

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.01.010

温度对CSTR-EGSB两段式厌氧反应器的影响

鹿晓菲¹, 许玉琳¹, 马放², 王晨熹¹, 李敏¹

(1. 沈阳建筑大学 市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 哈尔滨工业大学环境学院 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 针对沼气工程(尤其是北方低温地区)产气效能和运行稳定性对温度条件的耐受十分脆弱的问题,采用连续搅拌釜-厌氧膨胀床(CSTR-EGSB)两段式厌氧反应器,以牛粪和水稻秸秆为底物,分别对不同温度条件下的产酸和产甲烷效能进行了评估。结果表明,CSTR产酸反应器中SCOD浓度、pH、总氨氮(TAN)浓度等指标在25~35℃范围内随温度变化的差异较大;当温度由35℃降至25℃时,乙酸占总挥发性脂肪酸(VFAs)的比例由62.9%~70.5%降至46.3%~59.4%。EGSB产甲烷反应器在温度降至15℃时,仍有127.33 mL/(L·d)的沼气容积产率、33.3%的甲烷占比和32.3%的TCOD去除率。高通量测序结果表明,*Methanomicrobiaceae*(甲烷微菌科)可能在低温产甲烷过程中发挥了重要作用。低温下乙酸生成受限、丙酸积累加剧可能是导致沼气工程产甲烷效率较低的原因之一,可深度开发基于*Methanomicrobiaceae*和*Euryarchaeota_unclassified*的抗低温型产甲烷菌剂。

关键词: 两段式厌氧消化; CSTR-EGSB; 厌氧反应器; 低温

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)01-0065-08

Effect of Temperature on CSTR-EGSB Two-stage Anaerobic Reactor

LU Xiao-fei¹, XU Yu-lin¹, MA Fang², WANG Chen-xi¹, LI Min¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Biogas production efficiency and operational stability of biogas project (especially in the low temperature areas in the north) are very sensitive to the temperature conditions. This paper used a two-stage anaerobic reactor consisting of a continuous stirred tank and an expanded granular sludge bed (CSTR-EGSB) to evaluate the acidogenesis and methanogenesis efficiency at different temperatures with cow manure and rice straw as substrates. The SCOD, pH, total ammonia nitrogen (TAN) in the CSTR (acidogenic reactor) varied greatly when the temperature was in the range of 25–35 °C. When the temperature decreased from 35 °C to 25 °C, the proportion of acetic acid in total volatile fatty acids (VFAs) decreased from 62.9%–70.5% to 46.3%–59.4%. When the temperature of EGSB (methanogenic reactor) was decreased to 15 °C, the biogas volumetric yield, proportion of methane and TCOD removal rate were still 127.33 mL/(L·d), 33.3% and 32.3%. The high-throughput sequencing results showed that *Methanomicrobiaceae* might play an important role in the methanogenesis process at low temperature. The

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(2021-BS-171); 辽宁省教育厅科学研究项目(lnjc201911); 城市水资源与水环境国家重点实验室开放基金资助项目(QG202235)

通信作者: 鹿晓菲 E-mail: luxiaofei919@163.com

limited acetic acid generation and intensified propionic acid accumulation at low temperature might be one of the reasons for the low methanogenesis efficiency of the biogas project. Therefore, psychrophilic methanogenic agents based on families of *Methanomicrobiaceae* and *Euryarchaeota_unclassified* can be further developed.

Key words: two-stage anaerobic digestion; CSTR-EGSB; anaerobic reactor; low temperature

随着我国农业和畜禽养殖业的高速发展,每年约有超过 7×10^8 t的作物秸秆和 40×10^8 t的畜禽粪便产生^[1]。以厌氧消化技术为手段、沼气生产为核心的能源结构调整和生态农业建设,是当前我国农业废弃物减排、餐厨垃圾处置、清洁能源生产、资源循环利用的重要途径^[2]。截至2020年,国内农村沼气设施的规模高达3 007.7万户,各类沼气工程超过9.3万处^[3]。

温度是影响厌氧消化效能和沼气产量最重要的因素之一,因为温度是厌氧消化过程中微生物及功能酶活性的决定性因素^[2,4]。多数情况中温或适温条件下的厌氧降解和产气速率更高,而较低温度下厌氧消化的效果却不够理想^[5-6]。虽然较高温度下厌氧发酵底物的降解效率良好,但也常因富氮底物(如畜禽粪便等)的存在引发系统氨抑制,继而导致厌氧消化工艺的失效^[7]。Chen等^[8]发现,在猪粪废水的厌氧消化过程中,当体系中氨的浓度高于3 000 mg/L时,甲烷产量受到了严重抑制。当沼气工程在室温或低温下运行时,能源的消耗虽大幅降低,但系统效率较低,过量挥发性脂肪酸(VFAs)的积累常导致系统出现酸中毒现象^[9-10]。我国北方地区寒冷的气候条件限制了户用沼气工程的推广,沼气工程无法实现规模化稳定运行,严重制约了北方地区的能源结构调整和废弃物低碳减排^[11]。因此,如何在不同的温度条件下实现厌氧消化过程的稳定运行,尤其是北方低温地区如何提升底物降解效率和甲烷产率,是农业废物处理领域的重要研究方向。

