

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.020

# 稻草与牛粪混合连续厌氧消化制备生物燃气研究\*

李东<sup>1</sup> 叶景清<sup>2</sup> 孙永明<sup>1</sup> 甄峰<sup>1</sup> 袁振宏<sup>2</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广州 510640)

**摘要:** 以挥发性固体比 1:1 的稻草与牛粪为混合原料, 采用 40 L 有机玻璃反应器进行连续厌氧消化, 考察不同有机负荷率 (OLR) 3 ~ 12 kg/(m<sup>3</sup>·d) 及温度对厌氧消化性能及稳定性的影响。结果表明, 高温消化在整个 OLR 范围内, 池容产气率逐渐增加, 最高达到 5.26 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d), 平均挥发性固体产气率在 OLR 为 3.6 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时达到最大值 489.6 L/kg; 中温消化在 OLR 为 12 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时出现严重的 VFAs 抑制, 在无挥发性脂肪酸抑制的 OLR 范围 (3 ~ 8 kg/(m<sup>3</sup>·d)) 内, 池容产气率逐渐增加, 最高达到 2.57 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d), 平均挥发性固体产气率在 OLR 为 3.6 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时达到最大值 440.0 L/kg; 当 OLR 升高到 8 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时, 中温和高温发酵系统均出现了严重的污泥膨胀。

**关键词:** 稻草 牛粪 混合厌氧消化 生物燃气

**中图分类号:** X705; TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0101-05

## Continuous Anaerobic Co-digestion of Rice Straw and Cow Manure for Biogas Production

Li Dong<sup>1</sup> Ye Jingqing<sup>2</sup> Sun Yongming<sup>1</sup> Zhen Feng<sup>1</sup> Yuan Zhenhong<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

2. Key Laboratory of Renewable Energy and Natural Gas Hydrate, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Using rice straw and cow manure (volatile solid ration 1:1) as materials, continuous anaerobic co-digestions were carried out to investigate the effects of organic loading rate (OLR) and temperature on stability and performance. The experimental results showed that, for thermophilic digestion, volumetric biogas production rate (VBPR) increased with increasing of OLR and the maximum VBPR was 5.26 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d). The maximum average specific biogas production (SBP) of 489.6 L/kg was obtained at OLR of 3.6 kg/(m<sup>3</sup>·d). For mesophilic digestion, biogas production was seriously inhibited by volatile fatty acids (VFAs) at OLR of 12 kg/(m<sup>3</sup>·d). During the OLR of 3 ~ 8 kg/(m<sup>3</sup>·d), VBPR gradually increased with the maximum of 2.57 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d). The maximum average SBP of 440.0 L/kg was obtained at OLR of 3.6 kg/(m<sup>3</sup>·d). When the OLR increased to 8 kg/(m<sup>3</sup>·d), serious sludge expanding was observed both in thermophilic and mesophilic system.

**Key words:** Rice straw Cow manure Anaerobic co-digestion Biogas

### 引言

农作物秸秆和禽畜粪便是我国主要的两大类生物质资源。2009 年我国农作物秸秆理论总量为 8.20 亿 t, 其中稻草约为 2.05 亿 t<sup>[1]</sup>。目前, 畜禽养殖废弃物已被广泛用于厌氧消化制备生物燃气, 而

秸秆厌氧消化技术还不成熟。目前对秸秆厌氧消化的研究主要集中在原料预处理<sup>[2-4]</sup>、反应器及发酵工艺改进<sup>[5-8]</sup>、营养调控<sup>[9-11]</sup>。对于营养调控, 除了添加尿素和碳酸氢氨等化学试剂外, 还可以利用多元原料混合进行调控。

目前关于稻草和牛粪混合厌氧消化的研究主要

收稿日期: 2012-07-23 修回日期: 2012-08-31

\*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD15B02)

