

碱度类型及浓度对剩余污泥中温厌氧消化的影响

赵明明,李夕耀,李璐凯,彭永臻*,张琼 (城镇污水深度处理与资源化利用国家工程试验室,北京市污水脱氮除磷处理与过程控制工程技术研究中心,北京工业大学环境与能源工程学院,北京 100124)

摘要: 为了探究不同碱度物质(Na_2CO_3 、 KHCO_3 、 NaHCO_3)和浓度范围(2000,3000,4000mg/L)(以 CaCO_3 计) 对中温厌氧消化系统的影响,采用了密封的半连续搅拌反应器进行批次试验. 综合反应器运行与微生物高通量测序分析,结果表明在 3 种不同碱度类型中 Na_2CO_3 能推进水解酸化过程,而在产气减量方面 NaHCO_3 表现更为突出,说明在调节系统碱度时, Na_2CO_3 更易促进水解酸化这一限速阶段,而 NaHCO_3 能使水解酸化细菌与产甲烷菌之间保持平衡,保证甲烷产量;在不同 NaHCO_3 浓度情况下,增加投加碱度的浓度使水解能力增强,相应会导致脱水性能恶化,而系统中挥发性脂肪酸含量变化不大,过量碱度将使得系统产气和减量能力下降.

关键词: 剩余污泥; 碱度; 中温厌氧消化; 水解酸化细菌; 产甲烷菌

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2019)05-1954-07

Effects of alkalinity type and concentration on mesophilic anaerobic digestion of excess sludge. ZHAO Ming-ming, LI Xi-yao, LI Lu-kai, PENG Yong-zhen*, ZHANG Qiong (National Engineering Laboratory for Deep Treatment and Recycling of Urban Sewage, Beijing Engineering Research Center for Nitrogen and Phosphorus Removal Treatment and Process Control of Sewage, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124). *China Environmental Science*, 2019,39(5): 1954~1960

Abstract: To explore the effects of different alkalinity substances (Na_2CO_3 , KHCO_3 , NaHCO_3) and concentration ranges (2000, 3000, 4000mg/L (as CaCO_3)) on the middle-temperature anaerobic digestion system, a static batch semi-continuous stirred tank was used in the experiment. The comprehensive reactor operation and microbial high-throughput sequencing analysis showed that Na_2CO_3 could promote the hydrolysis and acidification process in three different types of alkalinity, while NaHCO_3 was more prominent in gas production and reduction. It indicated that Na_2CO_3 was more likely to promote hydrolysis and acidification in the limiting stage compared to other samples, when the alkalinity of the system was adjusted. Under different concentrations, the hydrolysis capacity was enhanced by increasing the concentration of added basicity, which led to the deterioration of the dehydration performance, while the Volatile Fatty Acids changed little, and the excess basicity will reduce the gas production and reduction of the system.

Key words: waste activated sludge; alkalinity; moderate-temperature anaerobic digestion; hydrolysis acidizing bacteria; methanogens

城镇污水生物处理过程产生的大量剩余污泥,是目前污水处理厂面临的重大问题之一^[1].中温厌氧消化是剩余污泥普遍应用的减量化和稳定化工艺,具有低能耗、消化后污泥稳定性好、可产生沼气等优点^[2].厌氧消化过程通常被分为水解阶段、酸化阶段和产甲烷阶段三阶段^[3],因此具有反应复杂、监控指标多等特点.

在众多的中间产物和控制参数中,碱度、挥发性脂肪酸(VFAs)、产气量是厌氧消化的重要指标^[4].碱度和 VFAs 是厌氧消化反应中的缓冲组合,其缓冲作用可以维持适宜中温厌氧反应器总碱度代表体系中碱度总和,部分碱度代表碳酸盐碱度.厌氧反应器内会出现碱度下降甚至酸化等现象,由于产甲烷菌对 pH 值和温度等条件要求苛刻、稳定性差,会造成系统产气性能破坏^[7].王家卓等^[8]研究表明缓冲体系

中的碳酸盐含量在 4g/L 时厌氧发酵体系产氢值达到最高.多数研究者研究方向为碱性发酵产酸积累及利用^[9-10],但碱度物质种类和浓度对厌氧消化影响尚不明确,并未进一步探究碱性缓冲物质对厌氧消化体系整体影响.

因此本文以剩余污泥为处理对象,在中温厌氧消化反应器中投加不同种类、浓度的碳酸盐和碳酸氢盐碱度,探究了投加碱度类型及浓度对剩余污泥中温厌氧消化的影响.

