

氨氮浓度对鸡粪中高温甲烷发酵的影响

乔 玮^{1,2},毕少杰¹,熊林鹏¹,鞠鑫鑫³,董仁杰^{1,2*} (1.中国农业大学工学院,国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术研发(实验)中心,北京 100083; 2.中国农业大学烟台研究院,山东 烟台 264670; 3.山东中农三月环保科技股份有限公司,山东 烟台 264670)

摘要:为探究氨氮浓度对鸡粪中高温甲烷发酵的影响,采用固定水力停留时间(HRT,20d),提高进料总固体浓度(TS,5%、7.5%和10%)的方式增加氨氮浓度,通过265d的长期甲烷发酵试验,比较了不同氨氮浓度条件下鸡粪中高温甲烷发酵效果和污泥的比产甲烷活性。结果显示,TS由5%增至10%,中高温反应器中氨氮浓度由2.1~2.5g/L增至6.1~6.5g/L,对应的比产甲烷活性分别降低了44%和100%;中温反应器中挥发性脂肪酸由0.4g/L增至7.6g/L,甲烷产率由253mL/gTS降至203mL/gTS;高温反应器中挥发性脂肪酸由0.4g/L增至26.1g/L,甲烷产率由181mL/gTS降至18mL/gTS。氨氮浓度对高温甲烷发酵系统的抑制作用更加明显。

关键词: 氨氮浓度; 进料浓度; 鸡粪; 甲烷发酵

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2019)07-2921-07

Effects of ammonium on methane fermentation of chicken manure under mesophilic and thermophilic conditions. QIAO Wei^{1,2}, BI Shao-jie¹, XIONG Lin-peng¹, JU Xin-xin³, DONG Ren-jie^{1,2*} (1.R&D Center for Efficient Production and Comprehensive Utilization of Biobased Gaseous Fuels, Energy Authority, National Development and Reform Committee, College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2.Institute of Yantai, China Agricultural University, Yantai 264670, China; 3.Shandong Zhongnong Sanyue Environmental Protection Technology Corporation Limited, Yantai 264670, China). *China Environmental Science*, 2019,39(7): 2921~2927

Abstract: In order to explore the effect of total ammonium nitrogen (TAN) on mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of chicken manure, the performances of anaerobic digestion of chicken manure under mesophilic and thermophilic conditions were compared through 265 days' experiment with the increased TAN when the feed total solid (TS) increased from 5% to 7.5% and 10%. During the operation, the specific methanogenic activity (SMA) test was carried out with sodium acetate. The TAN in the mesophilic and thermophilic reactors increased from 2.1~2.5 to 6.1~6.5g/L when TS increased from 5% to 10%. The SMAs of the mesophilic and thermophilic reactors reduced by 44% and 100%, respectively, resulting in a decrease in the ability of the fermentation system to produce methane by acetic acid. In the mesophilic reactor, the methane yield reduced from 253 to 203 mL/gTS, associated with the accumulation of volatile fatty acids (VFAs) from 0.4 to 7.6g/L. The methane yield decreased from 181 to 18mL/gTS when the VFA increased from 0.4 to 26.1g/L in the thermophilic reactor. The effect of TAN on reducing methane yield was more obvious under thermophilic condition.

Key words: ammonium nitrogen; total solid of feed; chicken manure; methane fermentation

目前,我国每年产生约38亿t畜禽粪污,其处理和综合利用率较低,既污染了环境又浪费了资源^[1]。鸡粪富含有机质,较为适合采用甲烷发酵的方法处理,产甲烷潜力达到296~377mL/gVS^[2]。但是,鸡粪中含有大量的氮元素,过高的氨氮(TAN)在甲烷发酵过程中会对微生物产生抑制作用,引起有机酸积累和产气量下降等一系列问题^[3]。通常,TAN超过1.5g/L就可能阻碍甲烷发酵的进行,超过3.0g/L会对中高温甲烷发酵产生明显抑制^[4]。研究发现,抑制猪粪中温甲烷发酵的TAN为2.5g/L^[5]。经过驯化后,鸡粪中温甲烷发酵在5.0g/L的TAN条件下才会受到抑制^[6]。

