

氨氮和硫酸盐对谷氨酸厌氧生物降解性能的抑制及机理

陈 宏^{1,2},胡颖冰^{1,2},陈 晨³,韦燕霄^{1,2},黄 蓉^{1,2},王 泓^{1,2},余关龙^{1,2},杨 敏^{2*} (1.长沙理工大学水利工程学院,湖南省环境保护河湖疏浚污染控制工程技术中心,湖南 长沙 410114; 2.洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室,湖南 长沙 410114; 3.长沙民政职业技术学院,湖南 长沙 410004)

摘要:采用连续运行 1119d 的上流式厌氧污泥床(UASB)反应器,研究了最佳有机负荷条件下氨氮和硫酸盐对模拟废水中谷氨酸降解性能的抑制作用。结果表明,有机负荷为 8.0g COD/(L·d)时,COD 去除率达到最高值为(97.94±0.28)%。逐步提高进水氨氮浓度,起初对谷氨酸降解性能的影响不大;但升到 2000mg/L 时 COD 去除率和甲烷产率明显降低,继续升至 4000mg/L 时即达到半抑制状态。逐步提高进水硫酸盐浓度至 4000mg/L,甲烷产率和溶液中游离硫化氢(FS)浓度分别呈现一直下降和升高趋势,但 COD 去除率均能维持在 90%以上。进水中的氨氮和硫酸盐分别因离解平衡和生物还原作用形成游离氨(FAN)和 FS,进而抑制了产甲烷菌的活性;前者因 FAN 扩散到细胞内部破坏质子平衡从而过多消耗 ATP,后者还因硫酸盐还原菌的增殖存在底物竞争抑制作用。

关键词:游离氨; 游离硫化氢; 生物活性; 底物竞争抑制; 产甲烷菌

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)10-4342-06

Inhibition and process mechanism of ammonia nitrogen and sulfate on anaerobic degradation of glutamate. CHEN Hong^{1,2}, HU Ying-bing^{1,2}, CHEN Chen³, WEI Yan-xiao^{1,2}, WANG Hong^{1,2}, HUANG Rong^{1,2}, YU Guan-long^{1,2}, YANG Min^{2*} (1.Engineering and Technical Center of Hunan Provincial Environmental Protection for River-Lake Dredging Pollution Control, School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2.Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3.Changsha Social Work College, Changsha 410004, China). China Environmental Science, 2020,40(10): 4342~4347

Abstract: To investigate the effect of ammonia nitrogen and sulfate in the influent on anaerobic degradation of glutamate under the optimal organic loading rate, a lab-scale up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor was continuously operated for 1119 days. The results showed that the maximal COD removal efficiency as high as (97.94±0.28)% was obtained at an organic loading rate of 8.0g COD/(L·d). When step-wise increasing the ammonia nitrogen concentration in the influent, the UASB reactor a small fluctuation on glutamate removal efficiency under low ammonia nitrogen concentrations (<1000mg/L), subsequently appeared a distinct decline in the COD removal and methane yield at 2000mg/L, and then the half-inhibitory concentration of ammonia nitrogen exhibited at 4000mg/L. When step-wise increasing sulfate concentration in the influent from 200mg/L to 4000mg/L, methane yield and free sulfide (FS) concentration in the mixture fallen into increasing and decreasing trends, respectively; but the COD removal efficiencies were generally in a high level (>90%). Both the ammonia nitrogen and sulfate in the influent could inhibit the glutamate degradation activity of methane-producing archaea (MPA) through dissociation equilibrium and biological reduction, respectively. Besides, FAN could freely diffuse into microbial cells resulting in proton imbalance and then excessive ATP consumption in the former. In contrast, substrate competitive inhibition was existed as for the reproduction of sulfate-reducing bacteria in the latter.

Key words: free ammonia; free sulfide; biological activity; substrate competitive inhibition; methane-producing bacteria

L—谷氨酸钠,又称麸氨酸钠,是味精工业生产中最主要的产品.大部分的味精是以淀粉质为原料,经过调浆,糖化,发酵,提取以及精制等工艺制备的产品.味精生产过程产生的大量废水,具有高 COD,高 BOD₅,高氨氮,高硫酸盐,高菌体含量和低 pH 等特点.厌氧生物处理高浓度有机废水具有能耗低、污泥产量少和回收生物能源^[1]的优点.目前在全世界范围内已得到广泛应用,其中常应用的是上流式厌氧污泥床(UASB)反应器^[2-3].