1 试验材料与方法

收稿日期: 2018-09-26

基金项目: 北京市科技计划(Z181100005518006);北京市优秀人才资助青年骨干个人项目(2017000020124G104)

* 责任作者, 教授, pyz@bjut.edu.cn

1.1 试验污泥

试验使用剩余污泥取自北京工业大学以实际生活污水为处理对象的短程硝化—反硝化间歇式活性污泥法中试反应装置.剩余污泥取回后静置,浓缩后总固体含量(TS)为(25.2±1.5)g/L,放入 4℃冰箱贮存.试验污泥性质,包括污泥毛细脱水时间(CST),总化学需氧量(TCOD),溶解性化学需氧量(TCOD),溶解性碳水化合物(SC),溶解性蛋白(SP),挥发性固体含量(VS)如表 1 所示.

表 1 本试验采用的剩余污泥性质

Table 1 Characteristics of waste activated sludge in this study

CST(s)	TCOD(g/L)	SCOD(mg/L)	TS(g/L)	VS(g/L)
15.4±3.0	18.6±1.5	125.0±50.0	25.2±1.5	16.5±1.0

1.2 中温厌氧消化装置的运行

密封半连续搅拌反应器有效体积为 1.2L,通过温度传感器和加热磁力搅拌器控制反应器温度为(35.0±0.5)℃,在连接气路管前,使用氮气吹脱 5min,确保反应器中无剩余氧气.反应器启动时一次性投加碱度,后续每次投加剩余污泥和碱度溶液.SRT 为 20d,每天固定时间从各反应器中排出厌氧消化后和投加新鲜剩余污泥各 60mL.

投加新鲜剩余污泥前注入少量确定浓度的碱度溶液,使各反应器情况为:空白反应器不投加碱度物质、投加 2000mg/L Na₂CO₃、投加 2000mg/L KHCO₃、投加 2000mg/L NaHCO₃、投加 3000mg/L NaHCO₃、投加 4000mg/L NaHCO₃(浓度以 CaCO₃计),下文简称 BLANK、Na₂CO₃(2000)、KHCO₃(2000)、NaHCO₃(2000)、NaHCO₃(3000)、NaHCO₃(4000).

1.3 分析方法

取样后测定 TS、VS、CST、TCOD,样品再经 4000r/min 的离心机离心 10min 后用 0.45μm 滤膜抽滤,获得的滤液用来测定 SCOD、SC、SP、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P、DNA 和 VFAs.试验中 TS 和 VS 采用重量法;COD 采用快速测定法测定(连华科技 5B-3C,中国);SC 采用苯酚—硫酸法测定;SP 采用考马斯染料的 Bradford 法蛋白质定量试剂盒测定(TaKaRa T9310A,中国);NH₄⁺-N 和 PO₄³⁻-P 通过流动注射分析方法测得(HACH QC8500,美国);DNA 采用紫外分光光度法测定(Nanodrop ND1000,美国);CST 采用

污泥毛细吸水时间测定仪测定(Triton 304M,英国);VFAs 采用气相色谱法测定^[11](Agilent 6890N,美国);碱度通过流动注射分析法测得(HACH QC8500 Alkalinity 10-303-31-1-A,美国).过滤水蒸气后加装集气袋,测定单日反应器的产气量和甲烷含量.气体体积通过湿式气体流量计测定;气体中甲烷含量通过便携式红外沼气测定仪(Geothch GEM5000,英国)测定.

1.4 微生物种群结构分析

各反应器泥样通过冻干机(Freezezone 1L,美国 Labconco)处理后,使用 DNA 提取试剂盒(D5625,美国 Omega Bio-Tek)提取 DNA,提取 DNA 后使用 Nanodrop ND1000 测定 DNA 的纯度和浓度.后续采用高通量 16S rRNA 基因测序方法,使用标准协议的 Illumina MiSeq 平台测序扩增子的混合物.所用细菌引物为 338F(5'-ACTCCTACGGGAGGC AGCA-3')和 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')^[12],所用古菌引物为 524F-10-ext(5'-TGYCAGCCGCC-GCGGTAA-3')和 Arch958R mod(5'-YCCGCGCTT-GAVTCCAATT-3')^[13],检测定量后进入 Illumina MiSeq platform(Illumina PE300,美国)上机分析.

2 结果与讨论

2.1 不同类型及浓度范围碱度物质对污泥减量及产气的影响

污泥减量是剩余污泥厌氧消化效果的重要标准.污泥减量的直接表现为厌氧消化后污泥 VS 浓度的变化,表明了其中有机物的消耗.剩余污泥经水解、酸化、产气作用不断地液化减量,并最终表现为污泥的 VS 持续下降^[14].