作者简介: 李东, 助理研究员, 博士, 主要从事有机废弃物制备生物燃气及生物燃气高值利用研究, E-mail: lidong@ms.giec.ac.cn

通讯作者: 孙永明, 副研究员, 博士, 主要从事生物质能研究, E-mail: sunym@ms.giec.ac.cn

集中在批式试验<sup>[12]</sup>。然而,随着我国秸秆沼气工程规模化发展及装备现代化,新建沼气工程主要为连续运行。本实验室首先进行了不同配比的批式研究,结果表明当稻草与牛粪的挥发性固体(VS)比为1:1时能获得较高的挥发性固体产气率。本研究在此基础上进行连续式混合厌氧消化,考察不同有机负荷率(OLR)下中温和高温混合消化的挥发性固体产气率、池容产气率、挥发性脂肪酸(VFAs)质量浓度、氨氮质量浓度、碱度、pH值等运行参数的变化规律,为工程应用的工艺设计和过程控制提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

稻草取自广州市花都区某农村,风干后用粉碎机粉碎并经干燥箱进一步干燥后待用。新鲜牛粪取

自佛山市三水区某奶牛场,经手工剔除杂物后置于4℃冰柜待用。由于试验用量较大,牛粪分两次取回,对每次取回的原料均测定其TS、VS等特性,以减少试验误差。第1批牛粪用于有机负荷率为3~4.8 kg/(m<sup>3</sup>·d)的发酵试验,第2批牛粪用于有机负荷率为6~12 kg/(m<sup>3</sup>·d)时的发酵试验。接种污泥取自惠州博罗某养猪场正常运行的沼气发酵罐内,取回后用牛粪驯化2周,然后用1 mm的筛网进行过滤,取滤液作接种物。原料和接种物的特性如表1所示。

### 1.2 试验设计

设置2组连续厌氧消化试验,分别在高温((55±1)℃)和中温((35±1)℃)条件下运行。设置7种进料有机负荷率,但始终保持稻草与牛粪的VS比为1:1,每天的进料量见表2,水力停留时间为18.75 d。

表1 原料和接种物的特性

Tab.1 Characteristics of materials and inoculum

原料	TS 质量分数/%	VS 质量分数/%	C 质量分数/%	H 质量分数/%	N 质量分数/%	S 质量分数/%	碳氮比
稻草	95.12	83.67	38.19	5.08	0.80	0.72	47.74
第1批牛粪	12.54	10.11	36.81	4.70	2.30	0.36	16.00
第2批牛粪	15.63	13.24	41.80	6.11	2.75	0.35	15.20

表2 连续混合厌氧消化试验设计

Tab.2 Experimental design of anaerobic digestion

温度/℃	OLR/ kg·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup>	每天进料量/g		
		稻草	牛粪	水
35、55	3	54	446	1 100
	3.6	65	535	1 000
	4.2	76	624	900
	4.8	87	713	800
	6	108	732	760
	8	146	909	545
	12	216	1 364	20

### 1.3 试验装置与操作条件

消化装置采用本实验室设计加工的40 L有机玻璃厌氧反应器,物料装填率约75%,该反应器装有自动控温系统、自动机械搅拌系统和pH值实时监测仪。每天搅拌6次,每次30 min,转速约60 r/min。在出料前30 min开启搅拌器,待搅拌均匀后出料,出料量与进料量相同,为1 600 g;然后停止搅拌,进行加料;加料后再次搅拌30 min。每天在相同的时刻进行进出料和样品采集。每天监测的参数包括产气量和料液pH值;不定期监测的参数包括气体成分、出料的氨氮质量浓度、VFAs质量浓度和碱度。

### 1.4 分析方法

TS、VS含量采用常规方法测定<sup>[13]</sup>;C、H、N和S

含量采用Vario EL元素分析仪测定。产气量采用LML-1型湿式气体流量计测定。气体成分由HP-6890型气相色谱测定,TCD检测器,载气为Ar,进样口和检测器温度分别为100℃和150℃。柱箱初始温度40℃,保持2 min,然后以10℃/min的升温速率升到80℃并保持1 min。对于发酵液的成分,采样离心(12 000 r/min, 25℃, 10 min),取上清液用FC-100型台式氨氮仪测定氨氮质量浓度。取1 mL上清液,加1滴6 mol/L HCl酸化,离心(12 000 r/min, 4℃, 2 min),用0.45 μm滤膜过滤后,采用HP-6820型气相色谱测定VFAs(包括乙酸、丙酸、丁酸、异丁酸、戊酸和异戊酸)质量浓度。色谱柱为DB-FFAP毛细管柱(长度30.0 m,直径250.00 μm,膜厚0.25 μm),FID检测器;进样口温度250℃,检测器温度300℃;载气为N<sub>2</sub>;分流比为1:30;程序升温的起始温度为110℃,保持1 min,以10℃/min速率升温至250℃,保持5 min。