目前,大多数的沼气工程在中温(~37℃)条件下运行。但是,高温(~55℃)发酵在产气效率和灭杀病原菌方面更具优势^[7~8]。然而,与中温甲烷发酵相比,高温发酵对TAN、挥发性脂肪酸(VFAs)和其它毒害物质的变化更敏感^[9]。TAN达到1.7g/L就会抑制牛粪高温甲烷发酵^[10]。经过驯化后,鸡粪高温甲烷发酵能够在4.0g/L的TAN条件下稳定运行^[11]。尽管关于氨氮浓度对甲烷发酵影响的研究已经较多,但不同研究报

收稿日期: 2018-12-18

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(6182017)

* 责任作者, 教授, rjdong@cau.edu.cn

道的中高温甲烷发酵氨氮抑制浓度差异较大。甲烷发酵不仅受 TAN 影响,而且与总固体浓度(TS)和负荷等因素密切相关^[6]。此外,以往的研究多采用添加氯化铵增加氨氮浓度^[11-12],而采用提高鸡粪进料浓度的方式增加氨氮浓度,更加符合实际沼气工程运行状态,对工程实践更具有指导意义。目前,关于氨氮浓度对鸡粪中高温甲烷发酵影响的对比研究还鲜有报道。

为此,本文分别开展鸡粪中温和高温甲烷发酵的长期连续实验,通过提高进料浓度的方式增加氨氮浓度,解析在不同氨氮浓度下中高温甲烷发酵的性能。

1 材料和方法

1.1 试验材料及处理方法

鸡粪取自中国农业大学西校区蛋鸡养殖基地,取回后放置于 4℃ 冷藏室中保存。使用之前,用自来水分别将鸡粪稀释至总固体浓度(TS)约 5%、7.5%

和 10%。接种污泥分别为北京密云石匣村玉米秸秆高温(50~60℃)沼气工程和北京顺义北郎中猪粪中温(37℃)沼气工程的出料,取料时两座沼气工程均常年连续运行。鸡粪和接种污泥的性质见表 1。

表 1 鸡粪和接种污泥的性质

Table 1 Characteristics of chicken manure and inoculums

参数	鸡粪	中温接种污泥	高温接种污泥
TS(%)	43.3±0.4	4.9±0.1	8.4±0.5
VS(%)	28.4±0.3	2.5±0.2	5.3±0.4
pH 值	8.1±0	7.9±0.1	7.1±0.1
氨氮(g/kg)	5.4±0.3	1.0±0.3	1.5±0.3
C*(%)	33.1±0.2	/	/
H*(%)	4.3±0.1	/	/
O*(%)	26.6±0.1	/	/
N*(%)	4.9±0.1	/	/
C/N	6.7±0.2	/	/

注:TS:总固体;VS:挥发性固体;“/”表示未检测;*:元素质量分数以干物计。

1.2 长期连续发酵试验设计

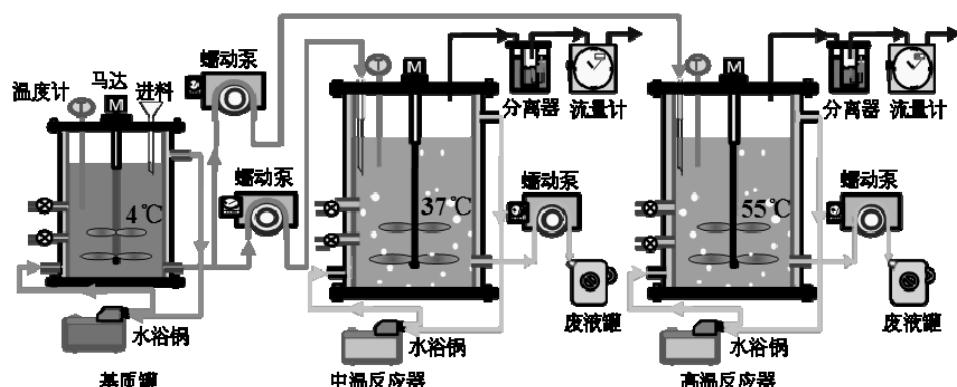


图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematic of experimental device