谷氨酸废水中含有高浓度氨氮和硫酸盐,易对厌氧生物处理工艺产生抑制作用.废水中的高浓度氨氮和硫酸盐会导致厌氧生物工艺性能的恶化甚至崩溃.而且含有高浓度氨氮和硫酸盐的废水处理困难且处理成本较高,属于最难处理的一类废水.丁收稿日期: 2020-02-30

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2017SK2361);湖南省自然科学青年基金(2019JJ50646);湖南省教育厅基金一般项目(18C0206);长沙理工大学研究生科研创新项目(CX2019SS14;SJCX201937)

* 责任作者, 讲师, min_yang@csust.edu.cn

忠浩等^[4]研究指出 UASB 处理谷氨酸废水的最佳工艺参数:进水 COD 浓度 5000mg/L,容积负荷 10~15g COD/(L·d).运行后反应器 COD 去除率为 80%.Gao 等^[5]利用 UASB 处理高浓度谷氨酸废水,在忽略进水高浓度硫酸盐影响的条件下,得到了随有机负荷增大而出现挥发性脂肪酸(VFAs)和氨氮浓度的逐渐升高并对厌氧微生物产生严重毒害作用,进而导致反应器性能下降.Chen 等^[6]研究了有机负荷对 UASB 处理谷氨酸废水的影响.现有文献主要研究在不同运行条件下,厌氧生物处理谷氨酸废水性能的影响及其最佳运行条件,关于氨氮和硫酸盐对 UASB 反应器处理谷氨酸废水的抑制性能与机理尚不明确.本研究采用单因素试验法,考察最佳有机负荷条件下进水氨氮和硫酸盐浓度对 UASB 反应器处理模拟谷氨酸废水产甲烷的抑制作用及过程机理.

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置由 UASB 反应器,基质桶,蠕动泵,温度控制单元以及气体收集装置组成(图 1).UASB 反应器由有机玻璃制作,其主体部分包括气-液-固三相分离器和圆柱形反应区,反应区外部由圆筒包围,内部为恒温水浴层(35 ± 1)℃,反应区的内径为 100mm,高度为 800mm,有效工作容积为 6L.废水通过蠕动泵从反应器底部注入,经过一系列反应后,出水从三相分离器的第二个出水口流出.反应器产生的气体从三相分离器顶部的气管中流出,再流经湿式气体流量计.在阶段 III(硫酸盐抑制)的实验中,产气经过气体流量计后再通过四氧化三铁净化后安全排放.

1.2 污水及污泥来源

进水采用自来水人工配制的模拟味精废水.碳源及氮源的供给来源都是谷氨酸钠.基质中其它物质含量参照文献^[6].另外,加入 1g/L 的 NaHCO₃ 增加反应器的缓冲能力,维持碱度和 pH 平衡.阶段 I 通过提高谷氨酸钠浓度增加有机负荷.阶段 II 的氨氮来源为碳酸氢氨.阶段 III 的硫酸盐来源为无水硫酸钠.不同实验阶段的基质成分见表 1.反应器接种的消化污泥是由厌氧污泥(湖南省长沙市新开铺污水处理厂 A/A/O 厌氧段)和颗粒污泥(内蒙古凯天环保公司

淀粉废水处理 UASB 反应器,直径 0.3~3.0mm,沉速 1.5~3.0cm/s)混合而成(体积比为 2:3,体积 4L,VSS=30.05g/L).

