

以互花米草为原料生产沼气的初步研究

朱洪光^{1,2}, 陈小华¹, 唐集兴³

(1. 同济大学现代农业科学与工程研究院生物质能源研究中心, 上海 200092; 2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 3. 宜春市农业局沼气办公室, 宜春 33600)

摘 要: 作为一种入侵种, 互花米草受到很多质疑, 但是作为潜在资源, 却没有得到重视。该文报道以互花米草为原料生产沼气的试验, 探索互花米草资源开发的可能性。试验设置中温和常温两组, 中温组进行了 45 d, 温度控制在 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$; 常温组进行了 86 d, 温度随室内温度变化, 范围为 $15 \sim 33^\circ\text{C}$ 。结果显示: (1) 互花米草是生产沼气的较好原料, 其 TS 产气率达到 $0.20 \sim 0.22 \text{ L/g}$, VS 产气率达到 $0.21 \sim 0.23 \text{ L/g}$ 。(2) 温度对互花米草产沼气的效率影响较大。原料干物质日平均产气率, 中温组为 $4.58 \text{ mL}/(\text{g} \cdot \text{d})$, 常温组为 $2.54 \text{ mL}/(\text{g} \cdot \text{d})$, 相差非常显著。(3) 温度对互花米草产沼气的潜力影响较小。原料 TS 产气率和 VS 产气率, 中温组分别为 0.20 L/g 和 0.22 L/g , 常温组分别为 0.21 L/g 和 0.23 L/g , 相差均不显著。(4) 互花米草沼气反应系统 pH 值缓冲能力较大, 反应不需补充碱性缓冲物质。反应中, 中温组和常温组的 pH 值均在 7 左右, 未出现酸化现象。根据研究结果, 利用沼气转换途径, 互花米草有望成为一种非常有潜力的生物能源植物资源。

关键词: 互花米草; 沼气; 生物能源

中图分类号: S216.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)5-0201-04

朱洪光, 陈小华, 唐集兴. 以互花米草为原料生产沼气的初步研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 201-204.

Zhu Hongguang, Chen Xiaohua, Tang Jixing. Pilot study on employing *Spartina alterniflora* as material for producing biogas by biogasification[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 201-204. (in Chinese with English abstract)

0 引言

20 世纪 80 年代初期, 互花米草 (*Spartina alterniflora*) 引入中国, 在保滩护岸、改良土壤、绿化海滩和改善海滩生态环境等方面, 取得了突出生态和社会效益^[1]。在过去 20 年中, 该物种急剧扩张。目前北起辽宁盘山、南至广东电白的淤泥质海岸, 都有其间断分布。快速扩张的事实已经把互花米草引入是非之门^[2]。2002 年, 中国国家环保局将其列为 16 种外来有害入侵种之列, 很多地区欲予以彻底清除。目前, 尝试用各种物理、化学和生物等方法消灭互花米草, 但是在实践上仍没有很理想的研究成果^[3,4]。就目前研究和实践来看, 由于其自身生命力和繁殖力的特性, 对于成熟互花米草群落, 彻底清除的希望几乎是渺茫的。此外, 互花米草清除工程的高花费和高污染也使清除工作难以维持。互花米草是一种潜在的生物质资源, 在资源日益紧缺的今天, 如果加以开发, 一方面可以利用互花米草高效的生产力, 获得经济效益; 另一方面也可以通过持续收获其生物量, 达到抑制其恶性扩张。钦佩等在互花米草的营养和药用方面进行了大量研究, 一些产品已经产业化并获得很好的生态经济效益^[5]。2005 年山东大学、上海寿祺多糖食品研究所等单位合作用互花米草进行气、电、热三联供技术研究^[6]。药用和营养开发对资源的消纳量非常有限; 高含盐量导致气化稳定性差, 并严重腐蚀设备。目前, 仍没有一种实用和有效的途径, 用于互花米草的全面