在中温(37℃)和高温(55℃)条件下,采用 2 个相同的全混式反应器(CSTR)进行鸡粪发酵试验,试验装置见图 1。反应器的容积为 15L,有效容积为 12L。反应器采用连续机械搅拌,转速设置为 100r/min;设有水浴夹层,采用水浴循环加热,分别维持反应器温度为 55 和 37℃。基质罐的容积为 8L,温度设置为 4℃。采用蠕动泵(BT100N,保定申辰)自动进出料,通过定时器(DJ-B14M,深圳定时宝)控制 4 次/d 进出料,每次进出料量为 0.15L。水力停留时间(HRT)设置为 20d,梯度提高进料 TS(5%、7.6% 和 10%)和有机负荷(OLR,2.5,3.75,5gTS/(L·d)),每个阶段的维持时间分

别为 93,87,85d。每天测定产气量、pH 值和沼气成分;每 4d 测定碱度、VFAs 和 TAN。

1.3 污泥比产甲烷活性测试

污泥的比产甲烷活性(SMA)是指污泥生成甲烷的能力,是表征污泥品质和产甲烷菌活性的重要指标之一^[13]。以乙酸钠为基质,采用批次试验进行污泥产甲烷活性测试。接种污泥取自反应器稳定运行阶段(第 75,160,240d)的新鲜出料,去除溶解性成分并恢复活性后使用^[3]。经测定,高温接种污泥的 VSS 分别为 10,24,52gVSS/L,中温接种污泥的 VSS 分别为 9,15,31gVSS/L。试验共 6 组,每组 3 个平行

试验。

取 120mL 玻璃发酵瓶,加入接种污泥 10mL,添加乙酸钠和营养液至 100mL,形成乙酸浓度为 4gCOD/L 的发酵液。添加 NH₄Cl 调节 TAN 与反应器运行阶段的一致,对应浓度分别为 2.5,5.5,6.5g/L。向发酵液上方充入氮气 2min,形成厌氧环境,密封。水浴(HH-60,常州国华)保持 37,55°C 恒温,每天手动震荡 3 次混合料液。发酵过程中测定产气量和沼气成分。

SMA 采用公式(1)进行计算^[14]:

$$SMA = \frac{1}{VSS \cdot V_R \cdot f} \cdot \frac{V(CH_4)}{t} \quad (1)$$

式中: $V(CH_4)$ 为累积产甲烷量,mL; V_R 为接种污泥添加量,L; f 为 COD 与甲烷产量的转化系数,350mL/gCOD;VSS 是接种污泥的悬浮挥发性固体质量浓度,代表微生物的含量,gVSS/L; t 为发酵时间,d。

1.4 分析方法

TS、VS 和 VSS 采用质量法测定,pH 值采用 Orion 5-Star pH 计测定。鸡粪中的碳、氢、氧和氮的元素质量百分含量采用 Vario Macro 型元素分析仪测定。沼气成分、碱度、VFAs 和 TAN 的测定参照文献[15]。

1.5 数据处理

利用 Excel 2010 进行数据处理和制图。

2 结果与讨论

2.1 鸡粪中高温甲烷发酵性能

鸡粪中高温甲烷发酵试验进行了 265d,不同进料 TS 和 OLR 条件下的产气率和甲烷含量的变化情况见图 2。发酵开始至第 93d,进料 TS 为 5%,OLR 为 2.5gTS/(L·d),中温反应器的甲烷产率为 253mL/gTS,比高温反应器的高 41%(180mL/TS)。中高温反应器的甲烷浓度相同,为 67%~68%。发酵第 94~180d,TS 为 7.5%,OLR 为 3.75gTS/(L·d)。与 TS5%阶段相比,中温反应器的甲烷产率为 243mL/gTS,甲烷产率变化不明显;高温反应器的甲烷产率显著下降,仅为 112mL/gTS。此阶段,高温反应器的甲烷产率比中温反应器低 54%。同时,高温的甲烷浓度(56%)也显著低于中温反应器(67%)。发酵第 181~265d,TS 为 10%,OLR 为 5gTS/(L·d)。中高温反应器的甲烷产率分别为 203 和 18mL/gTS,分别是 TS5%时的 80%和 10%,高温反应器的甲烷产率下降更加明显。此时高温反应器的甲烷浓度仅为 36%。

