

## 甘蔗沼气开发与产业化展望

毛瑞丰<sup>1</sup>, 李扬<sup>1</sup>, 黄凌云<sup>1</sup>, 黄振华<sup>2</sup>, 李顺<sup>1</sup>

(1. 广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004; 2. 东兴市工商行政管理局, 广西东兴 538100)

**【摘要】** 随着能源短缺和环境污染现象的加剧, 沼气这一清洁能源日益成为人们关注的重点。论述沼气的发展现状, 就甘蔗沼气产业化生产的可行性进行分析; 在甘蔗全株厌氧消化产沼气实验结果的支持下, 提出甘蔗沼气产业化生产的重要意义在于: 建立一种符合可持续性发展要求的环保型绿色能源生产方式; 扩大甘蔗产业链, 促进甘蔗产业结构优化。

**【关键词】** 沼气; 产业化; 甘蔗; 青贮

**【中图分类号】** S216

**【文献标识码】** A

**【文章编号】** 2095-3518(2013)04-26-04

## 1 前言

能源问题已经成为我国日益关注的焦点问题, 天然气的严重缺乏迫使我们尽快找到新的天然气替代能源。发展符合可持续性发展要求的环保型绿色能源, 从而减少对化石原料的依靠, 是中国经济可持续发展的先决条件。研究分析表明<sup>[1]</sup>, 沼气发酵技术是一种最有效的利用生物产能的方法, 是一种环保型绿色能源。与其他所有生物和热化学途径的能量转化过程相比, 沼气发酵能量输出和输入的比率最大, 因此, 沼气产品是中国最适宜的生物能源物质。

## 2 沼气的产业化发展

我国沼气生产虽然发展较快, 但其成果大多体现为以环保为出发点, 在国家政策的扶持下发展起来的农村户用型沼气池。基本上只能满足农户家庭基本需要, 所产沼气并不具备商业化资源意义。由于各种技术条件和结构体系的缺陷, 农村户用沼气池建设与运行存在各种问题, 致使户用沼气逐年下降。近年来, 大中型沼气生产项目逐渐增多, 说明沼气生产开始出现集约化、规模化的产业化发展趋势, 沼气生产越来越显示出资源化开发的特点。

瑞典隆德大学教授刘京曾说: “当前, 世界范围内最为现实可行的清洁燃料和能源的生产手段之一就是工业化、规模化、市场化和融合技术创新为特征的产业沼气。” 西欧很多国家都已经开始了沼气的产业化发展, 将发酵产生的沼气经处理后进入天然气管网或者运至加气站。2006年瑞典车用提纯沼气的用量就已经超过天然气, 并已研制出首辆沼气驱动火车<sup>[2]</sup>。2009年底, 德国已经有4780家大型沼气发电厂, 发电量占全国总发电的29%。德、奥两国分别制定了到2020年提纯沼气占到天然气总用量的20%的目标<sup>[3]</sup>。我国大量发展的户用小型沼气池主要是在国家的财政支持下建立起来, 以解决环保问题为目的而发展的粗放型模式。而很多西欧国家, 沼气发展是建立在经济效益的目的上, 沼气池的建设大多是私人投资, 银行贷款, 政府仅起辅助作用。产业化的沼气生产, 不仅解决了废弃物的环境污染问题, 而且在很大程度上提高了沼气生产的效率和废弃物的利

用率。以企业经营为主的大型沼气生产无论在管理还是在生产上都实现了规模化, 最大限度的实现了沼气的商业化价值, 提高了国民经济效益。沼气生产已经成为一个重要的绿色能源产业。

近几年来, 随着绿色能源革命的不断深入, 我国也开始加快产业化沼气发展的步伐。2010年9月, 在德国政府的帮助下, 我国在黑龙江省宾县建立了全国最大的沼气项目, 一半沼气供给当地1万户居民生活使用, 一半提纯后供车辆使用<sup>[4]</sup>。2010年国内首个车用沼气项目也落户海南, 投产后的沼气将用于清洁汽车燃料, 在一定程度上将缓解海南的“气荒”现象<sup>[5]</sup>。由安阳恒生能源有限公司投资建设的国内首个沼气产业化项目已经成功投入商业化运营。该公司生产的沼气经提纯后, 可直接输送到加气站, 与天然气和成品油相比, 生产成本较低, 价格优势明显, 具有较强的市场竞争力<sup>[6]</sup>。产业化是沼气发展的一种必然趋势。