利用和控制。研究已经证实, 对于成分复杂的有机物, 沼气转化是一种有效的途径。除含盐量高外, 互花米草在许多特性上类似于农作物秸秆, 如稻草、麦草和玉米秆。目前, 通过产沼气途径利用农作物秸秆的研究已经有很多成功报道^[7-9]。生产沼气也有可能成为利用互花米草的潜在有效途径, 但是尚未有任何报道。本文通过试验, 一方面研究互花米草产沼气进行生物质能源转化的可行性; 另一方面初步探索互花米草产沼气的基本特征。

1 材料和方法

1.1 试验材料和接种物

试验中, 互花米草试验材料于 2005 年 11 月采自上海市南汇区东海海滩的互花米草盐沼。试样采集后, 摊放在试验室内自然风干。风干后的互花米草, 用切纸刀切成 $2 \sim 3 \text{ cm}$ 的碎段, 用于沼气发酵试验。接种物取自于上海市松江污水处理厂的厌氧消化塔处理后的脱水污泥。

1.2 试验装置和方法

试验装置由发酵装置、气体计量装置和连接管道共同构成 (见图 1)。发酵装置由透明树脂玻璃加工而成, 分上下两个分体。通过法兰连接, 体积为 4.75 L , 其中下分体体积为 4.28 L 为投料区, 上分体为集气区。下分体口沿设置活动格栅用于防止互花米草漂浮, 避免发酵过程中发酵料表面结壳。产生的气体通过储气袋收集, 定期用计量装置进行体积计量。计量装置由排水瓶和集水量筒构成。

试验分为中温和常温两组进行对比, 同时设置一个空白参比组。中温试验组, 试验装置放置于专门设计的控制箱中, 使环境温度维持在 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。常温试验组, 试验装置直接置于实验室内, 没有进行任何控温措施, 反应温度随室内环境温度变化。中温组和常温组都投加 250 g 风干互花米草, 其含水率为

收稿日期: 2006-10-18 修订日期: 2007-04-09

基金项目: 同济大学污染控制与资源化国家重点实验室开放基金 (PCRRF05006); 同济大学青年优秀人才培养行动计划 (2006KJ046)
作者简介: 朱洪光 (1974—), 男, 安徽阜南人, 博士, 从事生物质能源工程研究。上海 同济大学生物质能源研究中心, 200092。

Email: zhuhg@mail.tongji.edu.cn

16.4%,同时投加接种物 800 g,添加 2% 的尿素用于调整 C/N。空白参比组反应温度维持在 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$,只投加 800 g 接种物,不投加互花米草原料,用于校正接种物有机质对试验产气的影响。

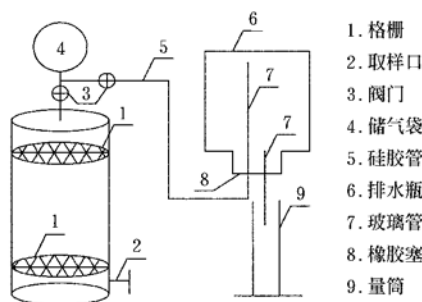


图1 试验装置

Fig.1 Experimental set-up for the digestion system

1.3 指标测试和分析

试验前,分别对试验原料互花米草、接种污泥的总固体(TS)、可挥发性固体(VS)含量进行测试。总固体(TS)测试是将含有样品的坩埚放入烘箱,在 $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重后测定^[10];挥发性固体(VS)测试是将含烘干后样品的坩埚在马弗炉在 $(575 \pm 25)^\circ\text{C}$ 下灼烧 4 h,质量恒定后测定^[11]。

试验开始后,每天测量两组试验装置的环境温度和产气量,环境温度通过温度计直接记录,产气量通过试验装置中的气体计量装置进行测定。空白参比组因每日产气量非常少,仅在试验结束后,进行总产气量测定。每两天从两组试验装置取样口取发酵液测其 pH 值,用上海虹益仪器仪表有限公司生产的 PH-S25 数显酸度计直接测试。