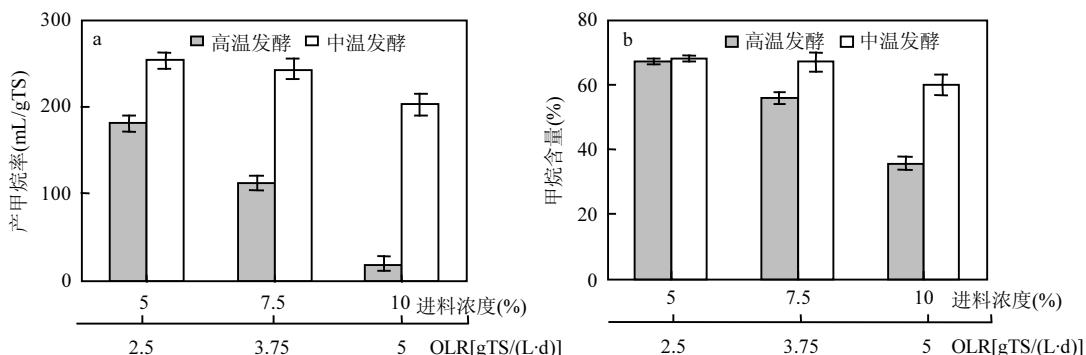


图 2 反应器在不同进料浓度和负荷下的甲烷产率和甲烷含量
Fig.2 Methane yield and methane content of the reactors with various TS and OLRS

表 2 显示,OLR 由 2.5gTS/(L·d)增至 3.75,5g/(L·d)的过程中,中高温反应器的 TAN 浓度基本相同,由 2.1~2.5g/L 增至 5.5,6.1~6.5g/L。高浓度的 TAN 为发酵系统提供了充足的碱度。OLR 为 2.5gTS/(L·d)时,中高温反应器的碳酸氢盐碱度相近,分别为 7.9,8.6gCaCO₃/L。OLR 为 3.75,5gTS/(L·d)时,由于高温反应器中 VFAs 大量累积,造成碳酸氢盐碱度(8.1,3.7gCaCO₃/L)低于中温反应器(15.6,20.5gCaCO₃/L),

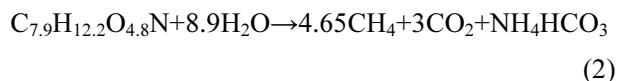
pH 值(8.1 和 6.9)低于中温反应器(8.5 和 8)。

随着进料 TS 的增加,中高温反应器的 TAN 和 VFAs 开始累积,导致甲烷产率迅速降低。在未经高 TAN 驯化的厌氧反应器中,2.0g/L 的 TAN 浓度就能完全抑制产甲烷菌的生长,而驯化后的产甲烷菌能够耐受超过 6.0g/L 的 TAN,但甲烷产量会降低^[12]。研究发现,4.0g/L 的 TAN 将导致鸡粪高温发酵产甲烷产量降低 17%^[11];TAN 达到 5.0g/L,鸡粪高温产甲烷

产量降低 80%^[16].与高温发酵相比,鸡粪中温发酵耐受 TAN 的能力较强,4.8g/L 的 TAN 才会抑制鸡粪中温发酵^[17].在稳定运行的反应器中,产酸率和嗜酸速率一致,VFAs 保持在较低的水平^[18].任南琪等^[19]研究发现,当厌氧发酵体系中乙酸浓度高于 2.3g/L,丙酸浓度高于 0.3g/L 或丁酸浓度高于 2g/L 时,产甲烷菌的活性将受到抑制.如果产酸速率增高或有机酸降解被抑制,VFAs 将大量积累,造成产甲烷菌的活性降低与 VFAs 累积的恶性循环.

根据表 1 中的元素组成,鸡粪可用化学式

$C_{7.9}H_{12.2}O_{4.8}N$ 表达.通过 Boswell 发酵方程可建立鸡粪甲烷发酵的化学计量^[20]:



因此,理论上鸡粪完全降解的甲烷产率是 360mL/gTS,甲烷浓度为 60%,同时产生 53mgTAN/gTS.进料 TS 为 5%、7.5% 和 10% 时,中温反应器的甲烷产率分别为理论值的 70%、68% 和 56%,均高于高温反应器的 50%、31% 和 5%.因此,中温反应器的产甲烷效果优于高温反应器.