## 2 结果和讨论

### 2.1 挥发性固体产气率和池容产气率

挥发性固体产气率和池容产气率是评估厌氧消化效率的重要指标,前者反映了原料被微生物降解并转化为沼气的的能力,后者反映了反应器及工艺参

数的优劣。图 1 为稻草和牛粪连续混合厌氧消化的挥发性固体产气率和池容产气率。

中温厌氧消化,在 OLR 3 ~ 6 kg/(m<sup>3</sup>·d) 范围内正常产气,挥发性固体产气率稳定在 360 ~ 514 L/kg; OLR 为 3.0、3.6、4.2、4.8、6.0 kg/(m<sup>3</sup>·d) 的平均挥发性固体产气率分别为 438.5、440.0、438.0、413.9、383.52 L/kg, CH<sub>4</sub> 平均体积分数分别为 51.1%、59.8%、53.3%、55.7%、52.6%。池容产气率随 OLR 的增加而升高,5 种 OLR 的平均池容产气率分别为 1.32、1.58、1.84、1.99、2.30 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)。OLR 增加到 8 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时,挥发性固体产气率和池容产气率逐渐下降,于第 60 天发生严重的污泥膨胀,导气管路堵塞,随即进行清理,并停止进料,于第 61 天恢复进料,此后逐渐恢复产气。当 OLR 增加到 12 kg/(m<sup>3</sup>·d),由于严重的挥发性脂肪酸抑制(图 2),挥发性固体产气率和池容产气率逐渐下降并趋近于零,气体主要成分为 CO<sub>2</sub>。

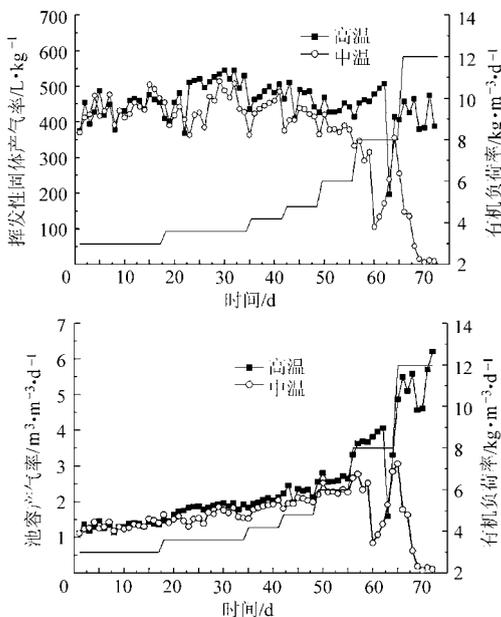


图 1 挥发性固体产气率和池容产气率曲线  
Fig.1 Specific biogas production and volumetric biogas production rate

高温厌氧消化,在 OLR 为 3 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时,挥发性固体产气率和池容产气率与中温消化相当。随着 OLR 的增加,高温系统的挥发性固体产气率和池容产气率显示出优势。在 OLR 3 ~ 6 kg/(m<sup>3</sup>·d) 范围内,挥发性固体产气率稳定在 368 ~ 545 L/kg; OLR 为 3.0、3.6、4.2、4.8、6.0 kg/(m<sup>3</sup>·d) 的平均挥发性固体产气率分别为 439.1、489.6、477.8、469.6、439.4 L/kg, CH<sub>4</sub> 平均体积分数分别为 49.9%、52.8%、51.42%、51.9%、50.0%。池容产气率随 OLR 的增加而升高,5 种 OLR 的平均池容产气率分别为 1.32、1.76、2.01、2.25、2.64 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)。OLR