试验结束后,综合试验数据进行产气指标分析,包括:TS 产气率,即单位原料干物质产气量,主要反映原料的产气潜力;VS 产气率,即单位原料挥发性有机物产气量,主要反映原料有机质的转化潜力;原料干物质日平均产气率,即单位绝干质量的原料每日平均产气量,主要反映原料的工程应用参数。计算公式如下

$$TS_{\text{产气率}} = \frac{\text{总累积产气量} - \text{空白组总累积产气量}}{W \cdot TS} \quad (1)$$

$$VS_{\text{产气率}} = \frac{\text{总累积产气量} - \text{空白组总累积产气量}}{W \cdot TS \cdot VS} \quad (2)$$

单位绝干原料日平均产气率 =

$$\frac{\text{试验总累积产气量}}{\text{总发酵天数} \times \text{试验绝干原料质量} \cdot (\text{g})} \quad (3)$$

式中 W ——原料质量, g; TS ——原料总固体百分含量, %; VS ——挥发性固体占总固体百分含量, %。

2 结果

2.1 产气量

中温、常温两组试验的日产气量随时间的变化见图 2。图中显示:在中温组试验中,开始几天的产气量很少,并且有一定的波动。然后,日产气量快速增加,到第 22 d 日产气量达到峰值为 2420 mL,随后日产气量很快减少直至反应结束。在常温组试验中,反应初期 20 多天保持低日产气量,随后缓慢增加,到第 31 d 日产气量才上升到峰值 1430 mL。整个产气周期,日产气量都较少,除了第 28 d 至第 32 d 这 5 天以外,其余时间内日产气量都

小于 1000 mL。

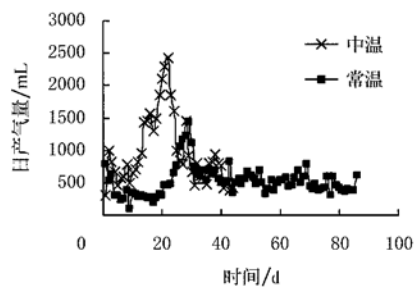


图2 不同温度处理的日产气量随反应时间的变化曲线

Fig.2 Temporal changes of daily biogas yield at different temperatures

图3为逐日累积产气量随时间的变化。图中显示:在中温条件下,经过 45 d 的反应,总产气量达到 43 L 左右。前 25 d 累计产气量占总产气量的 60% 左右,前 30 d 占总产气量的 74% 左右,前 35 d 占总产气量的 83% 左右。在常温条件下,经过 86 d 的反应,总产气量达到 45 L 左右。前 50 d 累计产气量占总产气量的 58% 左右,前 60 d 占总产气量的 69% 左右,前 70 d 占总产气量的 82% 左右。

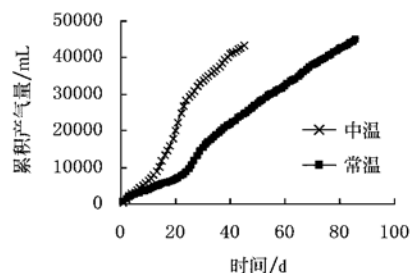


图3 不同温度处理的逐日累计产气量随反应时间的变化曲线

Fig.3 Temporal changes of cumulative biogas yield at different temperatures

空白组试验结束后,测得其总产气量为 1180 mL,表明接种物对试验产气量的影响甚微。

2.2 温度

常温组试验的温度记录以及随时间的变化见图 4。图中显示:中温试验组,由于处于控制条件下,温度变化稳定,维持在 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ 左右。在 45 d 的反应过程中,反应器的平均环境温度为 34.5°C 。常温条件下,室温受环境的直接影响,温度变化比较大。反应器启动的环境温度为 18.0°C ,最低温度为 15.0°C 。随着气温升高,最高温度出现在第 69 d,达到 33.0°C 。在 86 d 的反应过程中,反应器的平均环境温度为 25.1°C 。