许多学者将目光聚焦于开发一种高效、理想的厌氧消化系统,不仅要求系统具有较好的厌氧消化效率,更希望系统能够在低温环境下最大限度地减少动力和热量的能源消耗(如尽量减少辅助增温、降低搅拌频率等)^[12],即具有良好的低温兼容能力。两段式厌氧工艺将产酸段和产甲烷段分隔开来,在厌氧消化反应过程中能够使不同功能的微生物最

大限度地发挥各自的作用,极大地提升了产气效率,近年来在复杂有机废弃物的厌氧降解领域得到了广泛应用^[13]。

连续搅拌釜式反应器(CSTR)是厌氧消化工艺中经常采用的最为传统的产酸反应器之一,具有物料混合均匀、传质效能高、进出料方便等优点^[14]。赵光^[15]利用连续搅拌釜-内循环(CSTR-IC)复合厌氧发酵系统处理牛粪,该系统集合了两种反应器的特点,并充分利用内循环厌氧反应器(IC)自身的动力学优势,增强传质作用,提高产气率;对IC产甲烷反应器进行梯度降温,发现当温度低于20℃时沼气产率波动幅度较大,在15℃时产气量降至50~90 mL/(L·d),最终停止产气。笔者所在团队研究证明,厌氧膨胀床式反应器(EGSB)因其特殊的构造和良好的设计,在难降解有机物厌氧消化的产甲烷阶段,尤其在低温条件运行时表现出一定的优越性^[16]。因此,笔者在结合北方低温地区沼气工程产气率低、运行不稳定等现状问题的基础上,利用团队设计开发的改进型连续搅拌釜-厌氧膨胀床(CSTR-EGSB)两段式厌氧反应器,对牛粪和水稻秸秆复合体系进行厌氧消化处理,研究了不同温度条件下,系统内底物降解、VFAs生成、氨水平、沼气产率、甲烷占比等指标,并解析了EGSB反应器中产甲烷微生物群落结构随温度的变化规律,以期得到不同温度条件下CSTR-EGSB两段式厌氧反应器的运行工艺,为高纬度地区厌氧消化工程的高效稳定运行提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

作为产酸反应器厌氧消化底物的牛粪、水稻秸秆取自黑龙江省牡丹江市某农场。牛粪取样后迅速置于4℃保存;秸秆自然晾干后破碎成1~2 cm小段,发酵前于1%的NaOH溶液中进行7 d的浸泡预处理。产酸反应器接种物采用农场沼气池沼液(取样季节为夏季,底物为牛粪),取样后同样迅速置于

4℃保存,保存期限不超过7 d。实验用底物及接种物性质见表1。

表1 实验用底物及接种物性质
Tab.1 Properties of substrates and inoculum used for test

项目	总固体 TS/%	挥发性固 体 VS/%	总碳 TC/%	总氮 TN/%	碳氮比 C/N
牛粪	17.84± 0.85	70.60±1.81	36.76± 1.33	2.75± 0.08	13.39± 0.35
水稻秸秆 (预处理)	12.86± 0.24	93.28±2.07	25.33± 1.21	0.48± 0.01	52.52± 0.81
沼液	6.81± 0.13	74.33±3.58	31.46± 2.08	1.55± 0.02	20.33± 0.65

1.2 实验装置

图1为实验室自行设计并开发的改进型CSTR-EGSB两段式厌氧反应器(中间带有过滤分离装置)。采用CSTR反应器作为产酸反应器,有效容积为5.5 L,高径比为2:1,总高为34 cm,内部载有自动化螺旋搅拌装置;采用EGSB反应器作为产甲烷反应器,高径比为9.3:1,总高为90 cm,三相分离器直径为8 cm;过滤装置中过滤材料采用尼龙滤网,孔径为1 mm。产酸反应器、过滤装置、产甲烷反应器均由有机玻璃制成,三者的有效容积比为2.5:1:1。产酸相出料经过滤装置分离并经适宜浓度稀释后,以连续进料的方式进入EGSB产甲烷相。