增加到 8 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时,挥发性固体产气率和池容产气率经过小幅上升后,于第 63 天发生严重的污泥膨胀,导气管路堵塞,随即进行清理,并停止进料,于第 64 天恢复进料,此后恢复正常产气。当 OLR 增加到 12 kg/(m<sup>3</sup>·d),产气仍正常进行。除去第 63 天的产气量,OLR 为 8 和 12 kg/(m<sup>3</sup>·d) 的平均挥发性固体产气率分别为 460.3 和 422.4 L/kg; CH<sub>4</sub> 平均体积分数分别为 49.6% 和 50.6%; 平均池容产气率分别 3.68 和 5.26 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)。

从稻草和牛粪混合厌氧消化的产气情况来看,OLR 为 3.6 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时能够获得较高的挥发性固体产气率,且高温比中温较有优势,但由于高温条件 CO<sub>2</sub> 溶解度降低,导致气体中甲烷体积分数相对较低;高温厌氧消化能够耐受较高的 OLR,在解决污泥膨胀的基础上能够获得较高的池容产气率。

## 2.2 厌氧发酵中间代谢物

厌氧产甲烷的主要中间代谢物为 VFAs 和氨。VFAs 主要由乙酸、丙酸、丁酸和戊酸组成,是有机质水解酸化的主要产物,其中丙酸、丁酸和戊酸在产乙酸菌的作用下可降解为乙酸,而乙酸是产甲烷菌的利用底物。稳定运行的厌氧消化系统,水解产酸形成的 VFAs 能够被产甲烷菌及时利用,VFAs 质量浓度稳定在较低水平,不会出现因积累而逐渐升高的趋势。厌氧消化过程中的 VFAs 质量浓度变化见图 2。高温系统的 VFAs 质量浓度稳定在 120 mg/L 以下,当 OLR 增加到 12 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时,检测到少量丙酸。中温厌氧消化,OLR 为 3.0 ~ 4.8 kg/(m<sup>3</sup>·d)

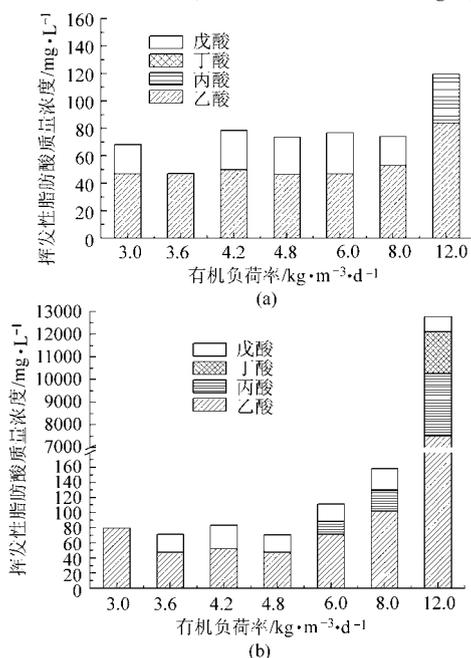


图 2 厌氧消化过程中的挥发性脂肪酸浓度变化  
Fig.2 VFAs profiles of anaerobic digestion  
(a) 高温 (b) 中温

时,VFAs质量浓度稳定在90 mg/L以下,主要由乙酸和戊酸组成;当OLR继续增加,VFAs质量浓度逐渐升高,且出现丙酸;当OLR增加到12 kg/(m<sup>3</sup>·d)时,VFAs质量浓度最高达12 785 mg/L,其中丙酸质量浓度高达2 761 mg/L。在各种VFAs中,丙酸被氧化为乙酸的速度最慢,毒性最强,产甲烷菌对丙酸的耐受质量浓度通常在1 000 mg/L以下<sup>[14]</sup>。