2.3 pH 值

两组试验发酵液 pH 值测试结果以及随时间变化见图 5。从图中可以看出:中温条件下,开始几天 pH 值较低,到第 7 d, pH 值最低为 6.98,然后开始回升,最后基本在 7.45 左右徘徊。在常温条件下,开始几天 pH 值有一个下降的趋势,在第 6 d, pH 值最低为 6.59,然后 pH 值开始回升, pH 值在 7.16 左右徘徊一段时

间,到第48 d上升到最大值为7.84,然后突然下降到6.87,最后基本维持在7.15左右。总的来说,中温条件下,pH值变化比较有规律,而在常温条件下,pH值的变化幅度较大。

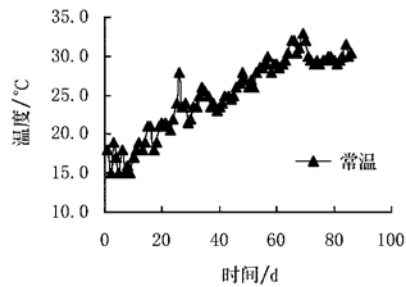


图4 温度变化曲线

Fig. 4 Curves of temperature changes

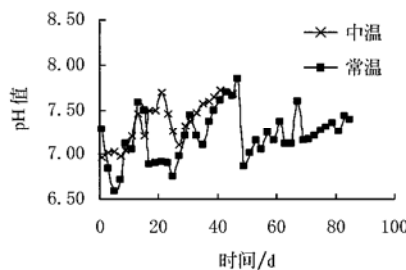


图5 pH值变化曲线

Fig. 5 Curves of pH changes

2.4 产气率指标

根据测得的试验投加的互花米草原料和接种污泥的TS值(分别为83.6%和23.2%);VS(占TS百分比)值(分别为90.0%和45.1%)和原料接种物产气体量测试数据,由(1)~(3)式可计算得两组试验的TS产气率、VS产气率、原料干物质日平均产气率,其中中温组分别为0.20 L/g、0.22 L/g和4.58 mL/(g·d);常温组分别为0.21 L/g、0.23 L/g和2.54 mL/(g·d)。可以看出:两组试验中原料TS产气率和VS产气率相差不大,而原料干物质日平均产气率相差非常显著。

3 讨论

3.1 互花米草产沼气潜力和生物质能源转化的可行性

表1是互花米草与其它原料产气率的比较。可以看出,互花米草比稻草、麦草和猪粪的产气率大,接近玉米秆和牛粪的产气率,是一种生产沼气的较好原料。互花米草植株高大,生物量丰富,干物质可以达到2~3 kg/m²。南汇区东海海滩盐沼地生长有大面积互花米草。李贺鹏(2006)根据2003年的TM卫星,南汇区东海海滩的互花米草盐沼面积达20.69 km²,每年可以生产出(4.1~6.2)×10⁴ t互花米草^[12]。根据本研究,互花米草产沼气TS产气率达到0.20~0.22 L/g。如果将这些互花米草用于产沼气,可以生产出(8.2~12.4)×10⁶ m³的沼气。按照目前1 m³的沼气可以发1.6 kw/h电来计算,这些沼气可以发电1.3~2.0×10⁷ kw/h。由此可知,互花米草蕴含着非常庞大的生物质能源,资源开发潜力大。沼气发酵能耗低,无污染物排放,发酵后的残

余物可以后续利用,不会对环境产生危害,这些优点已经在污水处理、垃圾转化等领域得到反复证实^[10]。因此,以互花米草为原料进行沼气生产,获取生物质能源,资源潜力有一定保障。

表1 互花米草与其它原料产气率的比较^[13-17]

Table 1 Contrast between *Spartina alterniflora* and other materials of biogas yield