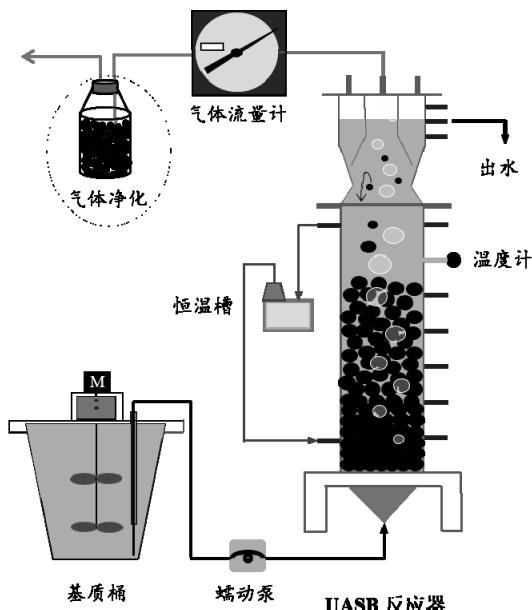


图 1 UASB 反应器实验装置流程
Fig.1 Schematic diagram of UASB reactor

1.3 实验步骤

I-1 为 UASB 反应器启动阶段,进水基质中的 COD 为 4000mg/L,有机负荷控制在 2.0g COD/(L·d).成功启动后,进行实验.实验的第一个阶段(I-1~I-8),反应器通过逐步提高谷氨酸钠浓度逐步提高有机负荷,考察 UASB 反应器的最佳有机负荷.实验的第二个阶段(II-1~II-7)和第三个阶段(III-1~III-8),以最佳有机负荷运行反应器,逐步提高进水氨氮浓度(0~6000mg/L)和硫酸盐浓度(0~4000mg/L),探索氨氮和硫酸盐对谷氨酸废水的影响.

1.4 分析方法

氨氮采用纳氏分光光度法测定^[7],COD 采用重铬酸钾法测定,为了去除出水中硫化物的干扰,测试前会通过酸化吹气法^[8]进行预处理.pH 值采用 pH 计(PHSJ-3F,雷磁),水温采用温度计(TP101,ER-TET46005P)测定,气体产量是由湿式流量计计量,出水中的乙酸和产气组成成分用气相色谱(GC9790II,福立)测定,硫酸盐含量用离子色谱(Metrohm 883,瑞士万通)测定.游离氨(FAN)由氨氮浓度和实测水温及 pH 值经公式计算^[9]而得.

表1 UASB反应器各阶段进水水质
Table 1 Characterization of different periods of influent

阶段	时间	有机负荷 [g COD/(L·d)]	阶段	时间	进水 NH ₄ -N 浓度(mg/L)	阶段	时间	进水 SO ₄ ²⁻ 浓度 (mg/L)
I-1	1~33	2	II-1	224~234	0	III-1	503~522	0
I-2	34~73	2	II-2	235~285	500	III-2	523~617	200
I-3	74~97	4	II-3	286~338	1000	III-3	618~726	400
I-4	98~129	6	II-4	339~397	2000	III-4	727~785	666.7
I-5	130~153	8	II-5	398~442	4000	III-5	786~830	1000
I-6	154~175	12	II-6	443~465	6000	III-6	831~981	2000
I-7	176~197	16	II-7	466~502	0	III-7	982~1068	3000
I-8	198~223	24				III-8	1069~1119	4000