由图 1(a)可知,与 BLANK 对比后可得出投加碱度时都会对 VS 减量率有所提高,而对 TS 减量率有所降低.VS 减量率 Na₂CO₃(2000)、KHCO₃(2000)、NaHCO₃(2000)、NaHCO₃(3000)、NaHCO₃(4000)₃与 BLANK 反应器相比分别提高了 2.76%、7.03%、1.3%、3.01%、6.92%,而 TS 减量率 Na₂CO₃(2000)、KHCO₃(2000)、NaHCO₃(2000)、NaHCO₃(3000)、NaHCO₃(4000)₃与 BLANK 反应器相比分别降低了 3.61%、4.07%、6.53%、8.92%、8.79%.通过计算可得反应器 VS/TS 值依次为 0.82,0.73,0.68,0.72,0.67,0.63,相较于 BLANK,投加碱度时 VS/TS 都较低.原

因在于投加碱度后有机物的含量较 BLANK 有所下降,而无机物含量有所升高,综合导致 VS/TS 升高。当投加浓度均为碱度 2000mg/L 时,投加 Na_2CO_3 减量率最高,VS、TS 减量率分别为 41.34%、39.14%。在投加同一碱度物质 NaHCO_3 ,浓度分别为 2000,3000,

4000mg/L 时,VS 减量率随浓度上升而增加,TS 减量率随浓度上升而减小,同时综合考虑 VS/TS 值,说明反应器中随着碱度增加,有机成分比例减小,与 BLANK 对比无机含量上升,这是由于外部投加钠盐、钾盐对 TS 造成了影响。

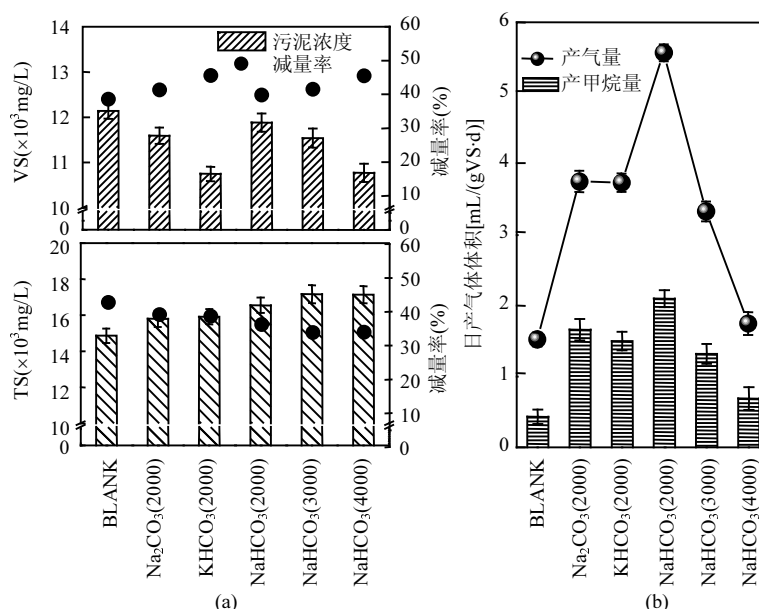


图1 投加不同碱度下污泥减量及产气情况

Fig.1 The reduction of waste activated sludge and the gas production when added different types and concentrations of alkalinity

在图 1(b)中,投加碱度会促进产气和产甲烷,相同浓度下,投加这 3 种碱度物质都有利于产气,且 $\text{NaHCO}_3 > \text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{KHCO}_3$, NaHCO_3 促进产气效果最好,平均产气量为 5.52mL/(gVS-d),平均产甲烷量为 2.10mL/(gVS-d)。碱度物质 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 相比较时, HCO_3^- 更易转化为 CO_2 ,增大了氢营养型产甲烷菌利用氢的速率,而 KHCO_3 促进产气能力又低于 2 种钠盐,表明钾离子抑制浓度低于钠离子,这与陈志剑^[15]研究中提出钾离子比钠离子对厌氧消化中度抑制浓度低这一现象相符。投加相同碱度物质 NaHCO_3 浓度以 2000,3000,4000mg/L 增加时,促进产气能力有所减弱。

2.2 不同类型及浓度范围碱度物质对污泥水解产酸阶段的影响

剩余污泥中的蛋白质降解后释放 NH_4^+-N ,多聚磷酸盐和脂质双分子层降解产生 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$,所以消化上清液中 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 含量与污泥水解酸化性能相关。从图 2 中可以得到,投加碱度后 NH_4^+-N 与 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 释放量都比 BLANK 组要高。当同等浓度的碱

