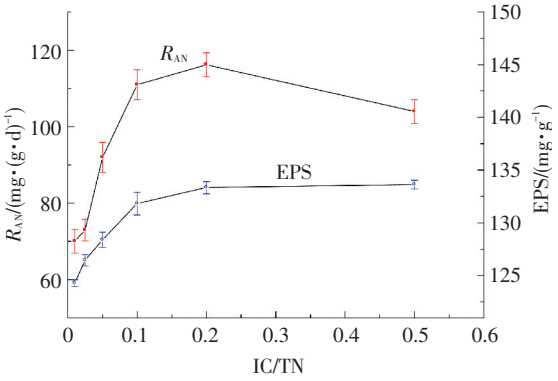

图 5 无机碳对厌氧氨氧化活性与 EPS 总量的影响

Fig.5 Effects of inorganic carbon on anaerobic ammonia oxidation activity and total amount of EPS

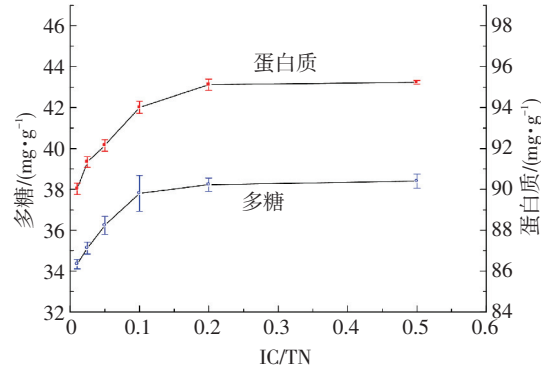

图 6 无机碳对胞外多糖与蛋白质质量分数的影响

Fig.6 Effects of inorganic carbon on extracellular polysaccharide and protein content

IC/TN 在 0.01 ~ 0.2 时,PS 质量分数由 34.34 mg/g不断升高至 38.23 mg/g,PN 质量分数由 90.34 mg/g 不断升高至95.12 mg/g,EPS 总量由 124.31 mg/g 不断升高至 133.35 mg/g;继续增加无机碳至 IC/TN 为 0.5 时,EPS 及各组分含量并无明显增长.综上,无机碳质量浓度在一定范围内时,EPS 及各组分含量随着无机碳质量浓度的升高而升高,超过一定范围,继续提高无机碳质量浓度对于 EPS 及各组分含量无明显影响.无机碳作为厌氧氨氧化菌的碳源,影响厌氧氨氧化菌的活性以及 EPS 的分泌量,理论上厌氧氨氧化反应需要的无机碳含量为 IC/TN=0.024(按反应式(1)计算),本实验在IC/TN 为 0.01~0.2 时,R_{AN}由 70.05 mg/(g·d)不断升高至 116.19 mg/(g·d),表明无机碳对于厌氧氨氧化活性具有显著的促进作用,相关研究结果也进一步证明了无机碳对于厌氧氨氧化菌活性具有促进作用[24-25],无机碳对于厌氧氨氧化活性的促进作用将导致厌氧氨氧化菌 EPS 分泌量的提高,但是无机碳的促进作用有一定限制,当 IC/TN>0.2 时,无机碳无法继续提高厌氧氨氧化菌活性及 EPS 含量.综合 EPS 含量与微生物活性两方面影响,厌氧氨氧化颗粒污泥工艺的无机碳质量浓度应控制在 IC/TN 为 0.1~0.2,在厌氧氨氧化颗粒污泥工艺的实际运行过程中,若无机碳源质量浓度较低,应当投加适量无机碳源,以避免由于无机碳的缺乏造成 EPS 含量的降低以及微生物活性的限制.