2 结果与讨论

2.1 UASB反应器长期运行性能

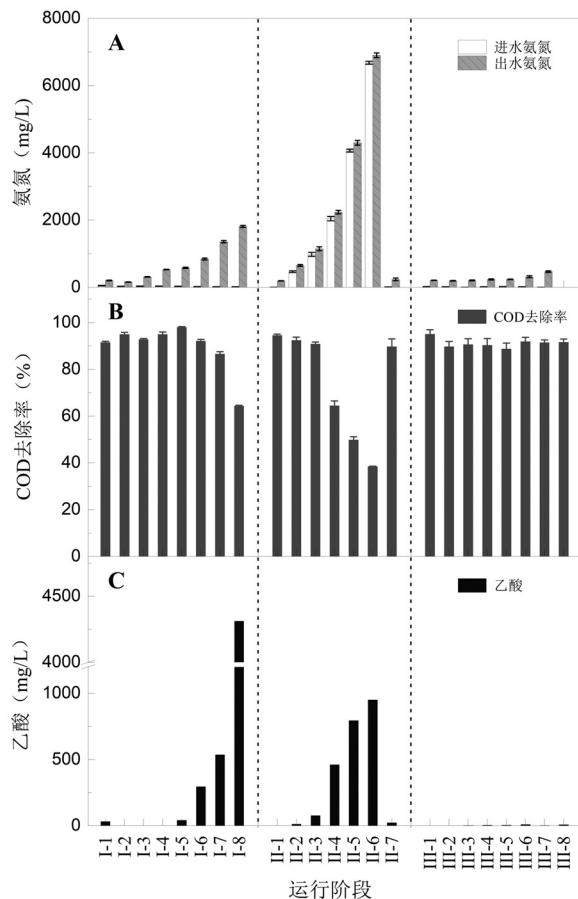


图2 各阶段平均氨氮浓度、COD去除率及乙酸浓度
Fig.2 Effluent of average ammonia nitrogen concentration, COD removal rate and acetic concentration in different periods

UASB反应器连续运行1119d内,主要工艺参数维持稳定,水温控制在(35±1)℃,进水pH7.8~8.1(第II阶段为7.8~8.8),出水pH7.2~7.4(第II阶段为7.4~8.0)(数据未列出).由图2(I-1~I-8)可知,随着有机负荷的

增加,COD去除率先增加后减少,在有机负荷为8.0g COD/(L·d)时,COD去除效率最高,达到(97.94±0.28)%.当反应器的有机负荷继续上升,COD去除率开始下降.有机负荷升至16.0g COD/(L·d)时,COD去除率降至(86.59±0.94)%,出水乙酸浓度大幅度上升至(537.32±59.37)mg/L.这说明反应器开始发生酸化,反应器性能开始恶化.厌氧工艺中的乙酸累积会使反应器性能恶化^[10~11].当有机负荷继续上升至24.0g COD/(L·d),COD去除率降至(64.33±0.31)%,出水乙酸浓度直线上升至(4311.53±271.96)mg/L.乔玮等^[12]实验发现,当VFA浓度在6.5g/L时,中温反应器性能出现明显的恶化.由COD去除率可知,当有机负荷为8.0g COD/(L·d)时,反应器性能达到最佳状态;谷氨酸废水是含氮废水,在厌氧工艺中会发生脱氨基作用产生氨氮,出水中的氨氮浓度逐渐增多.在I-8时,反应器出水氨氮浓度上升至1811.06±26.78mg/L(图2).Ying等^[9]总结了总氨氮浓度在1500~7000mg/L为厌氧消化的临界阈值浓度区间.故氨氮和VFA对反应器均有一定的毒害作用.

根据阶段I的实验结果,在最佳有机负荷下进行阶段II(II-1~II-7)和阶段III(III-1~III-8)的实验.由图2(II-1~II-7)可知,反应器随着进水氨氮浓度的逐渐升高,出水氨氮浓度也逐渐升高,其出水氨氮浓度与进水氨氮浓度之差与谷氨酸脱氨产生的量基本一致.反应器的COD去除率不断下降,出水乙酸浓度不断增加.反应器发生酸化,性能受到抑制,不断恶化.根据图2(III-1~III-8),不断提高进水硫酸盐浓度,进出水氨氮浓度一直处于较低水平,后期由于无法消除出水硫化物对氨氮测定的影响,故III-8阶段没有继续测定氨氮这一指标.反应器COD去除率一直维持在90%以上,出水乙酸浓度一直在10~40mg/L之