度投加时, Na_2CO_3 释放的 NH_4^+-N 浓度最高,为 557.22mg/L。游离氨也是导致产甲烷菌活性抑制的主要原因,系统中游离氨浓度为 24.17mg/L,远低于抑制浓度 600mg/L^[16]。在投加同种碱度 NaHCO_3 的不同浓度溶液时,随着浓度升高 NH_4^+-N 释放和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 释放浓度都有所升高。 NH_4^+-N 浓度远高于 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度,这是因为 NH_4^+-N 是由生物降解有机氮产生, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 是由脂质双分子层和多磷酸盐粒子生物降解产生,且脂质双分子层和多磷酸盐粒子含量远小于尿素和蛋白质含量,导致较少的 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 释放。

从图 3 得到 Na_2CO_3 能强化酸化反应,除 Na_2CO_3 外其他种类和浓度的碱度投加反应器中 VFAs 有所降低,但结合图 1(b)对比 BLANK 组,各投加碱度组产气能力都有所提高,因此说明,实测反应器中的 VFAs 只是反映末期的产酸剩余,部分 VFAs 已被利用产气,表明投加的碱度物质促进了产甲烷反应,消耗了 VFAs。而在投加浓度相同时, Na_2CO_3 (2000)与 KHCO_3 (2000)反应器产气能力均等的情况下, Na_2CO_3 (2000)反应器中剩余 VFAs 量远大于

$\text{KHCO}_3(2000)$, 表明 Na_2CO_3 较 KHCO_3 更有利于促进产酸; 同理, 在投加同种碱度物质 NaHCO_3 浓度分别为 2000, 3000, 4000 mg/L 时, 由于产气能力下降, 也间接表明在 2000~4000 mg/L 的浓度范围内提高碱度浓度会促进产酸能力。

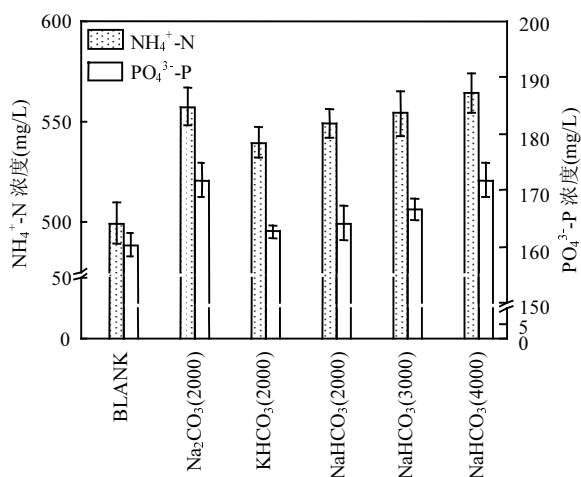


图2 投加碱度对 NH_4^+-N 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 释放的影响

Fig.2 Effect of the added alkalinity on the release of NH_4^+-N and $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$

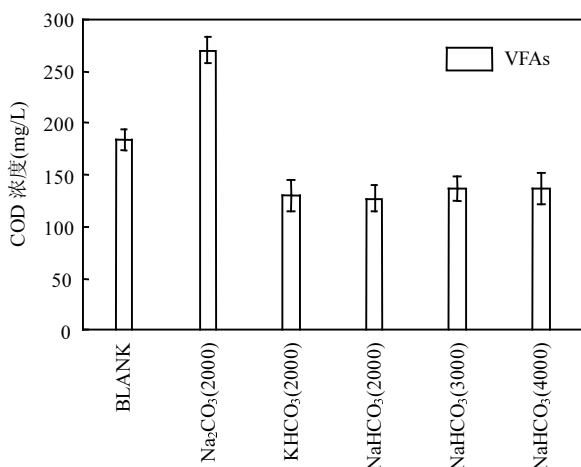


图3 不同碱度下污泥产酸效果

Fig.3 Acid production under different alkaline conditions

2.3 不同类型及浓度范围碱度物质对污泥脱水性能影响

剩余污泥厌氧消化后还涉及到污泥与消化液分离这一流程, 而污泥脱水性能是这一步骤的重要评价指标. 胞外聚合物(EPS)中含有大量水分, 研究表明 EPS 与污泥脱水性能有直接关系^[17]. 但 EPS 各组分与脱水性能之间的联系说法不一。