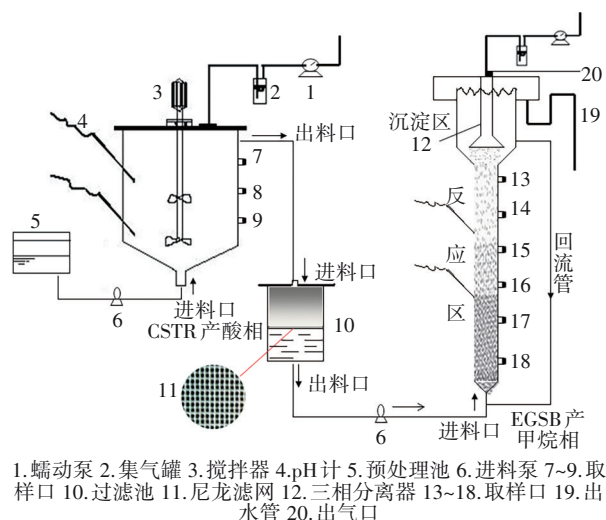


图1 改进型CSTR-EGSB两段式厌氧反应装置示意

Fig.1 Schematics of the improved CSTR-EGSB two-stage anaerobic reactor

1.3 实验方法

CSTR产酸反应器以间歇方式运行。发酵开始

前,一次性向反应器投加牛粪和水稻秸秆,底物总投加量为反应器有效容积的2/3。调节初始TS为4%,C/N为27:1,牛粪与水稻秸秆的比例约1:1.6(以VS计),接种物(沼液)的质量分数为30%,控制底物初始pH为6.8±0.2。向反应器通入氮气30 min以保证厌氧环境,于不同温度条件(35、30、28、25℃)下分别发酵60 d。测定发酵过程中SCOD、pH、总氮氮(TAN)的变化,以及VFAs的组成和浓度变化。

EGSB反应器以连续、升流模式运行。将35℃条件下CSTR产酸反应器发酵60 d后的酸化液经装置过滤后,调节进料pH为7.2±0.2,以有机负荷为3.0 kgVS/(m³·d)运行反应器,进水量为2.5 L/h,上升流速为2.79 m/h,水力停留时间为10 d,初始启动温度为30℃,每当沼气产量基本稳定时将反应器梯度降温,温度的选择为30、25、20、18和15℃。测定反应器在不同温度条件的沼气容积产量、平均产甲烷菌活性及平均TCOD去除率,取样进行产甲烷微生物群落结构的测定。

1.4 分析方法

pH采用pH计测定;TC和TN采用总碳分析仪测定;TS、VS、SCOD、TCOD、TAN采用标准方法测定^[17];沼气中甲烷所占比例、VFAs组成及浓度采用气相色谱仪测定;秸秆的微观形态采用扫描电镜测定;产甲烷菌活性通过测定辅酶F420活性估算,辅酶F420浓度采用荧光分光光度计测定^[18];沼气产量采用湿式气体流量计测定;产甲烷微生物群落结构采用MiSeq高通量测序进行分析,PCR扩增时产甲烷古菌16S rRNA基因组以通用引物MLf(5'-GGTG-GTGTMGATTCACACARTAYGCWACAGC-3')和MLr(5'-TTCATTGCRTAGTTWGGRTAGTT-3')分别作为正向和反向引物。

2 结果与讨论

2.1 温度对CSTR产酸反应器的影响

2.1.1 SCOD的变化

不同温度条件下CSTR产酸相中SCOD的变化情况见图2。可知,当温度高于28℃时,反应器中SCOD均出现先升高后降低的变化趋势,原因可能是底物中易降解有机物首先被水解发酵细菌分解为可溶性大分子,随后进一步被降解利用变为短链挥发性脂肪酸及其他小分子物质^[19]。35℃条件下底物的降解程度最高,反应器中SCOD最高可达

24.6 g/L。室温(25℃)条件下SCOD在60 d内呈现缓慢上升趋势。对比之下,25℃条件下SCOD的浓度水平较其他3组显著降低,说明室温下底物的降解利用速率较慢,水解、酸化细菌的代谢活性较低。

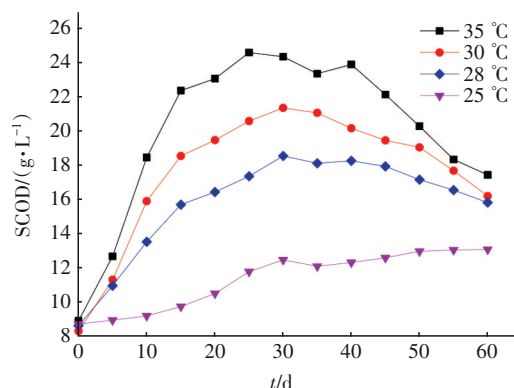


图2 不同温度条件下CSTR产酸反应器中SCOD变化
Fig.2 Change of SCOD in CSTR acidogenic reactor at different temperatures