表 2 鸡粪中高温甲烷发酵试验的运行情况

Table 2 Performance of chicken manure methane fermentation under mesophilic and thermophilic conditions

参数	中温发酵			高温发酵		
	1~93d	94~180d	181~265d	1~93d	94~180d	181~265d
TS(%)	5	7.5	10	5	7.5	10
OLR[gTS/(L·d)]	2.5	3.75	5	2.5	3.75	5
pH 值	8.2±0.1	8.5±0.1	8.0±0.2	8.3±0.2	8.1±0.2	6.9±0.1
容积甲烷产率[L/(L·d)]	0.63±0.02	0.91±0.04	1.02±0.07	0.45±0.02	0.43±0.03	0.09±0.03
甲烷产率(mL/gTS)	253±9	243±12	203±13	180±9	112±8	18±8
CH ₄ (%)	68±1	67±3	60±3	67±1	56±2	36±2
CO ₂ (%)	32±1	33±3	40±3	33±1	44±2	64±1
TS 去除率(%)	46±2	45±2	35±2	44±3	32±4	24±8
VS 去除率(%)	70±3	69±1	61±1	59±3	42±4	30±8
VFAs(g/L)	0.4±0.1	2.9±1	6.7±1.2	0.4±0.1	19.2±1.3	26.1±1.5
TAN(g/L)	2.1±0.4	5.5±0.4	6.5±0.3	2.5±0.3	5.5±0.3	6.1±0.2
碳酸氢盐碱度(g/L)	7.9±1.4	15.6±2.1	20.5±2.2	8.6±1.3	8.1±0.8	3.7±0.8

2.2 固体去除率

有机污染物的去除效果通常用 TS 和 VS 去除率表示.图 3 中,进料浓度为 5%,TAN 为 2.1~2.5g/L,中温反应器的 TS 和 VS 去除率分别为 46% 和 70%,高于高温反应器的 44% 和 59%,处于 Nizami 等^[21]报道的 CSTR 处理能源作物 40%~70% 的 VS 去除率范围内.随着 TS 升至 10%,TAN 增至 6.1~6.5g/L,中温反应器的 TS 和 VS 去除率(35% 和 61%)降低

了 22% 和 13%;高温反应器的 TS 和 VS 去除率(24% 和 30%)降低了 45% 和 50%,进料 TS 和 TAN 提高,高温反应器的固体去除率下降更明显.TAN 浓度随进料浓度的增加而提高,能够抑制甲烷发酵的水解,酸化和甲烷化进程,造成鸡粪中有机质的去除率降低^[11].与中温相比,高温条件下 TAN 抑制甲烷发酵的效果更明显,导致了高温发酵的固体去除率更低.

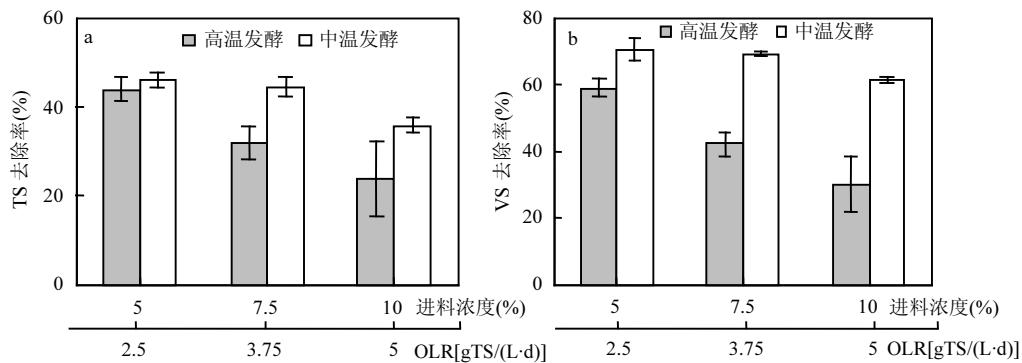


图 3 反应器在不同 OLR 下的 TS 和 VS 去除率

Fig.3 TS and VS removal efficiencies of the reactors under various TS and OLRS

2.3 氨氮对 VFAs 累积和产气率的影响

鸡粪中高温发酵过程中 TAN 与 VFAs 和甲烷产率间均具有较好的线性关系(图 4).图 4a 中,中温发酵的 k 值为 -12.16(甲烷产率/TAN), R^2 为 0.67;高温发酵的 k 值为 -34.49(甲烷产率/TAN), R^2 为 0.88,TAN 累积对鸡粪高温甲烷产率的降低效果更明显.图 4b 中,中温发酵的 k 值为 1.48(VFAs/TAN), R^2 为 0.89;高温发酵的 k 值为 5.55(VFAs/TAN), R^2 为 0.89,TAN 累积对鸡粪高温 VFAs 的累积效果更明显.