原料种类	反应器	发酵温度/℃	TS产气率/L·g ⁻¹
互花米草	单相	15~35	0.20~0.22
玉米秆 ^[13]	单相	自然温度	0.24
鲜青草 ^[13]	单相	自然温度	0.28
牛粪 ^[13]	单相	23~31	0.23~0.29
稻草 ^[13]	单相	27~30	0.14
麦草 ^[13]	单相	27~30	0.18
猪粪 ^[13]	单相	27~30	0.13
人粪 ^[13]	单相	27~30	0.32
水葫芦 ^[14]	单相	35	0.54
蓝藻 ^[15]	单相	自然温度	0.18
大蒜废弃物 ^[16]	两相	35	0.47
马蹄莲秸秆 ^[17]	单相	22~24.4	0.80

3.2 温度对互花米草产沼气的影响

从本文试验结果可见,温度对互花米草产气速度影响较大,对互花米草产气潜力影响较小。中温组和常温组相比,互花米草的产气速度快,日产气量是常温组的1.8倍左右;产气峰值大,比常温组的峰值高1000 mL/d左右;产气峰值比常温组提前9 d;产气周期短,中温组45 d总的产气量为43 L和常温组86 d总的产气量45 L相差无几。微生物在较高温度下的代谢过程较快,高温发酵较中温发酵、中温发酵较低温发酵反应速度要快得多,其相应的产气周期要短^[12]。本试验的研究结果也符合这一规律。由于温度对发酵效率的正向促进,未来工程中合理控制温度是非常必要的。

3.3 pH值变化与发酵过程的相互关系

互花米草沼气反应系统pH缓冲能力较大,反应不需补充碱性缓冲物质。试验中,中温组和常温组的pH值均在7左右,未出现酸化现象。但是,反应过程中,pH仍然存在一定波动。从试验结果中可以看出,反应初期两组试验的pH值较低或有下降的趋势。这可能是由于产酸菌易大量繁殖,很容易迅速利用原料中的可溶性有机质产酸,大量的有机酸没有及时分解,导致酸积累^[18]。但是互花米草是生长在潮带间植物,盐分含量大,受原料中盐分的中和,pH值的变化受到缓冲。两组试验在反应初期的产气量也都很少,且pH值变化并不剧烈一般都在7以上,整个反应过程中没有出现酸化现象。但是,随着原料中的可溶物质大量消耗,产酸细菌生长受到抑制,同时大量的有机酸积累为产甲烷菌提供了营养,产甲烷菌开始大量繁殖,分解有机酸,pH值逐渐上升,产气量开始增加^[19]。此后,产酸微生物对有机质的分解和产甲烷细菌的甲烷转化趋于平衡,pH值也趋于稳定,产气逐渐停止。

4 结论

本文试验表明互花米草是一种潜在的生物资源,用于生物质能源开发是可行的。

致谢和声明: 本研究由同济大学污染控制与资源化国家重点实验室开放基金项目(PCRRF05006)和同济大学青年优秀人才培养行动计划项目(2870219005)提供资金支持, 同时上海林海生态技术有限公司也为本研究提供资金支持。试验过程中上海林海生态技术有限公司的王彪和邹孔文先生协助完成了大量的研究工作。本文研究内容已申报中华人民共和国知识产权局发明专利, 专利公开名称为: 一种以互花米草为原料生产沼气的方法; 公开号为: CN200610116145.3。

[参 考 文 献]