2.1.2 pH和氨氮的变化

图3(a)为不同温度条件下CSTR产酸反应器中pH的变化情况。可知,各温度条件下产酸系统的pH在6.46~7.25范围内波动。35℃时,pH由发酵开始的7.25逐渐下降至第45天的6.46后缓慢升高;30℃时,pH在逐渐下降至第50天的6.47后缓慢上升;28℃时,pH随发酵时间缓慢下降至6.68;25℃时,pH缓慢下降且幅度最小。pH的下降与水解酸化菌分解营养物质产生VFAs存在直接关系。温度越高,水解酸化菌的代谢活性越强,底物被分解的程度亦越高;当温度较高时(35和30℃),由于微生物的代谢活动较旺盛,推测一部分VFAs开始被产甲烷微生物利用,因此造成发酵后期pH的小幅上升。

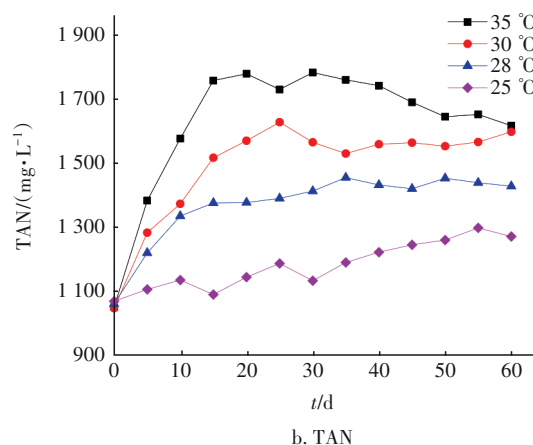
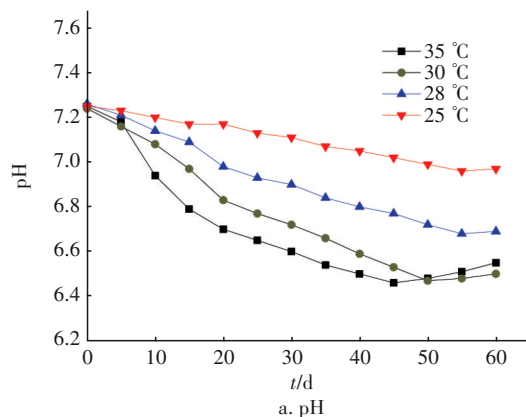
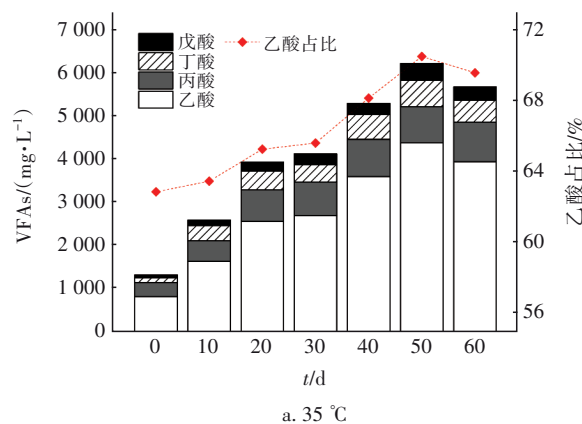


图3 不同温度条件下CSTR产酸反应器中pH和TAN变化
Fig.3 Change of pH and TAN in CSTR acidogenic reactor at different temperatures

如图3(b)所示,随着底物中的有机含氮物质被降解为无机氨,各温度条件下的TAN在发酵开始10~20 d左右均出现了不同程度的快速上涨,且温度越高,TAN上涨的幅度越大。35℃时TAN在15 d内从1 050 mg/L迅速上涨到1 758 mg/L后基本保持稳定,30 d后开始出现下降。下降的主要原因可能是高浓度的 NH_3 在温度较高的条件下更容易出现挥发性损失,以及温度适宜时更强的氨氧化作用^[7]。25℃时,TAN在60 d内持续缓慢增加,说明含氮有机底物处于缓慢分解状态。研究表明,当pH在7.4以上时,TAN高于1 500 mg/L的系统较易出现氨抑制风险^[20]。虽然温度较高时出现氨抑制的风险更大^[21],但由于本实验采用两段式厌氧反应装置,CSTR产酸反应器中pH始终处于较低水平,因此在35℃的条件下有效控制了氨抑制风险的发生。