2.4 有机物对于厌氧氨氧化污泥活性及 EPS 含量的影响

已有研究表明,有机物的存在对于厌氧氨氧化菌活性以及 EPS 含量有重要影响.为研究有机物质量浓度对于厌氧氨氧化菌 EPS 含量的影响,采用 3#、12#~16#反应器进行对比,结果如图 7、8 所示.COD/TN 为 0 时,PS 和 PN 质量分数分别为 37.81 和94.01 mg/g,R_{AN}为 110.945 mg/(g·d);提高有机物至 COD/TN=0.5 时,PS 和 PN 质量分数分别升高至 38.63 和94.56 mg/g,R_{AN}也升高至 119.98 mg/(g·d);继续提高有机物至 COD/TN=2.5 时,PS 和 PN 质量分数分别下降至 35.01 和 91.56 mg/g,R_{AN}也下降至 71.16 mg/(g·d);EPS 总量的变化趋势与 PS 和 PN 的变化趋势相同.由此表明,少量有机物的存在可以促进厌氧氨氧化菌活性同时提高 EPS 的含量,继续提高有机物质量浓度将抑制厌氧氨氧化的活性并且降低厌氧氨氧化菌 EPS 及各组分的含量.Ni 等[15]的研究结果表明即使进水中不含有机物的厌氧氨氧化系统中也将含有 23%的异养菌,这些异养菌以可溶性的细胞产物、细菌腐败产物等为基质进行反应,有利于提高厌氧氨氧化系统的处理效果.Li 等[14]的研究结果表明适量的 COD 有助于促进 EPS 的分泌从而促进污泥颗粒化,而过量的 COD 将抑制厌氧氨氧化菌的竞争优势.因此,少量有机物的存在将有利于异养菌分泌更多的 EPS,但是由于厌氧氨氧化菌是自养菌,过高的有机物将对自养菌的生长代谢造成抑制,更不利于厌氧氨氧化菌 EPS 的分泌,因此,COD/N 较高时,厌氧氨氧化活性和 EPS 及各组分含量均明显下降.李延军等[9]研究了COD/N对好氧颗粒污泥 EPS 含量的影响,结果表明多糖含量几乎没有变化,而蛋白质及 EPS 总量均随 CON/N 的增大而降低.陈晨等[22]研究了 COD/N 对厌氧颗粒污泥 EPS 的影响,结果表明 EPS 及各组分含量均随 COD/N 的增大而先增大后减少.李冬等[20]研究了有机物对于亚硝化污泥 EPS 含量的影响,结果显示废水中含有机物的污泥系统中 EPS 含量明显高于相同氨氮质量浓度、不含有机物质的污泥系统.综上,合适的 COD/N 对于细菌分泌 EPS 具有重要影响,对于厌氧氨氧化颗粒污泥工艺,实际运行过程中应控制 COD/TN<0.5,以避免有机物过高对于厌氧氨氧化活性的限制.

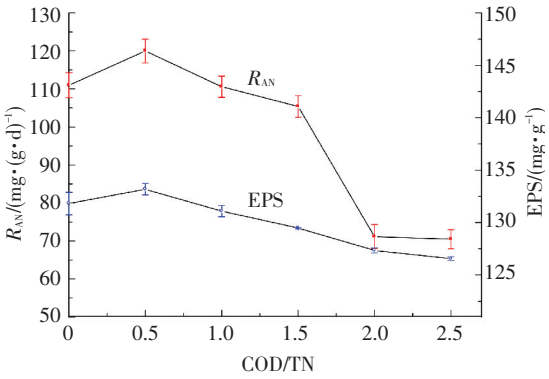

图 7　有机物对厌氧氨氧化活性与 EPS 总量的影响

Fig.7　Effects of organic matter on anaerobic ammonia oxidation activity and total amount of EPS

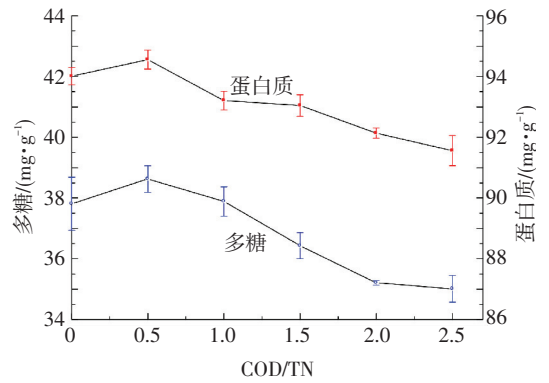

图 8　有机物对胞外多糖与蛋白质质量分数的影响

Fig.8　Effects of organic matter on extracellular polysaccharide and protein content

3　结　论

1)同周期内,基质利用阶段的 EPS 及各组分含量不断增加;而基质匮乏阶段 EPS 及各组分含量又不断降低.在 SBR 工艺的实际控制过程中,应避免过长的基质利用阶段以及过长的基质匮乏阶段.