图 4(a)为各反应器 EPS 总量中的 SC、SP、DNA

含量. 其中 SC 与脱水性能在各反应器中的表现基本吻合, 说明影响此反应器中脱水性能的主要指标为 EPS 中的多糖组分. 从图 4(b)中可以看出, 投加碱度可以恶化污泥脱水性能, 而其中 NaHCO_3 最为显著, CST 值为 84.07 s/mL, 相同浓度下 3 种物质 $\text{NaHCO}_3 > \text{KHCO}_3 > \text{Na}_2\text{CO}_3$ 的恶化效果, 在 $\text{NaHCO}_3(2000)$ 、 $\text{NaHCO}_3(3000)$ 、 $\text{NaHCO}_3(4000)$ 反应器中投加不同浓度 NaHCO_3 时, 脱水性能随浓度增加而恶化。

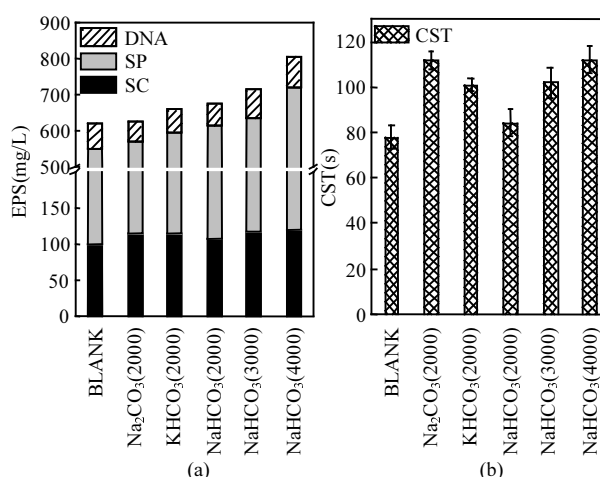


图4 投加碱度对污泥厌氧消化脱水性能和 EPS 的影响

Fig.4 Effects of adding alkalinity on the dewatering performance and EPS of sludge anaerobic digestion

2.4 各反应器中碱度消耗情况

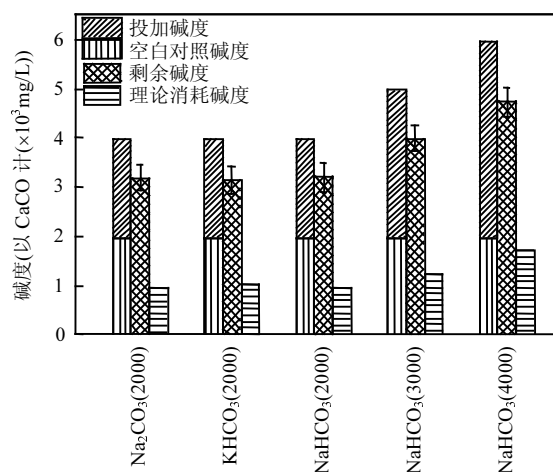


图5 投加碱度消耗的情况

Fig.5 The case of added alkalinity consumption

试验测得碱度为总碱度, 反应器自身存在碱度, 投加碱度后, 都有不同程度的消耗. 碱度最终会以溶解态、气体溢出以及无机沉淀的形式存在. 同种浓度,

碱度消耗量没有显著明显,投加不同浓度的 NaHCO_3 ,消耗碱度随浓度增加而增加.图 5 中投加相同浓度碱度时,3 种不同碱度物质剩余碱度和消耗碱度无明显差别,而当投加碱度物质种类相同,浓度变化为 2000,3000,4000mg/L 时,随着投加浓度的升高,碱度消耗量和剩余量也有所升高,结合图 1,3 中 VS 减量率升高与产酸能力提升,说明消耗碱度参与这 2 种反应,且反应器剩余碱度提供了更高的缓冲能力.

2.5 不同种类及浓度碱度对污泥厌氧消化种群结构的影响

采用高通量测序得出各反应器中生物种群结构,结合前几节结论进一步分析投加碱度类型与浓度对中温厌氧消化性能的影响.图 6 中为投加不同类型及浓度碱度物质后中温厌氧消化系统中污泥在属分类水平上细菌和古菌群落结构相对比例.