大量研究就 TAN 对甲烷发酵的影响进行了论证,但是不同原料不同温度下产生抑制的氨浓度不同.研究发现 1.7g/L 的 TAN 浓度就可能抑制甲烷发酵^[22].Andrew 等^[23]发现,TAN 达到 2.5g/L 时,牛粪中高温甲烷发酵受到抑制.目前普遍认为 TAN 抑制中高温甲烷发酵的下限浓度均为 3.0~4.0g/L^[11].本研究

发现,进料浓度为 5%时,中高温反应器的 TAN 浓度均低于 3.0g/L,VFAs 浓度在 1.0g/L 以内,甲烷产率波动不明显.随着 TAN 浓度的升高,中高温反应器内出现 VFAs 累积和产气率降低.中温反应器的 TAN 浓度提升至 5.5g/L 左右,VFAs 浓度在 2.0~6.0g/L 范围波动,甲烷产率虽略有下降,但不显著;TAN 浓度进一步提升至 6.5g/L 左右,VFAs 浓度在 6.7g/L 波动,甲烷产率下降明显,为 203mL/gTS,比 TAN 浓度 2.5g/L 时下降 20%,产气效果受到明显抑制.TAN 对高温反应器的抑制更明显,TAN 浓度在 5.5g/L 左右,VFAs 浓度约 19.2g/L,产气率出现明显降低.TAN 浓度提升至 6.1g/L 左右,VFAs 累积至 26.1g/L,甲烷产率比 TAN 浓度 2.5g/L 时下降约 90%,仅为 18mL/gTS.因此,本研究中鸡粪中高温甲烷发酵氨抑制的 TAN 阈值分别为~5.5g/L 和~2.5g/L,中温发酵耐受 TAN 的能力远高于高温发酵.

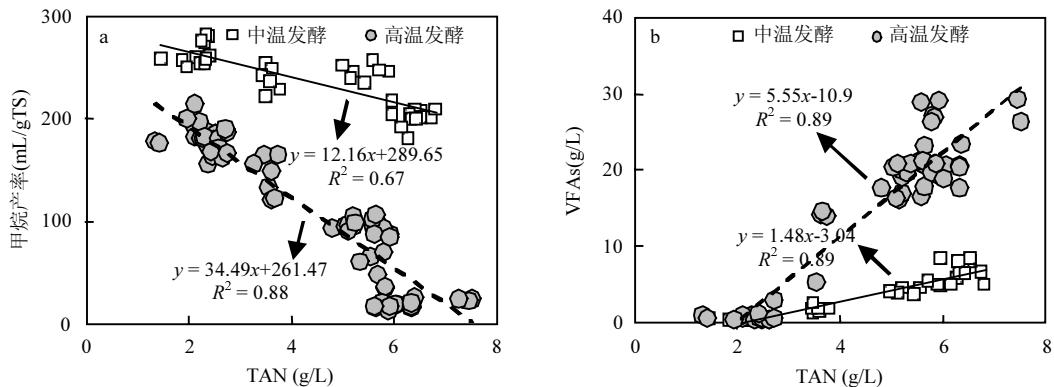


图 4 氨氮累积对 VFAs 累积和 TS 甲烷产率的影响
Fig.4 Effect of TAN on VFAs accumulation and methane yield

2.4 污泥比产甲烷活性分析

图 5 中,进料 TS 为 5%,TAN 为 2.5g/L 时,中高温反应器的 SMA 分别为 204 和 151mLCH₄/(gVSS·d).随着 TAN 浓度升高至 5.5 和 6.5g/L,中温反应器的 SMA 分别下降了 27% 和 44%,分别为 176 和 134mLCH₄/(gVSS·d);高温反应器的 SMA 分别下降了 67% 和 100%,分别为 51 和 0mLCH₄/(gVSS·d).TAN 浓度的提高导致 SMA 的降低.在 4.0g/L 的 TAN 浓度下,鸡粪和猪粪中温混合发酵的 SMA 为 0.08gCOD/(gVSS·d)(约 28mLCH₄/(gVSS·d))^[24];在 6.3g/L 的 TAN 浓度下,鸡粪中温发酵的 SMA 仅为 0.03gCOD/(gVSS·d)(约 11mLCH₄/(gVSS·d))^[25].TAN