2.1.3 VFAs的组成及浓度

不同温度条件下CSTR产酸反应器中VFAs的组成及浓度如图4所示。



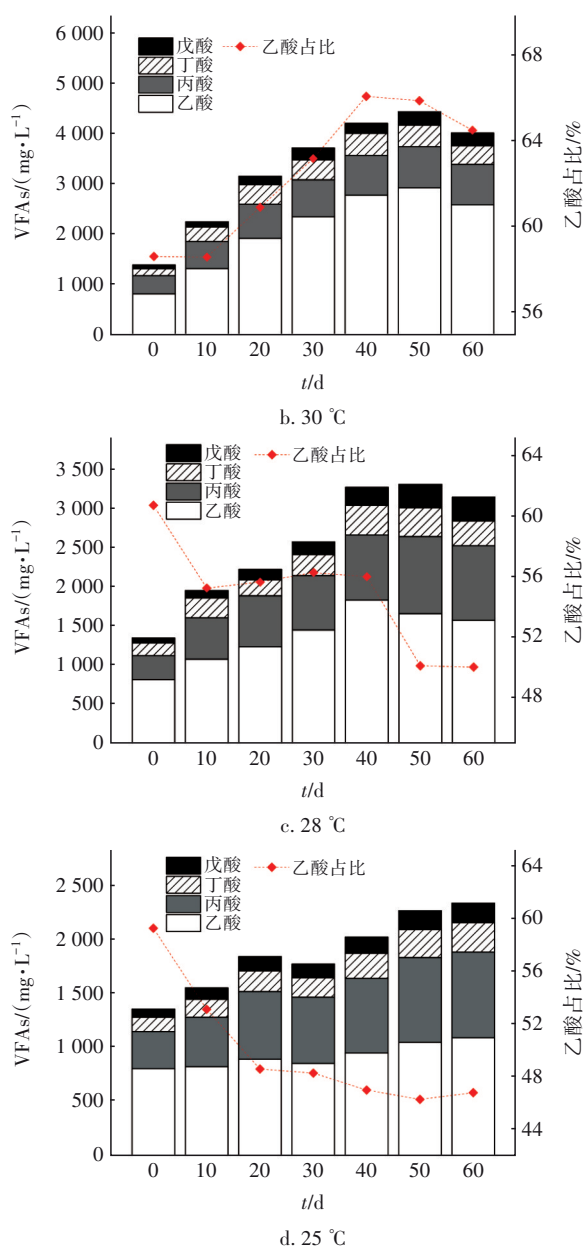


图4 不同温度条件下CSTR产酸反应器中VFAs变化

Fig.4 Change of VFAs in CSTR acidogenic reactor at different temperatures

由图4可知,CSTR产酸反应器中的VFAs由乙酸、丙酸、丁酸和戊酸组成,其中乙酸和丙酸是主要的挥发酸,丁酸和戊酸浓度相对较低。随着温度的下降,底物消化所产生的VFAs总量不断降低,温度为35和25 °C时,反应器中VFAs的最大浓度分别为6 220和2 345 mg/L ,可见温度的变化对VFAs的浓度具有重要影响。值得注意的是,各样本中乙酸占总VFAs的比例随温度的下降而逐渐降低,35 °C时乙酸占比为62.9%~70.5%,30 °C时该比例为

58.6%~66.1%,28 °C时该比例为50.1%~60.7%,而25 °C时乙酸仅占46.3%~59.4%,推测低温时产乙酸菌的代谢速率相比于其他类型的产酸菌更易被抑制。相对而言,丙酸所占VFAs的比例随温度的下降而逐渐增加。资料显示,在产甲烷过程中,乙酸因吉布斯自由能相对较低更易被产甲烷菌利用,而丙酸则较难被利用或转化,因而较高的丙酸浓度不利于产甲烷过程的进行,甚至会对其产生抑制作用^[22]。因此,推测受微生物代谢活性的影响,低温条件下乙酸生成受限、丙酸积累加剧^[23]是低温影响厌氧消化效能的原因之一。

2.2 温度对EGSB产甲烷反应器的影响

2.2.1 沼气容积产率

图5显示了梯度降温条件下EGSB反应器中沼气容积产率的变化。

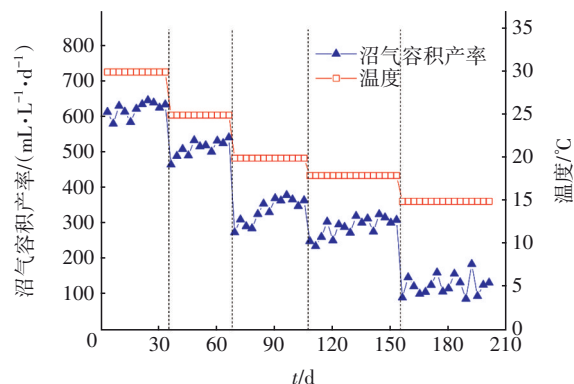


图5 梯度降温条件下EGSB产甲烷反应器沼气容积产率的变化

Fig.5 Change of biogas volumetric yield in EGSB methanogenic reactor at gradient decline of temperatures