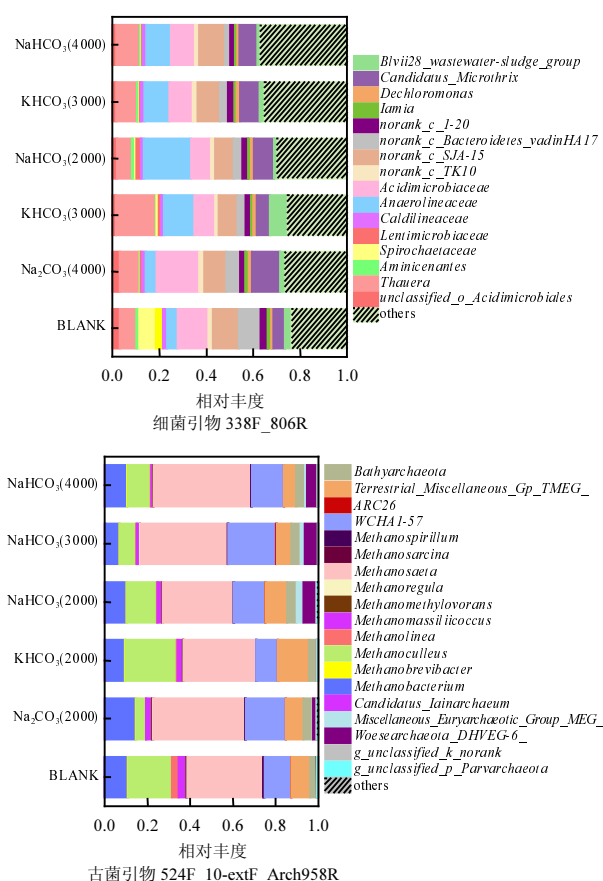


图 6 投加不同碱度时厌氧消化反应器中污泥在属水平上细菌和古菌群落多样性分析

Fig.6 Analysis on the diversity of bacteria and archaea at the genus level in anaerobic digestion reactor with different alkalinity

如图 6(a)所示,细菌中主要菌属为 *Thauera*、

Spirochaetaceae、*Anaerolineaceae*、*Acidimicrobiaceae*. 且在各个反应器中所占比例有所差别.其中 *Thauera* 属于兼性反硝化菌,具有脱氮^[18]及合成内碳源^[19]的功能.主要来源应为投加的剩余污泥.在反应器中相对丰度在 6.48%~16.98%之间.*Spirochaetaceae* 属于螺旋菌科,泛指能氧化硫化氢(H_2S)为元素硫(S)并将硫磺颗粒贮存于细胞内(或分泌于细胞外)的一类细菌. *Anaerolineaceae* 属于常见的发酵细菌^[20],且具有降解碳水化合物和其他细胞物质的功能^[21],可以看出在投加碱度的各反应器中相比于 BLANK 反应器该菌丰度都有所提高,表明投加碱度有促进水解的能力.*Acidimicrobiaceae* 为微酸杆菌^[21],是嗜酸菌的一种,无物质中和情况下会形成大范围的酸性环境,反应器内污泥自身碱度和投加的碳酸盐碱度中和其产生酸性,使反应器处于较为稳定的 pH 值下.

如图 6(b)所示,各反应器相对丰度较大的古菌菌属为 *Methanobacterium*(甲烷杆菌属)、*Methanoculleus*(甲烷囊菌属)、*Methanosaeta*(甲烷鬃菌属). *Methanobacterium* 为甲烷杆菌属^[21],产氢型产甲烷细菌^[24]是一类能以 H_2 和 CO_2 为主要代谢途径的产甲烷菌属.*Methanobacterium* 是产甲烷菌中种类最多的属,到 2001 年已被描述 16 个种. *Methanoculleus* 为氢营养型产甲烷古菌甲烷袋装菌属^[25],连续处理高浓度糖蜜废水的古菌群以 *Methanoculleus* 为主要优势菌群^[26],利用 H_2 和 CO_2 作为底物而生长并产生甲烷.*Methanosaeta* 为乙酸营养型产甲烷古菌甲烷鬃毛菌属,占主导地位,在乙酸浓度较低的条件^[27],*Methanosaeta* 常为优势菌^[24].除此之外各反应器中还有 *Methanobrevibacter* (甲烷短杆菌属)、*Methanolinea*(甲烷绳菌属)、*Methanomassiliicoccus*(甲烷暖球菌属)、*Methanomethylovorans*(甲烷食甲基菌属)、*Methanoregula*(甲烷念珠菌属)、*Methanosarcina*(甲烷八叠球菌属)、*Methanospirillum*(甲烷螺菌属)这几种菌属.各反应器产甲烷菌分别占总古菌的 74.65%、65.86%、70.67%、60.19%、57.62%、68.61%.将各个反应器中相对丰度较高的 *Methanosaeta*、*Methanosarcina* 乙酸营养性产甲烷菌相比较,分别为 35.85%、43.31%、34.04%、33.16%、41.12%、45.75%,其趋势与图 3 中各反应器产酸情况相一致,而氢营养型产甲烷菌无明显规律.在常规厌氧消化产甲烷

过程中,乙酸途径承担 72%左右, H_2 和 CO_2 途径承担 28%左右,说明投加碱度并没有提高常见的氢型产甲烷菌的相对丰度。

3 结论

3.1 通过在中温厌氧消化反应器中投加不同类型和浓度碱度物质的研究,结果表明 Na_2CO_3 从 NH_4^+-N 和 $PO_4^{3-}-P$ 的释放情况相比于其他两种碳酸氢盐更能促进水解酸化反应,在浓度梯度为 2000, 3000, 4000mg/L 时提高 $NaHCO_3$ 浓度对水解酸化过程强化效果变化不明显。