- [1] 宋连清. 互花米草及其对海岸的防护作用[J]. 东海海洋, 1997, 5: 11-19.
- [2] 林如求. 三都湾大米草和互花米草的危害及治理研究[J]. 福建地理, 1997, 12(1), 16-19.
- [3] Washington Sea Grant Program Bio-invasions: breaching natural barriers[Z]. Seattle: University of Washington, 2000.
- [4] Wu W Y, Hacker S. Potential of *Prokelisia* spp. as biological control agents of English cordgrass, *Spartina anglica*[J]. Biol Control, 1999, 16: 267-273.
- [5] 钦 佩, 仲崇信. 米草应用研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1988.
- [6] 董 磊, 黄寿祺, 彭武厚, 等. 以大米草为原料形成的电、热、气三联供系统及工艺[P]. 申请(专利)号: 200510045290.2.
- [7] Lars Mattias Svensson, Lovisa Bjornsson, Bo Mattiasson. Enhancing performance in anaerobic high-solids stratified bed digesters by straw bed implementation[J]. Bioresource Technology, 2005.
- [8] Chen Hongzhang, Wang hui, Zhang Aijun, et al. Biogasification of steam-explode wheat straw by a two-phased digestion system[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11): 116-120.
- [9] Luo Qingming, Li Xiujin, Zhu Baonin, et al. Anaerobic biogasification of NaOH-treated corn stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 111-115.
- [10] 贺延龄. 废水的生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998.
- [11] 石淑兰, 何福望. 制浆造纸分析与检测[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.
- [12] 李贺鹏, 张利权, 王东辉. 上海地区外来种互花米草的分布现状[J]. 生物多样性, 2006, 14(2): 114-120.
- [13] 张全国. 沼气技术及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [14] 徐 锐. 滇池蓝藻的沼气发酵及低密度蓝藻水体处理研究[D]. 云南师范大学, 2004.
- [15] 曹伟华. 水葫芦厌氧发酵工艺与现场中试研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [16] Ruihong Zhang, Zhiqin Zhang. Anaerobic digestion of vegetable waste with an anaerobic phased solids digester system[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(5): 134-139.
- [17] 苏有勇, 张无敌. 马蹄莲秸秆秸秆发酵产沼气潜力的研究[J]. 农业与技术, 2003, 23(6): 53-57.
- [18] 吴 江, 徐龙君, 谢金连. 碱浸泡预处理对固体有机物厌氧消化的影响研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(2): 252-255.
- [19] 郑元景, 沈永明, 沈光范. 污水生物处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.

Pilot study on employing *Spartina alterniflora* as material for producing biogas by biogasification

Zhu Hongguang^{1,2}, Chen Xiaohua¹, Tang Jixing³

(1. Bio-Energy Research Center, Modern Agricultural Science & Engineering Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control & Reclamation, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Agricultural Bureau Biogas office of Yichun, Yichun 336000, China)

Abstract: *Spartina alterniflora* as an invader, has been suffered many censures from public. But as resource, *Spartina alterniflora* has not been attended. This paper reported a trial, which employed *Spartina alterniflora* as material for manufacturing biogas, and explored possibility of *Spartina alterniflora* as resource. Two groups of test were set-up, one was mesophilic temperature group (MTG), and the other was normal temperature group(NTG). MTG was done for 45 days and its temperature was (35±2) °C. NTG was done for 86 days, and its temperature changed from 15°C to 33°C along with temperature in the room. The results show: (1) *Spartina alterniflora* is a better material for biogasification, biogas yield per gram total solid(BYTS) and biogas yield per gram volatility solid(BYVS) arrived at 0.20~0.22 L/g and 0.21~0.23 L/g separately; (2) Temperature rather affected the efficiency of *Spartina alterniflora* biogasification, biogas yield per gram material was 4.58 mL/(g·d) from MTG, but 2.54 mL/(g·d) from NTG, notability difference existed in them; (3) Temperature less affected the potential of *Spartina alterniflora* biogasification, BYTS and BYVS were 0.20 L/g and 0.22 L/g from MTG, 0.21 L/g and 0.23 L/g from NTG, no-remarkable difference existed in them; (4) The capacity of pH value buffer was very strong in digestion system of *Spartina alterniflora*, and alkalinity matter was not demanded for neutralizing excess acid. In process of the trial, pH value of two groups were both about 7, neither appeared excessive acid. As a result, it is hopeful that *Spartina alterniflora* becomes a very potential resource plant for obtaining bio-energy by means of biogasification.

Key words: *Spartina alterniflora*; biogas; bio-energy