氨氮来源于蛋白质、氨基酸和尿素的水解,低质量浓度的氨氮可以为微生物生长提供氮源,且有利于维持稳定的pH值,但是高质量浓度的氨氮会抑制产甲烷。氨氮质量浓度的变化整体呈先降后升的趋势,见图3。在消化前期,随着微生物的大量生长繁殖消耗氨作为氮源,氨氮质量浓度缓慢下降;在消化后期,微生物的生长繁殖趋于稳定,对氮源需求减少,而此时进料和水解仍在进行,因此氨氮质量浓度逐渐升高。据文献<sup>[13]</sup>报道,经过驯化后的产甲烷微生物,对氨氮的耐受质量浓度高达4 500 mg/L,在本试验中,氨氮质量浓度最高仅为1 400 mg/L,不存在氨抑制。

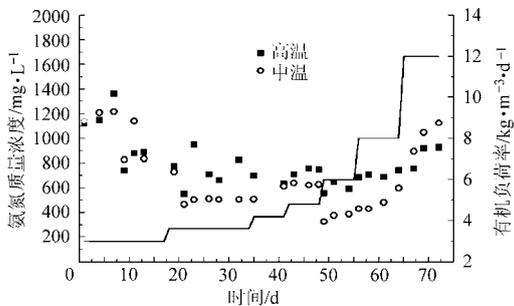


图3 厌氧消化过程中的氨氮质量浓度变化曲线

Fig.3 Ammonia nitrogen profiles of anaerobic digestion

### 2.3 厌氧消化稳定性

通常,pH值被用于初步诊断厌氧消化系统的稳定性,一般来讲,正常运行的厌氧消化系统,其pH值在6.8~8.0之间。不同温度和OLR条件下的pH值见图4。中温系统的pH值低于高温的pH值,可能是因为中温条件下CO<sub>2</sub>的溶解度相对较高,从而降低了系统的pH值。高温系统的pH值始终稳定在7.2~7.7。中温系统的pH值在OLR为3~8 kg/(m<sup>3</sup>·d)范围内稳定在7.0~7.3;当OLR升高

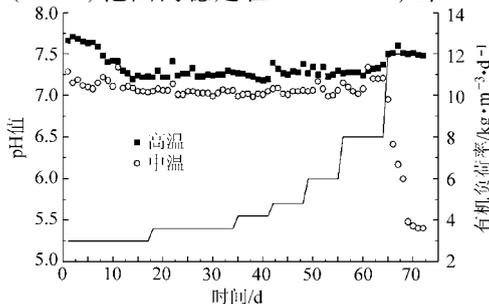


图4 厌氧消化过程中pH值的变化曲线

Fig.4 pH value profiles of anaerobic digestion

到12 kg/(m<sup>3</sup>·d),由于VFAs的逐渐积累,pH值逐渐下降直至5.4。

厌氧消化液的pH值由反应器的缓冲体系所控制,碱度常用于评价缓冲体系的缓冲能力。厌氧消化体系中的碱度[ALK] = [HS<sup>-</sup>] + [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] + 2[CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>] + [NH<sub>3</sub>] + [VFAs<sup>-</sup>]。通常,硫化物浓度较低,恒定温度下的CO<sub>2</sub>溶解度较为稳定,因此碱度主要由CO<sub>2</sub>分压、VFAs质量浓度、氨质量浓度决定。碱度的变化规律见图5,对于高温厌氧消化,VFAs质量浓度和气相中CO<sub>2</sub>体积分数相对稳定,碱度主要由氨质量浓度决定。

判断厌氧消化稳定性的一个重要指标为挥发性脂肪酸质量浓度与碱度比值,当该值小于0.4时,厌氧消化系统比较稳定;当该值介于0.4~0.8时,可能不稳定;当该值大于0.8时,将严重不稳定<sup>[15]</sup>。在本研究中,高温系统的挥发性脂肪酸质量浓度与碱度比值始终保持在0.03以下,处于稳定水平;对于中温系统,当OLR在3~8 kg/(m<sup>3</sup>·d)范围内,挥发性脂肪酸质量浓度与碱度比值保持在0.04以下,当OLR升高到12 kg/(m<sup>3</sup>·d)时,该值升高到2.77,厌氧消化系统处于严重不稳定状态,产气开始下降直至停止(图1)。