3.2 碱度投加有利于产气,其中 $NaHCO_3$ 产气效果最好,但碱度浓度继续增加到 4000mg/L 则会降低产气性能;投加碱度会使胞外聚合物量增大,影响污泥脱水性能。

3.3 投加碱度都会使碱度消耗量增大,并且随着投加浓度升高,消耗量也增多,产酸能力污泥减量效果会提高;在微生物种群结构中发现,投加碱度没有明显改变氢营养型产甲烷菌的相对丰度。

3.4 以污泥减量为主要目标时, $NaHCO_3$ 为最佳碱度投加类型,有效的通过产气去除污泥中的有机质,且碱度浓度为 2000mg/L 时,减量效果最佳。

参考文献:

- [1] Chen H B, Liu Y, Ni B J, et al. Full-scale evaluation of aerobic/extended-idle regime inducing biological phosphorus removal and its integration with intermittent sand filter to treat domestic sewage discharged from highway rest area [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016,(113):114-122.
- [2] Abe N, Tang Y, Iwamura M, et al. Pretreatment followed by anaerobic digestion of secondary sludge for reduction of sewage sludge volume [J]. *Water Science and Technology*, 2013,67(11):2527-2533.
- [3] Donosobravo A, Perezelvira S, Aymerich E, et al. Assessment of the influence of thermal pre-treatment time on the macromolecular composition and anaerobic biodegradability of sewage sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2011,102(2):660-666.
- [4] 蒋玲燕.污水处理厂污泥厌氧消化优化设计与运行探讨 [J]. *给水排水*, 2015,51(2):32-35.
Jiang L Y. Optimal design and operation of sludge anaerobic digestion in sewage treatment plant [J]. *Water supply and drainage*, 2015, 51(2):32-35.
- [5] 刘存芳.城市有机垃圾厌氧消化 pH 控制动力学研究 [D]. 长沙:湖南大学, 2006.
Liu C F. Study on pH control kinetics in anaerobic digestion of municipal organic waste [D]. Changsha: hunan university, 2006.
- [6] 郑福生,郑淑文.碱度对厌氧体系的影响分析 [J]. *中国高新技术企业*

业, 2008,(10):65-67.

- Zheng F S, Zheng S W. Analysis on the influence of alkalinity on anaerobic system [J]. *China high-tech enterprises*, 2008,(10):65-67.
- [7] 张旭,王宝贞,朱宏.厌氧消化体系的酸碱性及缓冲能力 [J]. *中国环境科学*, 1997,17(6):13-17.
Zhang X, Wang B Z, Zhu H. Acidity and buffering capacity of anaerobic digestion system [J]. *Chinese Environmental Science*, 1997, 17(6):13-17.
- [8] 王家卓,王建龙.缓冲体系对厌氧发酵生物产氢的影响 [J]. *环境科学学报*, 2008,28(6):1136-1140.
Wang J Z, Wang J L. Effect of buffer system on hydrogen production in anaerobic fermentation [J]. *Journal of environmental science*, 2008, 28(6):1136-1140.
- [9] 苑宏英.基于酸碱调节的剩余污泥水解酸化及其机理研究 [D]. 上海:同济大学, 2006.
Yuan H Y. Study on hydrolysis and acidification of surplus sludge based on acid-base regulation and its mechanism [D]. Shanghai: tongji university, 2006.
- [10] Yuan Y, Liu Y, Li B, Wang B, Wang S and Peng Y. Short-Chain Fatty Acids Production and Microbial Community in Sludge Alkaline Fermentation: Long-Term Effect of Temperature [J]. *Bioresource Technology*, 2016,211:685-690.
- [11] 苏高强.剩余污泥碱性发酵产酸性能与优化 [D]. 北京:北京工业大学, 2013.
Su G Q. Acid production and optimization of alkaline fermentation of residual sludge [D]. Beijing: Beijing university of technology, 2013.
- [12] Yuan Y, Wang S Y, Liu Y, et al. Long-term effect of pH on short-chain fatty acids accumulation and microbial community in sludge fermentation systems [J]. *Bioresource Technology*, 2015, (197):56-63.
- [13] Ana C C Pires, Daniel F R Cleary, Adelaide Almeida, et al. Denaturing gradient gel electrophoresis and barcoded pyrosequencing reveal unprecedented archaeal diversity in mangrove sediment and rhizosphere samples [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012,78(16):5520-5528.
- [14] 李方,杨波,田晴,等.水解酸化应用于剩余污泥减量的试验研究 [J]. *环境工程学报*, 2008,2(9):1247-1250.
Li f, Yang B, Tian Q, et al. Experimental study on the application of hydrolytic acidification to the reduction of residual sludge [J]. *Chinese journal of environmental engineering*, 2008,2(9):1247-1250.
- [15] 陈志剑.添加金属离子对有机垃圾两相厌氧消化促进效果的试验研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2007.
Chen Z J. Experimental study on the effect of adding metal ions on two-phase anaerobic digestion of organic waste [D]. Chongqing: chongqing university, 2007.
- [16] 卓杨.高含固污泥水热预处理及厌氧消化组分转化研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
Zhuo Y. Research on hydrothermal pretreatment and anaerobic digestion components transformation of high solids sludge [D]. Xi'an: xi'an university of architecture and technology, 2015.
- [17] 朱建平,彭永臻,李晓玲,等.碱性发酵污泥脱水性能的变化及其原因分析 [J]. *化工学报*, 2013,64(11):4210-4215.
Zhu J P, Peng Y Z, Li X L, et al. Changes of dehydration performance of alkaline fermentation sludge and analysis of its causes [J]. *Journal*