间,后期乙酸浓度还出现降低趋势,说明不断增加的进水硫酸盐浓度对 COD 去除无明显影响,这与 Lu 等^[13]的研究成果一致。

2.2 氨氮抑制作用

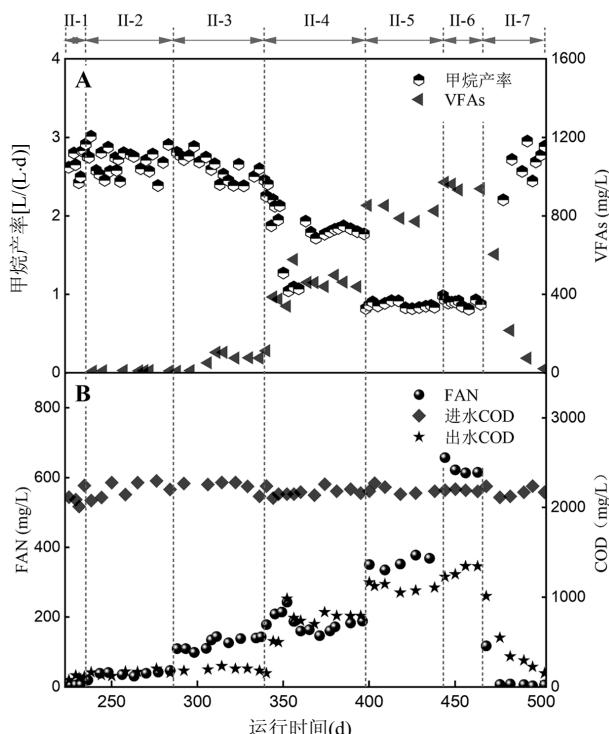


图 3 甲烷产率、VFAs 浓度、FAN 及进出水 COD 浓度
Fig.3 Methane yield, VFAs concentration, free ammonia (FAN) and COD concentration

阶段 II(II-1~II-7)的运行过程中,保持最佳有机负荷($8.0\text{g COD/(L}\cdot\text{d)}$)不变,逐步提高进水氨氮浓度(0~6000mg/L).由图 3 可知,当进水氨氮浓度升至 2000mg/L(II-4)时,阶段前期 FAN 浓度上升达到阶段最高,在 243.48mg/L 左右.出水 COD 和 VFAs 浓度也达到最高,分别在 985.78mg/L 和 578.52mg/L,甲烷产率最低,为 1.04L/(L·d).pH 值是影响 FAN 浓度的主要因素之一^[14].通过调整进水 pH 值将 FAN 稳定在 160mg/L 左右后,阶段 II-4 出水 COD 和 VFAs 浓度下降稳定在 730mg/L 和 460mg/L,甲烷产率上升稳定在 1.75L/(L·d).反应器性能随着 FAN 浓度的改变而改变,这说明在氨氮抑制中,FAN 浓度是影响反应器性能的重要因素.研究表明,在总氨氮浓度大于 3000mg/L, FAN 浓度在 40~150mg/L 时就可抑制甲烷发酵,这与本研究结果一致^[15~17].随着进水氨氮浓度的进一步升高至 4000mg/L,FAN 浓度升至

(363.03±13.55)mg/L.出水 COD 浓度超过进水 COD 浓度的一半,反应器性能达到半抑制状态.甲烷产率降至 (0.89±0.04)L/(L·d).在进水氨氮浓度升至 6000mg/L 时,FAN 浓度升至(627.82±21.95)mg/L,出水 COD 浓度上升至(1295.70±61.19)mg/L,甲烷产率为 (0.87±0.09)L/(L·d).反应器性能略有下降.将进水氨氮浓度降为 0mg/L,经过 36d 的运行后,反应器性能恢复并能稳定运行在 90%以上,说明消除氨氮抑制后谷氨酸的厌氧生物降解性能得以恢复^[18].

2.3 硫酸盐抑制作用

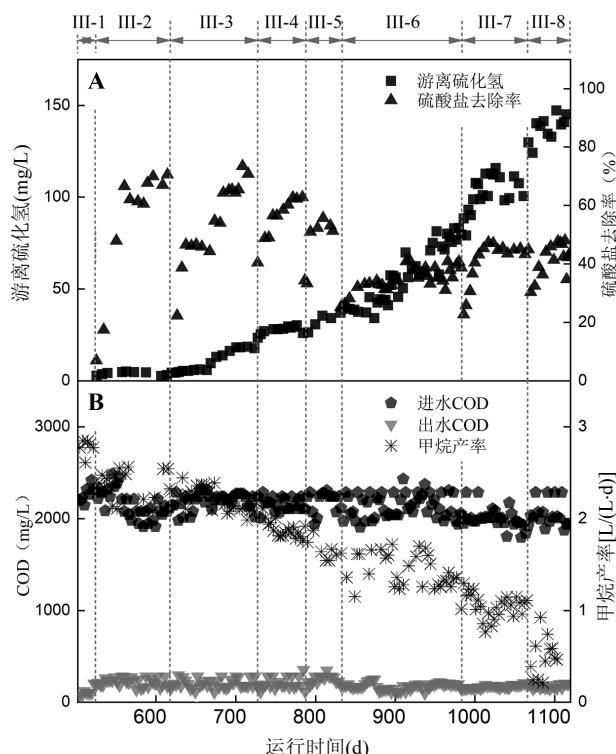


图 4 游离硫化氢、硫酸盐去除率、进出水 COD 及甲烷产率
Fig.4 Free hydrogen sulfide, sulfate removal rate, COD and methane yield