累积明显降低了中高温甲烷发酵的 SMA,是导致中高温甲烷发酵产气量下降的主要原因.同时,TAN 对高温甲烷发酵的抑制效果更加明显^[26].本文各进料浓度阶段,中温反应器的比产甲烷活性(240,176,134mLCH₄/(gVSS·d))均高于高温反应器的比产甲烷活性(151,51,0mLCH₄/(gVSS·d)).与 Yin 等^[27]报道的结果一致,在 2.1g/L 的 TAN 条件下,中温反应器的比产甲烷活性(196mLCH₄/(gVSS·d))明显高于高温反应器(161mLCH₄/(gVSS·d)).因此,随着进料 TS 的增加,在相同的 TAN(2.5~6.5g/L)条件下,中温甲烷发酵利用乙酸产甲烷的能力均高于高温发酵,这也是鸡粪中温甲烷发酵产气率高于高温发酵的主

要原因。

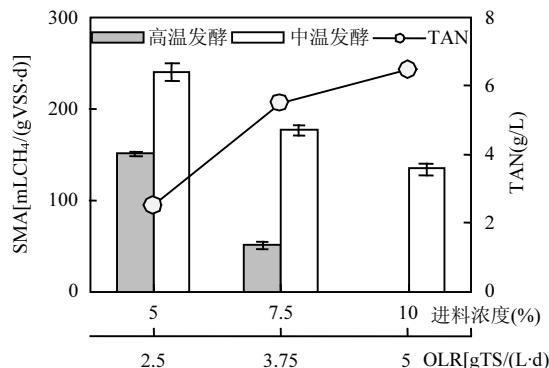


图5 不同进料浓度,OLR 和 TAN 对 SMA 的影响
Fig.5 The effect of feed TS, OLRs and TAN on SMA

3 结论

3.1 高温发酵对 TAN 的增加更为敏感,当 TAN 达到 5.5g/L 时,VFAs 开始出现明显积累,到 6.5g/L 时产气率仅为 18mL/gTS.相比之下,中温发酵的 TAN 耐受性较高,当氨氮浓度达到 6.1g/L 时,甲烷产率仍可以达到 203mL/gTS.

3.2 TAN 累积导致鸡粪中高温发酵体系利用乙酸产甲烷的能力降低.在 4gCOD/L 乙酸浓度下,TAN 浓度达到 5.5g/L,中高温反应器的 SMA 分别降低 27% 和 67%;TAN 浓度达到 6.5g/L,中高温反应器的 SMA 分别降低 44% 和 100%.因此,高温反应器受到 TAN 的抑制效果更明显.

3.3 在各进料 TS 和 TAN 阶段,中温反应器的 SMA 均高于高温反应器,中温甲烷发酵利用乙酸产甲烷的能力更强,鸡粪中温甲烷发酵产气率更高.

参考文献:

- [1] 乔 玮,毕少杰,齐向阳,等.微量元素制剂提高厌氧产甲烷活性的研究 [J]. 中国沼气, 2018,36(3):9–15.
Qiao W, Bi S J, Qi X Y, et al. Improvement of methanogenic activities by trace element agent addition [J]. China Biogas, 2018,36(3):9–15.
- [2] Li K, Liu R H, Sun C, et al. Comparison of anaerobic digestion characteristics and kinetics of four livestock manures with different substrate concentrations [J]. Bioresource Technology, 2015,198:133–140.
- [3] 乔 玮,毕少杰,尹冬敏,等.鸡粪中高温厌氧甲烷发酵产气潜能与动力学特性 [J]. 中国环境科学, 2018,38(1):234–243.
Qiao W, Bi S J, Yin D M, et al. Biogas production potential and kinetics of chicken manure methane fermentation under mesophilic and thermophilic conditions [J]. China Environmental Science, 2018,38(1):234–243.
- [4] 乔 玮,毕少杰,熊林鹏,等.进料浓度对鸡粪长期高温甲烷发酵的影响 [J]. 中国环境科学, 2018,38(7):2593–2601.
Qiao W, Bi S J, Xiong L P, et al. Effect of feed concentration on long-term thermophilic methane fermentation of chicken manure [J]. China Environmental Science, 2018,38(7):2593–2601.
- [5] Andrew G H. Ammonia inhibition of methanogenesis from cattle wastes [J]. Agricultural Wastes, 1986,7(4):41–261.
- [6] Niu Q G, Qiao W, Qiang H, et al. Mesophilic methane fermentation of chicken manure at a wide range of ammonia concentration: Stability, inhibition and recovery [J]. Bioresource Technology, 2013,137: 358–367.
- [7] Li L, Qin Y, Kong Z, et al. Characterization of microbial community and main functional groups of prokaryotes in thermophilic anaerobic co-digestion of food waste and paper waste [J]. The Science of the total environment, 2018,652:709–717.
- [8] Wagner A O, Gstraunthaler G, Illmer P. Survival of bacterial pathogens during the thermophilic anaerobic digestion of biowaste: Laboratory experiments and in situ validation [J]. Anaerobe, 2008,14:181–183.
- [9] Vrieze J D, Smet D, Klok J, et al. Thermophilic sludge digestion improves energy balance and nutrient recovery potential in full-scale municipal wastewater treatment plants [J]. Bioresource Technology, 2016,218:1237–1245.
- [10] Zeeman G, Wiegan W M, Koster-Treffers M E, et al. The Influence of the total ammonia concentration on the thermophilic digestion of cow manure [J]. Agricultural Wastes, 1985,4(1):19–35.
- [11] Niu Q G, Hojo T, Qiao W, et al. Characterization of methanogenesis, acidogenesis and hydrolysis in thermophilic methane fermentation of chicken manure [J]. Chemical Engineering Journal, 2014,244:587–596.
- [12] Angelidaki I, Ahring B K. Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1993,38:560–564.
- [13] 马溪平.厌氧微生物学与污水处理 [M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
MA X P. Anaerobic microbiology and sewage treatment [M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2005.
- [14] Wandera S M, Qiao W, Algapani D E, et al. Searching for possibilities to improve the performance of full scale agricultural biogas plants [J]. Renewable Energy, 2018,116:720–727.
- [15] Algapani D E, Wang J, Qiao W, et al. Improving methane production and anaerobic digestion stability of food waste by extracting lipids and mixing it with sewage sludge [J]. Bioresource Technology, 2017, 244:996–1005.
- [16] Borja R, Sánchez E, Weiland P. Influence of ammonia concentration on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors Process [J]. Biochemistry, 1996,31(5):477–483.
- [17] Niu Q G, Qiao W, Qiang H, et al. Mesophilic methane fermentation of chicken manure at a wide range of ammonia concentration: stability, inhibition and recovery [J]. Bioresource Technology, 2013,137: 358–367.
- [18] Li D, Liu S C, Mi L, et al. Effects of feedstock ratio and organic

- loading rate on the anaerobic mesophilic co-digestion of rice straw and cow manure [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 189:319–326.
- [19] 任南琪,王爱杰.厌氧生物技术原理与应用 [M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- Ren N Q, Wang A J. Principle and application of anaerobic biotechnology [M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2004.
- [20] Buswell A M, ollo F W. Mechanism of the methane fermentation [J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1952, 44(3):550–552.
- [21] Nizami A S, Murphy J D. What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage? [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14:1558–1568.
- [22] Zeeman G, Wiegant W M, Koster-Treffers M E, et al. The influence of the total ammonia concentration on the thermophilic digestion of cow manure [J]. *Agricultural Wastes*, 1985, 14(1):19–35.
- [23] Andrew G H. Ammonia inhibition of methanogenesis from cattle wastes [J]. *Agricultural Wastes*, 1986, 17(4):241–261.
- [24] Hussain A, Dubey S K. Specific methanogenic activity test for anaerobic treatment of phenolic wastewater [J]. *Desalination & Water Treatment*, 2014, 52:7015–7025.
- [25] He M, Sun Y, Zou D, et al. Influence of temperature on hydrolysis acidification of food waste [J]. *Procedia Materials Science*, 2012, 16: 85–94.
- [26] Bi S, Qiao W, Xiong L, et al. Effects of organic loading rate on anaerobic digestion of chicken manure under mesophilic and thermophilic conditions [J]. *Renewable Energy*, 2019, 139:242–250.
- [27] Yin D M, Westerholm M, Qiao W, et al. An explanation of the methanogenic pathway for methane production in anaerobic digestion of nitrogen-rich materials under mesophilic and thermophilic conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 264(5):42–50.

作者简介: 乔 玮(1979–),男,内蒙古赤峰人,副教授,博士,主要从事废弃物和废水的厌氧生物处理方面研究,发表论文 40 余篇。