由图5可知,随着温度的降低,沼气容积产率呈不断下降的趋势,温度为30 °C时,沼气容积产率平均值约为623.14 $\text{mL}/(\text{L} \cdot \text{d})$;温度降为25 °C时,仍能达到513.86 $\text{mL}/(\text{L} \cdot \text{d})$;20 °C时为338.5 $\text{mL}/(\text{L} \cdot \text{d})$;温度继续下降至18 °C,沼气容积产率小幅降低,为291.69 $\text{mL}/(\text{L} \cdot \text{d})$,但波动明显加剧;当温度降低至15 °C时,波动较为剧烈,但反应器中沼气产率仍能保持在127.33 $\text{mL}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 的水平。此前,赵光^[15]报道在HRT为30 d、有机负荷(OLR)为1.5 $\text{kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 的条件下进行厌氧发酵,当IC产甲烷反应器梯度降温至15 °C时,最高可获得90 $\text{mL}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 的沼气容积产率。相比之下,本研究在低温(15 °C)条件下的沼气容积产率提高了约41.5%,这说明EGSB产甲烷反应器具有一定抵抗低温(<25 °C)的能力,能够

在15℃条件下稳定运行并保持一定的沼气产率,对寒冷地区的沼气工程而言具有良好的应用潜力。

2.2.2 产甲烷菌活性及TCOD去除率

为了解温度对EGSB反应器中产甲烷菌活性的影响,测定了梯度降温条件下沼气容积产率相对稳定时的辅酶F420浓度(以辅酶F420荧光值计)及沼气中甲烷所占比例,结果见图6。可知,当温度由30℃梯度下降至15℃时,虽然辅酶F420浓度随温度的下降不断降低(341.7至153.3),但甲烷占比除25℃与20℃差异较显著($p<0.05$)外,其余每个相邻温度梯度间甲烷占比的差异并不显著($p>0.05$),说明温度虽在一定程度上影响产甲烷菌的活性,但产甲烷菌对梯度降温条件的响应并非特别敏感。在15℃时,EGSB反应器仍能维持33.3%的甲烷占比以及32.3%的TCOD去除率。

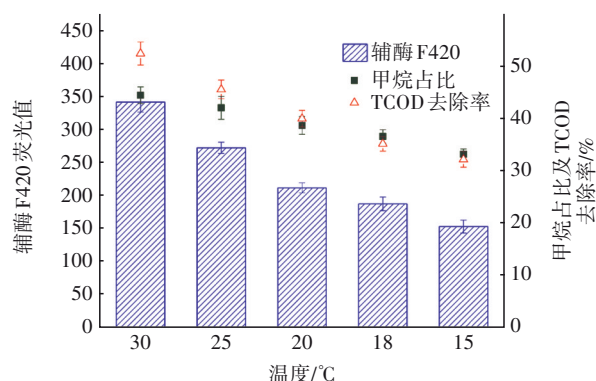


图6 梯度降温条件下EGSB反应器中产甲烷菌活性、甲烷占比及TCOD去除率的变化

Fig.6 Change of activity of methanogens, methane ratio and TCOD removal rate in EGSB methanogenic reactor at gradient decline of temperatures

2.2.3 产甲烷微生物群落结构演替

产甲烷微生物在自然碳素循环中具有重要的作用,是一类能够通过不同途径产生甲烷的古细菌。产甲烷菌具有独特的代谢特性,通常来讲根据其利用底物的类型可以分为乙酸营养型(分解乙酸)、氢营养型(利用 H_2/CO_2 或分解甲酸)及甲基型(分解甲基化C1化合物)产甲烷菌。其中,乙酸营养型产甲烷菌能够直接利用乙酸转化为甲烷,而氢营养型产甲烷作用也是较常见的甲烷代谢途径^[24-25]。

梯度降温条件下EGSB反应器在科水平的产甲烷微生物群落结构如图7所示。各温度条件下,产甲烷微生物种群虽然具有不同的丰度分布,但类别基本同属于9个科。其中,*Methanosarcinaceae*(甲烷