阶段 III 的实验(III-1~III-8)中,有机负荷和进水 COD 浓度分别保持 $8.0\text{g COD/(L}\cdot\text{d)}$ 和 2000mg/L 不变,逐步增加进水硫酸盐浓度(0~4000mg/L).随着进水硫酸盐的增加,硫酸盐去除率整体逐步下降后稳定,至 III-8 阶段时,硫酸盐去除率保持在(43.50±2.26)% (图 4(a)).反应器总体的硫酸盐去除量逐步增加.水中游离硫化氢含量逐步增加至(140±4.81)mg/L.这说明反应器的硫酸盐还原能力在逐步增加.反应器出水 COD 浓度一直维持在一个较低水平,但甲烷产率一直在缓慢下降,甲烷产率从 III-1 的(2.80±

0.22)L/(L·d)降至 III-8 的(0.50±0.11)L/(L·d)(图 4(b)).这是由于硫酸盐还原所利用的 COD 逐步增多,产甲烷所能利用的 COD 逐渐减少,产甲烷反应速率变慢.由图 4 可知,在硫酸盐抑制中,产甲烷性能经历了长期缓慢的下降过程.

2.4 氨氮和硫酸盐的抑制作用机理

在阶段 II 中,FAN 的浓度变化对反应器性能影响明显(图 2,图 3).基质中氨氮浓度升至 6000mg/L 时,反应器的 COD 去除性能和甲烷产率分别下降了 59.3% 和 66.7%,性能受到明显抑制.其可能的抑制作用机理是高浓度氨氮进入到 UASB 反应器中,以铵离子(NH_4^+)和 FAN 的形式存在于水中;随着 MPA 胞外的 FAN 浓度不断上升,疏水性的 FAN 因浓度梯度通过被动运输进入细胞内.胞内的 FAN 会与游离质子(H^+)结合形成 NH_4^+ ,改变胞内 pH 值;MPA 为维持胞内 pH 值的平衡,通过主动运输将胞内 K^+ 泵出,胞外 H^+ 泵入胞内;这个过程即消耗能量,又破坏胞内质子平衡;在此期间,胞外 NH_4^+ 还能对某种特定产甲烷酶产生抑制,使 MPA 的产甲烷性能降低^[19].FAN 对于厌氧系统中的产酸菌、产乙酸菌和 MPA 均存在抑制作用,其中对于 MPA 的抑制最为严重^[20].由此造成了反应器内产甲烷速率的降低以及 VFAs 的大量累积,进而导致了厌氧反应器的性能恶化.当前常用于消除氨氮抑制的方法主要有:提高进料 C/N、微生物驯化及去除氨氮^[21].当反应器进水氨氮浓度降为 0(第 446d)并运行 36d 后,其性能得到较好地恢复(图 3).

当 UASB 反应器进水硫酸盐浓度升至 4000mg/L,COD 去除率基本不变(图 2B),甲烷产率却急剧下降了 82.0%(图 4B),但是乙酸积累量却很少(图 2C).不同于氨氮抑制,硫酸盐存在时主要由硫酸盐还原菌(SRB)将其还原为 H_2S ;在高浓度硫酸盐存在的条件下,MPA 可能会受到 SRB 竞争作用和硫化氢对其毒害作用的双重抑制作用^[22].MPA 和 SRB 竞争相同底物(乙酸),由于 SRB 进行化学反应的 ΔG 值更低可以占据有利地位;随着 H_2S 的大量产生会对厌氧菌尤其是 MPA 造成严重的抑制作用,进一步降低了产甲烷速率,由此形成了 COD 去除率基本不变而甲烷产率急剧下降的现象^[23].综合甲烷产率和 COD 去除率,硫酸盐比氨氮所导致的长期性能抑制更为严重.为限制生物反应器中发生硫酸盐的抑制