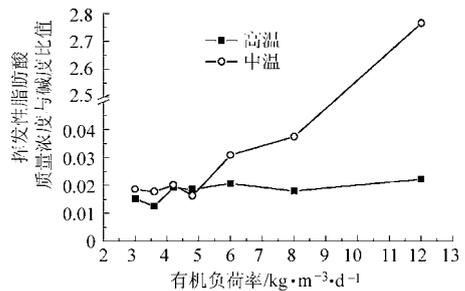
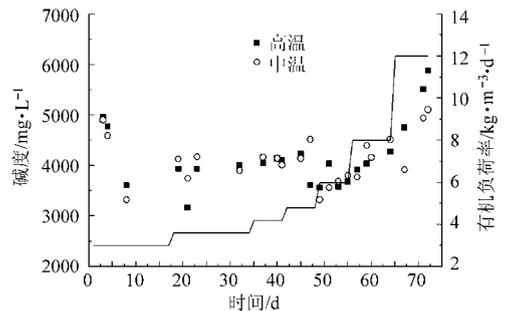


图5 厌氧消化过程中碱度及挥发性脂肪酸质量浓度与碱度比值的变化曲线

Fig.5 Alkalinity and VFAs/ALK profiles of anaerobic digestion

污泥膨胀是影响厌氧消化器稳定运行的另一个重要因素。污泥膨胀会导致出气管道堵塞,严重时会造成安全事故,因此采用有机玻璃反应器便于观察污泥膨胀现象。中温系统在OLR为8 kg/(m<sup>3</sup>·d)的中期时出现了严重的污泥膨胀;虽然高温条件有利于气体从污泥中逸出,但高温系统在OLR为

8 kg/(m<sup>3</sup>·d) 的后期也观察到严重的污泥膨胀。本试验设计的物料装填率为 75%, 但由于污泥膨胀较为严重, 导气管路出现堵塞, 严重影响了厌氧消化的正常进行。然而, 与厌氧消化中间代谢物的生物学内源抑制(例如中温 OLR 为 12 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时出现的 VFAs 抑制)不同, 高有机负荷率条件下出现的污泥膨胀可通过优化反应器设计和强化搅拌来解决。

## 2.4 厌氧消化产气模型构建

对以稻草和牛粪 VS 比 1:1 为原料进行的稳定厌氧消化, 构建池容产气率与 OLR 的关系模型, 如图 6 所示, 呈显著的线性关系, 高温条件下的斜率略大于中温条件下的斜率。

## 3 结论

(1) 稻草与牛粪混合高温厌氧消化在整个 OLR 范围(3 ~ 12 kg/(m<sup>3</sup>·d)) 内, 没有出现挥发性脂肪酸或氨氮抑制; OLR 为 3.6 kg/(m<sup>3</sup>·d) 能够获得最高的平均挥发性固体产气率(489.6 L/kg); 池容产气率随 OLR 的增加而增加, 最高达 5.26 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)。

(2) 中温厌氧消化在 OLR 为 12 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时, 出现严重的挥发性脂肪酸抑制; 在无挥发性脂肪酸抑制的 OLR 范围(3 ~ 8 kg/(m<sup>3</sup>·d)) 内, OLR 为 3.6 kg/(m<sup>3</sup>·d) 能够获得最高的平均挥发性固体产气率 440 L/kg; 池容产气率随 OLR 的增加而增加, 最高达 2.57 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)。

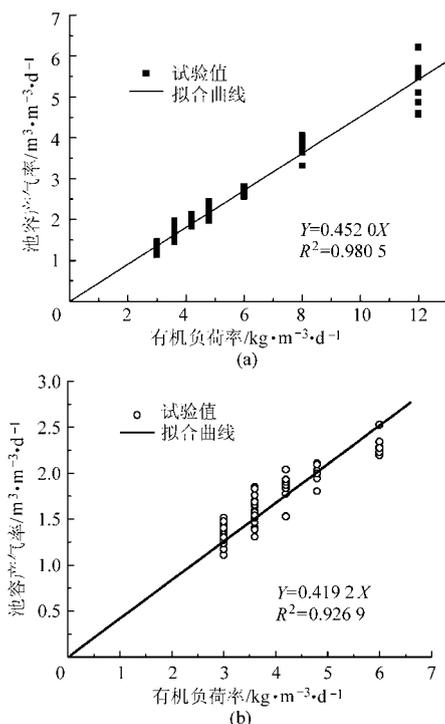


图 6 稳定运行条件下池容产气率与 OLR 的关系  
Fig. 6 Relationship between volumetric biogas production rate and organic loading rate  
(a) 高温 (b) 中温