2)总氮质量浓度为 35~280 mg/L 时,提高总氮质量浓度可以提高 EPS 的含量;总氮质量浓度超过 280 mg/L 时,提高总氮质量浓度会降低 EPS 及各组分含量.为维持较高的脱氮性能,总氮质量浓度应控制在 150~210 mg/L.

3)IC/TN 为 0.01~0.2 时,EPS 及其各组分含量随无机碳质量浓度的升高而增加;IC/TN 超过 0.2 时,无机碳质量浓度对于 EPS 及其各组分含量无明显影响;IC/TN 应控制在 0.1~0.5.

4)COD/TN<0.5 时,有机物对于 EPS 含量以及反应器脱氮性能具有促进作用;COD/TN 超过 0.5 时,有机物的提高对于 EPS 含量以及反应器脱氮性能有抑制作用.COD/TN 应控制在 0.5 以下.

参考文献

[1] SCHMID M, WALSH K, WEBB R, et al. Candidatus "Scalindua brodae", sp. nov., Candidatus "Scalindua wagneri", sp. nov., two new species of anaerobic ammonium oxidizing bacteria[J]. Syst Appl Microbiol, 2003, 26(4): 529-538.

[2] STAR VAN DER 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] HENDRICKX T L G, WANG Y, KAMPMAN C, et al. Autotrophic nitrogen removal from low strength waste water at low temperature [J]. Water Research, 2012, 46(7): 2187-2193.

[4] LOTTI T, KLEEREBEZEM R, HU Z, et al. Pilot-scale evaluation of anammox-based mainstream nitrogen removal from municipal wastewater[J]. Environmental Technology, 2014, 36(9): 1167-1177.

[5] LOTTI T, KLEEREBEZEM R, HU Z, et al. Simultaneous partial nitritation and anammox at low temperature with granular sludge[J]. Water Research, 2014, 66: 111-121.

[6] NI Bingjie, YU Hanqing. Microbial products of activated sludge in biological wastewater treatment systems: A critical review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2011, 42(2): 187-223.

[7] TURAKHIA M H, CHARACKLIS W G. Activity of Pseudomonas aeruginosa in biofilms: Effect of calcium[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1989, 33(4): 406-414.

[8] 廖青, 李小明, 杨麒, 等. 好氧颗粒污泥的快速培养以及胞外多聚物对颗粒化的影响研究[J]. 工业用水与废水, 2008,39(4): 13-19.
LIAO Qing, LI Xiaoming, YANG Qi, et al. Rapid cultivation of aerobic granular sludge and influence of extracellular polymeric substances on granulation[J]. Industrial Water & Wastewater, 2008, 39(4): 13-19.

[9] 李延军, 李秀芬, 华兆哲, 等. 好氧颗粒污泥胞外聚合物的产生及其分布[J]. 环境化学, 2006,25(4): 439-443.
LI Yanjun, LI Xiufen, HUA Zhaozhe, et al. Production of extracellular polymeric substances from aerobic granular sludge and its distribution[J]. Environmental Chemistry, 2006, 25(4): 439-443.

[10] 张丽丽, 陈效, 陈建孟, 等. 胞外多聚物在好氧颗粒污泥形成中的作用机制[J]. 环境科学, 2007,28(4): 4795-4799.
ZHANG Li1i, CHEN Xiao, CHEN Jianmeng, et al. Role mechallism of extracellular polymeric substances in the fomation of aerobic granillar sludge[J]. Environmental Science, 2007, 28(4): 4795-4799.

[11] 吴昌永, 周岳溪. 厌氧/好氧运行方式对颗粒污泥形成的影响[J]. 中国环境科学, 2013,33 (7): 1237-1243.
WU Changyong, ZHOU Yuexi. Effect of anaerobic/aerobic alternative operating strategy on the formation of granular sludge in a sequencingbatch reactor[J]. China Environmental Science, 2013, 33(7): 1237-1243.