作用,主要通过物理、化学和生物学手段抑制 SRB 的生长繁殖^[24].本研究限于采用单因素试验并逐步提高氨氮和硫酸盐浓度的方法分别考察其对 UASB 反应器对于模拟谷氨酸废水的抑制作用,对于推动解决实际味精废水处理具有一定的理论意义.今后研究可采用实际废水和梯度稀释逐步提高的方法,有助于工业味精废水处理技术的研发与应用.

3 结论

3.1 有机负荷从 2.0g COD/(L·d)升至 6.0g COD/(L·d),反应器性能逐步上升.当 UASB 反应器的有机负荷为 8.0g COD/(L·d)时,反应器性能最好,COD 去除效果最好(97.94±0.28)%;随着有机负荷继续上升,氨化反应产生的氨氮开始影响微生物活性,反应器中 VFAs 开始累积并产生毒害作用,反应器性能开始下降.

3.2 氨氮浓度为 2000mg/L 时,反应器性能出现抑制;氨氮浓度升至 4000mg/L 时,反应器达到半抑制状态.实验中,反应器性能受到 FAN 和 NH_4^+ 浓度变化的影响.FAN 的影响更大的.FAN 和 NH_4^+ 能改变胞内 pH,直接抑制特定的产甲烷酶,破坏胞内质子平衡以及增加细胞所需能量.

3.3 硫酸盐浓度从 200mg/L 升至 4000mg/L 的过程中,SRB 逐步生长繁殖,并在底物的竞争中超过 MPA 成为优势菌种.反应器的硫化氢含量逐步增加,对 MPA 产生一定的毒性作用,MPA 的活性在底物不足和硫化氢的毒性作用下活性降低,甲烷产率下降,反应器性能受到抑制.

参考文献:

- [1] Li J, Rui J, Yao M, et al. Substrate type and free ammonia determine bacterial community structure in full-scale mesophilic anaerobic digesters treating cattle or swine manure [J]. Frontiers in Microbiology, 2015,6:1337.
- [2] 刘敏,任南琪,王爱杰,等.UASB 反应器酸化后的状态及恢复研究 [J]. 中国沼气, 2003,(2):7~10.
Liu M, Ren N Q, Wang A J, et al. Acidification State and Recovery Experiment of UASB Reactor [J]. China Biogas, 2003,(2):7~10.
- [3] Zhang S J, Liu N R, Zhang C X. Study on the performance of modified UASB process treating sewage [J]. Advanced Materials Research, 2013,2115(1223):2174~2178.
- [4] 丁忠浩,蔡连浪,李镭,等.用上流式厌氧污泥床处理味精废水的研究 [J]. 环境科学与技术, 2002,(4):30~31.
Ding H J, Cai L L, Li L, et al. Experimental studies of monosodium