(3) 当 OLR 升高到 8 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时, 发酵系统容易出现严重的污泥膨胀。今后将通过优化反应器设计和强化搅拌来避免高有机负荷率条件下的污泥膨胀。

## 参 考 文 献

- 田宜水, 赵立欣, 孙丽英, 等. 农作物秸秆资源调查与评价方法研究[J]. 中国人口资源与环境, 2011, 21(3): 583 ~ 586. Tian Yishui, Zhao Lixin, Sun Liying, et al. Study on crop straw survey and evaluation method [J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(3): 583 ~ 586. (in Chinese)
- Hendriks A, Zeeman G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(1): 10 ~ 18.
- Lissens G, Thomsen A B, de Baere L, et al. Thermal wet oxidation improves anaerobic biodegradability of raw and digested biowaste [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(12): 3 418 ~ 3 424.
- Ruiz E, Cara C, Manzanares P, et al. Evaluation of steam explosion pre-treatment for enzymatic hydrolysis of sunflower stalks [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2008, 42(2): 160 ~ 166.
- Zhang R, Zhang Z. Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system [J]. Bioresource Technology, 1999, 68(3): 235 ~ 245.
- 何若平, 王兴华, 张宏, 等. 一种新型卧式高渣物料厌氧消化器的设计与应用[J]. 中国沼气, 2010, 28(5): 15 ~ 17, 23. He Ruoping, Wang Xinghua, Zhang Hong, et al. Design and application of a new horizontal high-solid-contained anaerobic reactor [J]. China Biogas, 2010, 28(5): 15 ~ 17, 23. (in Chinese)
- 韩捷, 向欣, 李想. 干法发酵沼气工程无热源中温运行及效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 215 ~ 219. Han Jie, Xiang Xin, Li Xiang. Mesophilic running of dry fermentation biogas system without heating device and its effects [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(9): 215 ~ 219. (in Chinese)
- 陈玲, 赵立欣, 董保成, 等. 我国秸秆沼气工程发展现状与趋势[J]. 可再生能源, 2010, 28(3): 145 ~ 148. Chen Ling, Zhao Lixin, Dong Baocheng, et al. The status and trends of the development of biogas plants for crop straws in China [J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(3): 145 ~ 148. (in Chinese)
- Weiland P. Biogas production: current state and perspectives [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 85(4): 849 ~ 860.