八叠球菌科)在不同温度条件下均占主要地位。据报道,*Methanosarcinaceae*能够通过多种途径产甲烷,其底物包括氢、乙酸、甲基等^[26],说明在梯度降温条件下,甲烷可能是通过不同的途径产生的。*Methanosaetaceae*(甲烷鬃毛菌科)是严格乙酸发酵型产甲烷菌,其丰度随温度的降低而逐渐减小,说明*Methanosaetaceae*对温度较为敏感,同时也揭示本实验中乙酸营养型产甲烷作用随温度的降低而逐渐削弱,这与2.1.3节中乙酸所占VFAs比例随温度的降低而下降达成一致。相反,*Methanomicrobiaceae*(甲烷微菌科)的丰度随温度的下降而不断增加,显示*Methanomicrobiaceae*在低温条件下具有较高活性,可能在低温产甲烷过程中发挥重要作用,但该结论尚需实验进一步证明。在不同温度条件下,氢营养型产甲烷菌:*Methanocorpusculaceae*(甲烷粒菌科)、*Methanospirillaceae*(甲烷螺菌科)的丰度高度相似,表明二者在产甲烷过程中具有一定的协同关系,且均在20℃时具有最佳活性。此外,在15℃时*Euryarchaeota_unclassified*的丰度显著升高,表明其对较低温度下的产甲烷作用具有一定的贡献。上述结论可为开发抗低温型厌氧产甲烷菌剂提供一些理论支撑。

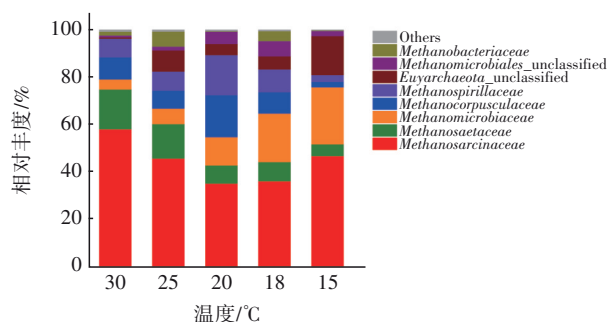


图7 梯度降温条件下EGSB反应器中产甲烷菌群落结构分布
Fig.7 Distribution of methanogen community structures in EGSB methanogenic reactor at gradient decline of temperatures

3 结论

① 在25~35℃范围内,CSTR产酸反应器中SCOD浓度随温度的升高而升高;由于酸化作用,温度越高,反应器中pH越低(最低为6.46);随着温度的升高,TAN浓度增加(最高为1758 mg/L),采用两段式工艺可有效降低氨抑制风险。

② 温度不仅能影响总VFAs的浓度,亦能影响VFAs的配比和组成。随温度的下降(35℃降至

25℃),乙酸占总VFAs的比例不断下降(由62.9%~70.5%降至46.3%~59.4%),丙酸占比不断增加,推测低温下乙酸生成受限、丙酸积累加剧是产甲烷效率较低的原因之一。

③ EGSB产甲烷反应器具有一定的抵抗低温(<25℃)的能力,在梯度降温至15℃时,仍有127.33 mL/(L·d)的沼气容积产率、33.3%的甲烷占比和32.3%的TCOD去除率;辅酶F420荧光结果结合甲烷占比说明,产甲烷菌对梯度降温条件的响应并非特别敏感。

④ *Methanosarcinaceae*在不同温度下均占主要地位;乙酸发酵型产甲烷菌——*Methanosaetaceae*对温度变化十分敏感;*Methanomicrobiaceae*可能在低温产甲烷过程中发挥重要作用;*Euryarchaeota_unclassified*在低温(15℃)条件下的产甲烷活性及作用在未来的研究中具有深度开发价值。

参考文献:

- [1] REN J, YU P, XU X. Straw utilization in China—status and recommendations [J]. Sustainability, 2019, 11(6): 1–17.
- [2] 李月中, 谭婧, 宫亚斌, 等. 中高温过渡区餐厨垃圾厌氧工程案例分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20): 106–111.
LI Yuezhong, TAN Jing, GONG Yabin, et al. Case study of a food waste anaerobic digestion biogas project at mesophilic and thermophilic temperature [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(20): 106–111 (in Chinese).
- [3] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
Rural Social and Economic Investigation Department of the National Bureau of Statistics. China Rural Statistical Yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020 (in Chinese).
- [4] LU X, WANG H, MA F, et al. Effects of an iron oxide-zeolite additive on process performance of anaerobic digestion of swine waste at mesophilic, ambient and psychrophilic temperature [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2018, 4: 1014–1023.
- [5] 郑嘉熹, 祝金星, 刘吉宝, 等. 基于温差的规模化生活垃圾干式厌氧发酵工艺的产气特征[J]. 环境工程学报, 2022, 16(9): 2958–2970.
ZHENG Jiayi, ZHU Jinxiang, LIU Jibao, et al. Performance of biogas production in a full-scale dry anaerobic digestion of municipal solid waste based on the temperature difference [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(9): 2958–2970 (in Chinese).
- [6] LIU Y, FANG J, TONG X, et al. Change to biogas production in solid-state anaerobic digestion using rice straw as substrates at different temperatures [J]. Bioresource Technology, 2019, 293: 122066.
- [7] YELLEZUOME D, ZHU X, WANG Z, et al. Mitigation of ammonia inhibition in anaerobic digestion of nitrogen-rich substrates for biogas production by ammonia stripping: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 157: 112043.
- [8] CHEN C, ZHENG D, LIU G, et al. Continuous dry fermentation of swine manure for biogas production [J]. Waste Management, 2015, 38: 436–442.
- [9] DENG L, CHEN C, ZHENG D, et al. Effect of temperature on continuous dry fermentation of swine manure [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 177: 247–252.
- [10] TIWARI B R, ROUISSI T, BRAR S K, et al. Critical insights into psychrophilic anaerobic digestion: novel strategies for improving biogas production [J]. Waste Management, 2021, 131: 513–526.
- [11] 赵会林, 鲁新蕊. 北方寒冷地区沼气池的应用与发展研究[J]. 东北水利水电, 2019, 37(5): 67–68, 70.
ZHAO Huilin, LU Xinrui. Application and development study of biogas digester in northern cold area [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2019, 37(5): 67–68, 70 (in Chinese).
- [12] 昌盛, 刘枫, 李建政. 2种启动方式下CSTR厌氧甲烷发酵系统的运行特性比较[J]. 环境工程学报, 2017, 11(2): 689–694.
CHANG Sheng, LIU Feng, LI Jianzheng. Comparing operational characteristics of anaerobic methanogenic fermentation in CSTR system under two different start-up conditions [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(2): 689–694 (in Chinese).
- [13] AKYOL Ç, AYDIN S, INCE O, et al. A comprehensive microbial insight into single-stage and two-stage anaerobic digestion of oxytetracycline-medicated cattle manure [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 303: 675–684.
- [14] HOLL E, STEINBRENNER J, MERKLE W, et al. Two-stage anaerobic digestion: state of technology and

- perspective roles in future energy systems [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 360: 127633.
- [15] 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 Guang. Performance of Methane Production in Two-stage Anaerobic Digestion and Microbial Ecological Regulation Mechanism [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese).
- [16] 鹿晓菲. 铁氧化物-沸石复合物强化两段式厌氧工艺处理效能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- LU Xiaofei. Enhanced Efficiency of Two-stage Anaerobic Digestion by an Iron Oxide-zeolite System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese).
- [17] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [M]. 21st ed. Washington D C: APHA, 2005.
- [18] XI Y, CHANG Z, YE X, *et al.* Methane production from wheat straw with anaerobic sludge by heme supplementation [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 172: 91-96.
- [19] STOWE E J, COATS E R, BRINKMAN C K. Dairy manure resource recovery utilizing two-stage anaerobic digestion—implications of solids fractionation [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 198: 237-245.
- [20] XIAO Y, YANG H, ZHENG D, *et al.* Alleviation of ammonia inhibition in dry anaerobic digestion of swine manure [J]. *Energy*, 2022, 253: 124149.
- [21] 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.
- [22] WU Y, WANG C, LIU X, *et al.* A new method of two-phase anaerobic digestion for fruit and vegetable waste treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 211: 16-23.
- [23] LU X, WANG H, MA F, *et al.* Improved process performance of the acidification phase in a two-stage anaerobic digestion of complex organic waste: effects of an iron oxide-zeolite additive [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 262: 169-176.
- [24] FERRY J G. The chemical biology of methanogenesis [J]. *Planetary and Space Science*, 2010, 58 (14/15): 1775-1783.
- [25] JEONG S Y, KIM T G. Determination of methanogenesis by nutrient availability via regulating the relative fitness of methanogens in anaerobic digestion [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 838(1): 156002.
- [26] ZIGANSHINA E E, IBRAGIMOV E M, VANKOV P Y, *et al.* Comparison of anaerobic digestion strategies of nitrogen-rich substrates: performance of anaerobic reactors and microbial community diversity [J]. *Waste Management*, 2017, 59: 160-171.

作者简介: 鹿晓菲(1986-), 女, 黑龙江牡丹江人, 博士, 讲师, 主要研究方向为有机废水/废物厌氧消化及资源与能源化利用技术。

E-mail: luxiaofei919@163.com

收稿日期: 2022-09-27

修回日期: 2022-11-06

(编辑: 沈靖怡)

像保护眼睛一样保护生态环境,
像对待生命一样对待生态环境