- glutamate effluents using UASB [J]. Environmental Science & Technology, 2002,(4):30–31.
- [5] Gao Y. UASB treatment of monosodium glutamate wastewater. The 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering [Z]. 2010.
- [6] Chen H, Wei Y, Liang P, et al. Performance and microbial community variations of a upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor for treating monosodium glutamate wastewater: Effects of organic loading rate [J]. Journal of Environmental Management, 2020,253:109691.
- [7] 国家环境保护总局编委会.水和废水监测分析方法 [M]. 4 版.北京:中国环境科学出版社, 2002.
- Editorial Board of The State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater [M]. 4 version. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [8] 孙冬月,官香元.重铬酸钾法测定 COD 中的干扰及消除 [J]. 环境科学与管理, 2009,34(6):124–126.
- Sun D Y, Guan X Y, Elimination of interference on COD measurement by $K_2Cr_2O_7$ method [J]. Environmental Science and Management, 2009,34(6):124–126.
- [9] Jiang Y, McAdam E, Zhang Y, et al. Ammonia inhibition and toxicity in anaerobic digestion: A critical review [J]. Journal of Water Process Engineering, 2019,32:100899.
- [10] Omil F, Mendez R, Guerrero L. Anaerobic hydrolysis and acidogenesis of wastewaters from food industries with high content of organic solids and protein [J]. Water Research: A Journal of the International Water Association, 1999,33(12):3281–3290.
- [11] Onay T T, Demirel B, Yenigun O. Anaerobic treatment of dairy wastewaters: a review [J]. Process Biochemistry, 2005,40(8):2583–2595.
- [12] 乔 玮,毕少杰,熊林鹏,等.氨氮浓度对鸡粪中高温甲烷发酵的影响 [J]. 中国环境科学, 2019,39(7):2921–2927.
- Qiao W, Bi S J, Xiong L P, et al. Effects of ammonium on methane fermentation of chicken manure under mesophilic and thermophilic conditions [J]. China Environmental Science, 2019,39(7):2921–2927.
- [13] Lu X, Zhen G, Ni J, et al. Sulfidogenesis process to strengthen re-granulation for biodegradation of methanolic wastewater and microorganisms evolution in an UASB reactor [J]. Water Research, 2017,108:137–150.
- [14] 陈 淦,王 雯,严 湖,等.氨氮对有机废弃物厌氧消化的影响及调控策略 [J]. 环境科学与技术, 2016,39(9):88–95.
- Chen H, Wang W, Yan H, et al. Ammonia inhibition on anaerobic digestion and control strategy: A review [J]. Environmental Science & Technology, 2016,39(9):88–95.
- [15] Heo N P S C K. Effects of mixture ratio and hydraulic retention time on single-stage anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge [J]. Journal of Environmental Science and Health, 2004,39(7):1739–1756.
- [16] Wang W, Ren X, Yang K, et al. Inhibition of ammonia on anaerobic digestion of synthetic coal gasification wastewater and recovery using struvite precipitation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017,340:152–159.
- [17] MÁC A J, Dohányos M, Dolej P, et al. Stability and inhibition of anaerobic processes caused by insufficiency or excess of ammonia nitrogen [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012,93(1):439–447.
- [18] 孟 伟,查 金,张思梦,等.餐厨垃圾厌氧消化过程氨氮抑制及缓解办法综述 [J]. 环境工程, 2019,37(12):177–182.
- Meng J, Zha J, Zhang S M, et al. A review of ammonia inhibition and its mitigation methods for anaerobic digestion of food waste [J]. Environmental Engineering, 2019,37(12):177–182.
- [19] Chen S, He J, Wang H, et al. Microbial responses and metabolic pathways reveal the recovery mechanism of an anaerobic digestion system subjected to progressive inhibition by ammonia [J]. Chemical Engineering Journal, 2018,350:312–323.
- [20] Yan M, Fotidis I A, Tian H, et al. Acclimatization contributes to stable anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste under extreme ammonia levels: Focusing on microbial community dynamics [J]. Bioresource Technology, 2019,286:121376.
- [21] 胡崇亮,张 栋,戴翎翎,等.厌氧消化过程氨抑制研究进展 [J]. 环境工程, 2016,34(12):23–27.
- Hu C L, Zhang D, Dai L L, et al. Research progress of inhibitory effects of ammonia in an anaerobic digestion system [J]. Environmental Engineering, 2016,34(12):23–27.
- [22] Maree J P, Strydom W F. Biological sulphate removal from industrial effluent in an upflow packed bed reactor [J]. Water Research, 1987, 21(2):141–146.
- [23] Chen H, Wu J, Liu B, et al. Competitive dynamics of anaerobes during long-term biological sulfate reduction process in a UASB reactor [J]. Bioresource Technology, 2019,280:173–182.
- [24] 苗 娟,王志伟,梅晓洁,等.基质配比及硫酸盐对 AnMBR 产甲烷性能的影响 [J]. 中国环境科学, 2017,37(3):998–1002.
- Miao Y, Wang Z W, Mei X J, et al. Effects of substrate ratios and sulfates on methanogenesis in an AnMBR [J]. China Environmental Science, 2017,37(3):998–1002.

作者简介: 陈 宏(1983-),男,湖南衡阳人,副教授,博士,主要从事环境污染治理技术研究,发表论文 60 余篇。