## 参 考 文 献

- 1 付素蓉,王焰新,蔡鹤生,等.城市地下水污染敏感性分析[J].地球科学—中国地质大学学报,2000,25(5):482~486.  
Fu Surong, Wang Yanxin, Cai Hesheng, et al. Vulnerability to contamination of groundwater in urban begions [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(5): 482~486. (in Chinese)
- 2 武强,王志强,赵增敏,等.油气田区承压含水层地下水污染机理及其脆弱性评价[J].水利学报,2006,37(7):851~857.  
Wu Qiang, Wang Zhiqiang, Zhao Zengmin, et al. Pollution mechanism and vulnerability assessment of confined aquifer groundwater in oil field [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(7): 851~857. (in Chinese)
- 3 方樟,肖长来,梁秀娟,等.松嫩平原地下水脆弱性模糊综合评价[J].吉林大学学报:地球科学版,2007,37(3):546~550.  
Fang Zhang, Xiao Changlai, Liang Xiujuan, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of the groundwater vulnerability in Songnen Plain [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(3): 546~550. (in Chinese)
- 4 范弢,杨世瑜.云南丽江盆地地下水脆弱性评价[J].吉林大学学报:地球科学版,2007,37(3):551~556.  
Fan Tao, Yang Shiyu. Groundwater vulnerability assessment in Lijiang Basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(3): 551~556. (in Chinese)
- 5 冶雪艳,赵坤,杜新强,等.突变理论在地下水开发风险评价中的应用研究[J].人民黄河,2007,29(10):47~50.  
Ye Xueyan, Zhao Kun, Du Xinqiang, et al. Application of catastrophe theory to risk assessment of groundwater environment [J]. Yellow River, 2007, 29(10): 47~50. (in Chinese)
- 6 李绍飞,冯平,林超.地下水环境评价指标体系得探讨与应用[J].干旱区资源与环境,2007,21(1):38~43.  
Li Shaofei, Feng Ping, Lin Chao. Investigation on the index system of groundwater environment risk and its application [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(1): 38~43. (in Chinese)
- 7 李绍飞,孙书洪,王向余.突变理论在海河流域地下水环境风险评价中的作用[J].水利学报,2007,38(11):1312~1317.  
Li Shaofei, Sun Shuhong, Wang Xiangyu. Application of catastrophe theory to risk assessment of groundwater environment for river basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(11): 1312~1317. (in Chinese)
- 8 Poston T, Lan Stewart. Catastrophe theory and application [M]. Lord: Pitman, 1978.
- 9 凌复华.突变理论及其应用[M].上海:上海交通大学出版社,1987.
- 10 周绍江.突变理论在环境影响评价中的应用[J].人民长江,2003,34(2):52~54.  
Zhou Shaojiang. Application of catastrophe theory in environment impact evaluation [J]. Yangtze River, 2003, 34(2): 52~54. (in Chinese)
- 11 施玉群,刘亚莲,何金平.关于突变评价法几个问题的进一步研究[J].武汉大学学报:工学版,2003,36(4):132~136.  
Shi Yuqun, Liu Yalian, He Jinping. Further study on some questions of catastrophe evaluation method [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(4): 132~136. (in Chinese)
- 12 肖长来,贾涛,梁秀娟,等.五家子灌区引水对镇赉县低平原的环境影响[J].吉林大学学报:地球科学版,2007,37(2):341~345.  
Xiao Changlai, Jia Tao, Liang Xiujuan, et al. Environmental impact of Wujiazhi irrigation on the low plain in Zhenlai County [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(2): 341~345. (in Chinese)
- 13 王兵,刘国彬,张光辉,等.黄土丘陵区中尺度流域水土流失治理环境效应评估[J].农业机械学报,2012,43(7):28~35.  
Wang Bing, Liu Guobin, Zhang Guanghui, et al. Ecological and environmental assessment on the effects of water and soil loss comprehensive harness in meso-scale watershed in loess hilly region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 28~35. (in Chinese)

(上接第 105 页)

- 10 陈小华,朱洪光.农作物秸秆产沼气研究进展与展望[J].农业工程学报,2007,23(3):279~283.  
Chen Xiaohua, Zhu Hongguang. Research progress and prospect on producing biogas from crop straws [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(3): 279~283. (in Chinese)
- 11 Nizami A S, Korres N E, Murphy J D. Review of the integrated process for the production of grass biomethane [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(22): 8496~508.
- 12 王晓娇,李轶冰,杨改河,等.牛粪、鸡粪和稻草混合的沼气发酵特性与工艺优化[J].农业机械学报,2010,41(3):104~108.  
Wang Xiaojiao, Li Yibing, Yang Gaihe, et al. Fermentation and process optimization of mixed cow dung, chicken manure and rice straw for biogas production [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 104~108. (in Chinese)
- 13 贺延龄.废水的厌氧生物处理[M].北京:中国轻工业出版社,1998:536~538.
- 14 Hanaki K, Hirunmasuwan S, Matsuo T. Protection of methanogenic bacteria from low pH and toxic materials by immobilization using polyvinyl alcohol [J]. Water Research, 1994, 28(4): 877~885.
- 15 Callaghana F J, Wasea D A J, Thayanithya K, et al. Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure [J]. Biomass and Bioenergy, 2002, 22(1): 71~77.