- of chemical industry, 2013,64(11):4210-4215.
- [18] Du R, Cao S, Li B, et al. Simultaneous Domestic Wastewater and Nitrate Sewage Treatment by Denitrifying Ammonium Oxidation (Deamox) in Sequencing Batch Reactor [J]. *Chemosphere*, 2017,(174):399-407.
- [19] Chen Y, Li M, Meng F, et al. Optimal Poly (3-Hydroxybutyrate/3-Hydroxyvalerate) Biosynthesis by Fermentation Liquid From Primary and Waste Activated Sludge [J]. *Environmental Technology*, 2014, 35(14):1791-1801.
- [20] Liang B, Wang L Y, Serge M M, et al. Anaerolineaceae and Methanosaeta turned to be the dominant microorganisms in alkanes-dependent methanogenic culture after long-term of incubation [J]. *AMB Express*, 2015,5(1):117.
- [21] Yamada T, Sekiguchi Y, Imachi H, et al. diversity, localization, and physiological properties of filamentous microbes belonging to chloroflexi subphylum I in mesophilic and thermophilic methanogenic sludge granules [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, (71):7493-7503.
- [22] 刘晋仙,李 磊,景炬辉,等.中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性 [J]. *环境科学*, 2017,38(1):318-326.
- Liu J X, Li J J, Jing J h, et al. Microbial community composition and environmental adaptability of copper tailings ponds in shibahe river, zhongtiao mountain [J]. *Environmental science*, 2017,38(1):318-326.
- [23] 赵 光.两段式厌氧工艺产甲烷发酵特性及微生物生态调控机制研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- Zhao G. Study on the characteristics of two-stage anaerobic methane-producing fermentation and microbial ecological regulation mechanism [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [24] 孙 睿.Mec 用于剩余污泥产氢产甲烷效能及微生物群落结构解析 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
- Sun R. Analysis on the efficiency and microbial community structure of Mec in the production of hydrogen and methane from surplus sludge [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [25] 麻婷婷,承 磊,刘来雁,等.不同抑制剂对乙酸降解产甲烷及产甲烷菌群结构的影响 [J]. *微生物学报*, 2015,55(5):587-597.
- Ma T T, Cheng L, Liu L Y, et al. Effects of different inhibitors on acetic acid degradation and methanogenic flora structure [J]. *Acta microbiologica sinica*, 2015,55(5):587-597.
- [26] 吕育财,李 宁,郭金玲,等.一组中温厌氧消化菌群高温启动过程中的菌群多样性变化研究 [J]. *环境科学学报*, 2016,36(6):1986-1997.
- Lu Y C, Li N, Guo J l, et al. Study on the change of microflora diversity during the high temperature initiation of a group of anaerobic digestion microflora at medium temperature [J]. *Journal of environmental science*, 2016,36(6):1986-1997.
- [27] 李凯平.长链烷烃厌氧降解产甲烷体系的菌群组成及变化 [D]. 上海:华东理工大学, 2012.
- Li K P. Composition and changes of the microflora of methane production system by anaerobic degradation of long-chain alkanes [D]. Shanghai: east China university of science and technology, 2012.

作者简介: 赵明明(1993-),女,山东日照人,北京工业大学环境与能源工程学院硕士研究生,主要从事污水、污泥处理与水污染控制研究.发表论文 1 篇.