[12] 蔡春光, 刘军深, 蔡伟民. 胞外多聚物在好氧颗粒化中的作用机理[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 112-115.
CAI Chunguang, LIU Junshen, CAI Weimin. Action mechanism of extracelluar polymers on the aerobic granulation[J]. China Environmental Science, 2004, 24(5): 112-115.

[13] HOU Xiaolin, LIU Sitong, ZHANG Zuotao. Role of extracellular polymeric substance in determining the high aggregation ability of anammox sludge[J]. Water Research, 2015, 75: 51-62.

[14] LI Yuan, HUANG Zhenxing, RUAN Wenquan, et al. ANAMMOX performance, granulation, and microbial response under COD disturbance[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2015, 90(1): 139-148.

[15]NI Bingjie, RUSCALLEDA M, SMETS B F. Evaluation on the microbial interactions of anaerobic ammonium oxidizers and heterotrophs in anammox biofilm[J]. Water Research, 2012, 46(15): 4645-4652.

[16]NI Bingjie, HU Baolan, FANG Fang, et al. Microbial and physicochemical characteristics of compact anaerobic ammonium-oxidizing granules in an upflow anaerobic sludge blanket reactor[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76(8): 2652-2656.

[17]TANG Chongjian, ZHENG Ping, WANG Caihua, et al. Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge[J]. Water Research, 2011, 45(1): 135-144.

[18]SEVIOUR T, YUAN Zhiguo, LOOSDRECHT VAN M C M, et al. Aerobic sludge granulation: A tale of two polysaccharides? [J]. Water Research, 2012, 46(15): 4803-4813.

[19]李冬, 吴青, 梁瑜海, 等. 不同基质条件对亚硝化污泥胞外聚合物的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(4): 81-86.
LI Dong, WU Qing, LIANG Yuhai, et al. Effect of substrate concentration and type on the content of extracellular polymeric substances in the nitrification sludge[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(4): 81-86.

[20]王浩宇, 苏本生, 黄丹, 等. 好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1614-1620.
WANG Haoyu, SU Bensheng, HUANG Dan, et al. Profiles of Zeta potential and eps in granulation process of aerobic sludge[J]. Environmental Science, 2012, 33(5): 1614-1620.

[21]陈晨, 马邕文, 万金泉, 等. C/N 比对厌氧颗粒污泥生理生化的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(3): 478-484.
CHEN Chen, MA Yongwen, WAN Jinquan, et al. Effects of C/N ratio on physiological biochemical characteristics of anaerobic granular sludge [J]. China Environmental Science, 2012, 32(3): 478-484.

[22]蓝惠霞, 杨波, 陈元彩, 等. 微好氧颗粒污泥工艺降解五氯酚的实验研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(9): 59-63.
LAN Huixia, YANG Bo, CHEN Yuancai, et al. Study on pentachlorophenol (PCP) degradation withm icroaerobic granular sludge[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006, 7(9): 59-63.

[23]KIMURA Y, ISAKA K, KAZAMA F. Effects of inorganic carbon limitation on anaerobic ammonium oxidation (anammox) activity [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(6): 4390-4394.

[24]LIAO Dexiang, LI Xiaoming, YANG Qi, et al. Effect of inorganic carbon on anaerobic ammonium oxidation enriched in sequencing batch reactor [J]. J Environ Sci (China), 2008, 20(8): 940-944.

(**编辑** 刘 彤)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“生物质炭对气态挥发性有机污染物的吸附性能及机理”,是生物质炭用于气体有机污染物吸附的作用机理图,揭示了生物质炭对气态有机污染物的吸附过程,受生物质炭理化性质的影响规律,进一步分析了生物质炭制备温度对生物质炭的理化性质和吸附过程的影响.图片显示,较低温制备的生物质炭,含氧官能团丰富,对气态有机污染物吸附可依靠氢键力结合在一起,吸附过程以表面吸附为主.相反地,较高温制备的生物质炭,孔隙结构更为丰富,而表面含氧官能团较少,对气态有机污染物的吸附则由表面吸附为主转变为以粒内扩散吸附为主.研究结果为以低廉的农林废弃物为制备原材料的生物质炭用于处理气体 VOCs 提供了理论依据,具有重大环保意义.

(图文提供:李桥,丁文川,雍毅,等.重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室)