## 3 甘蔗原料产沼气的应用前景

中国沼气生产一直处于滞后水平, 一个重要的原因是生产原料的缺乏。仅靠牲畜粪便进行沼气的生产, 远远不能达到产业化目的。沼气生产产业化必须要有充足的原料支持, 因此, 开发利用新原料成为沼气产业化发展的关键步骤。广西是一个高产甘蔗省份, 据统计, 2010年广西甘蔗产量7119.6万吨, 占全国总产量的60%以上, 居全国第一<sup>[7]</sup>。甘蔗是光合效率最高的C<sub>4</sub>作物, 几乎没有光饱和点, 且它吸收的太阳能大部分都直接转化为蔗糖, 减少了其它物质转化过程中的能耗。因此, 甘蔗是将太阳能转化为化学能效率最高的作物。甘蔗的主要成分可溶性糖、半纤维素和纤维素都具有沼气生产的巨大潜力, 利用甘蔗生产沼气能有效的利用甘蔗的各个部位, 充分挖掘生物转化太阳能的潜力。

### 3.1 甘蔗制糖与甘蔗产沼气

甘蔗制糖是广西传统产业的经济支柱。必须在大力发展甘蔗制糖的同时, 扩大甘蔗产业链, 优化甘蔗产业结构。

目前, 有以下一些问题对甘蔗制糖产生不良的影响或制约作用。

**【作者简介】** 毛瑞丰(1963-), 男, 广西桂林人, 广西大学副教授, 博士, 硕士研究生导师。

**【基金项目】** 广西甘蔗糖业创新平台建设(桂科能10100025)

(1)甘蔗制糖对甘蔗质量要求高,蔗糖转化速度快,不利于储藏。甘蔗砍后不能及时压榨,导致大量蔗糖转化为还原糖,降低了蔗糖的产量,且加大了生产的成本。劣质原料蔗甚至失去了提炼蔗糖的价值。再者,甘蔗制糖对甘蔗的成熟度要求极高,需要正确的把握蔗糖积累的高峰期,过早或者过迟的收获都会影响蔗糖的生产产量。原料蔗的质量是当前糖厂面临的重大制约问题。而甘蔗生产沼气则不存在此类问题,甘蔗产沼气对蔗糖含量的要求不高,蔗糖的转化不会影响沼气的产量,相反,如果将甘蔗青贮再发酵加工成沼气,则由于青贮后的甘蔗易于保存,能够常年随取随用,发酵产沼气对原料的成分要求不大,且甘蔗中的有机生物物质几乎都能被微生物利用产沼气,经过微生物的分解大分子有机生物物质转化为小分子物质更利于沼气的生产,Chynoweth的研究表明<sup>[8]</sup>,青贮甘蔗在一定程度上加大了甘蔗的沼气产量,很大程度上加大了甘蔗的有效利用率。因此,将甘蔗制糖的劣质原料分流于沼气生产,是非常合理的优化调整。

(2)甘蔗制糖只利用了甘蔗中的蔗糖,蔗渣、蔗叶、蔗头、蔗尾等都不能予以利用。这些制糖废弃物部分用于造纸,其余被焚烧处理,给糖厂提供了少量的热能回收。沼气生产不仅能利用蔗糖,而且能有效利用蔗渣中的各种有机生物物质。蔗渣、蔗叶、蔗头、蔗尾也能通过厌氧发酵生产沼气,实现了甘蔗原料的有效利用,可以挖掘出超过目前生产方法所创造的利用价值。

(3)广西等地土地资源丰富,大量的荒地没有被开发利用,将荒地、农作物废弃地种植能量转化率高的甘蔗产品,能够在很大程度上加大能源的利用率,充分挖掘太阳光的潜力。在保证甘蔗制糖原料供给的前提下,为甘蔗沼气产业化发展提供充足的原料。充分利用广西本地充足的甘蔗这一庞大的生物资源大力开发沼气产业将有望实现沼气产量的突破。

### 3.2 甘蔗产酒精与甘蔗产沼气

我国政府一直致力于生物能源的研究和开发,1999年首批4个原料乙醇定点生产企业。由于以玉米为主的粮食乙醇生产存在着与人争粮的问题,为保证国家粮食安全,2006年8月26日发改委在上报给国务院的《关于替代能源研究的有关报告》中指出“十一五”期间,中国应重点发展木薯、甘薯、甜高粱、甘蔗等燃料乙醇。在2007年6月7日国务院召开的关于可再生能源会议上表示中国将停止在建的煤化工项目和粮食乙醇燃料项目,在不得占用耕地,不得消耗粮食,不得破坏生态环境的原则下,坚持发展非粮燃料乙醇。与其他非粮作物相比,甘蔗能适应于旱地的生长,单位面积生物量高,不与粮食争地,化肥等需求量少,而且可以几年种植一次,极大的减少了劳动量和生产成本。据路明<sup>[9]</sup>分析报道,甘蔗酒精的尽能比为5.39,而玉米酒精的尽能比仅为1.34,甘蔗生产能源具有极大的优势。在我国,由于酒精的生产的一些缺陷,一直依靠政府的扶助和补贴维持,因此,提高能源生产的经济效益成为生物质能源发展的重点,而与甘蔗酒精生产相比,甘蔗沼气生产存在以下优势:

(1)甘蔗酒精生产废液处理目前存在技术难关。甘蔗酒精生产废液具有污染量大、污染负荷高、生物转化困难等特点。目前还没有真正有效可行的工业废水处理办法。厌氧处理,即沼气发酵是针对多种高污染负荷废液行之有效的处理技术。但是,甘蔗糖蜜酒精生产废液中超量的硫酸根,对厌氧处理中的甲烷菌有强烈的抑制作用。甘蔗糖蜜酒精生产废液使用厌氧处理

必须解决这一难题才能具有实际意义。甘蔗糖蜜酒精生产废液中的硫酸根来自于制糖过程和糖蜜处理,使用甘蔗制沼气,将没有硫酸根的引入,厌氧发酵得以顺利进行。而且甘蔗沼气的生产过程中几乎可以做到零排放,发酵结束后的沼液还可以进行深加工成有机肥料,用于农业生产,增加了附加值,减少了环境污染。

(2)酒精生产过程中涉及到蒸馏等高能耗问题,沼气生产过程中能耗要求低,自然条件下就能发酵产沼气,降低了生产成本。

(3)酒精生产全过程人力资源需求大,而沼气生产中只需稍加监督和检测,节约了劳动力。

(4)酒精的生产仅仅能够利用蔗糖和小部分纤维素、半纤维素。而沼气生产通过各种微生物系统的相互作用,能充分利用甘蔗中各种有机生物物质,甘蔗原料得到充分利用。据Chandra<sup>[1]</sup>报道,几乎所有的物质(碳水化合物、脂肪和蛋白质)能在厌氧发酵的过程中转化为简单的衍生物,最终转化为甲烷和二氧化碳。

按照13.89-16.23t蔗茎就能生产1t酒精<sup>[10]</sup>计算,据Chandra<sup>[1]</sup>报道生产酒精的过程中有9-10MJ的能量用于供能,减去消耗的部分能量,最后产能为 $1.75 \times 10^{10}$ - $1.87 \times 10^{10}$ J。Deren<sup>[11]</sup>和Chynoweth<sup>[12]</sup>分别研究表明甘蔗产甲烷潜力分别为0.266-0.314m<sup>3</sup>/KgVS和0.230-0.300m<sup>3</sup>/KgVS。依照上述甲烷产量计算,13.89-16.23t蔗茎能够生产沼气 $8.30 \times 10^2$ - $1.325 \times 10^3$  m<sup>3</sup>。按照沼气中甲烷平均含量60%计算,共产能 $1.79 \times 10^{10}$ - $2.85 \times 10^{10}$ J,比酒精产能高。

我们实验室使用榨季结束时蔗场废弃甘蔗,进行了多批次的甘蔗全株厌氧消化产沼气实验,产沼气量已经达到了0.679m<sup>3</sup>/KgVS,产沼气量高于文献报道。而甘蔗沼气的研究目前尚处于初级阶段,继续加大甘蔗沼气的深入研究,甘蔗沼气的产量将有望得到更大的突破。

## 4 甘蔗沼气的研究方向

在农作物作为沼气能源的开发利用方面,目前对秸秆类产沼气的研究比较多,大多集中在稻草和玉米秸秆的研究开发上,仅有部分报道<sup>[6]</sup>针对糖厂、纸厂废弃的蔗渣进行厌氧发酵。以甘蔗沼气产业化发展为目标,必须对全株甘蔗厌氧发酵过程进行研究,优化最佳产气条件。同时,应充分利用甘蔗糖厂废弃物,研究蔗梢、蔗尾、蔗叶、低质量甘蔗、过季甘蔗以及甘蔗糖厂生产过程中产生的蔗渣、滤饼、废液,用做厌氧发酵的混合原料。

### 4.1 原料预处理

#### 4.1.1 调节碳氮比

秸秆类物质的碳氮比一般都很高,不利于微生物充分生长产气,一般需要混合碳氮比低的发酵原料或者添加适量的化学元素。王天光<sup>[13]</sup>通过研究不同时期添加碳酸氢铵对微生物产气的影响,在一定程度上有效的提高了沼气的产量。甘蔗的碳氮比与其他秸秆类物质有所不同,为了更好的利用开发甘蔗这一沼气能源物质,充分调节其在厌氧发酵中最佳的碳氮比很有必要。另外,各种甘蔗废弃物的碳氮比是否一致,怎样混合配比达到最佳,以及过季甘蔗和低质量甘蔗发酵需要另外添加的营养物质都需要考虑。

#### 4.1.2 物理处理

物理处理主要是通过以改变物质的结构而增加细菌分解利用生物质的能力。Debebe Yilma Dererie<sup>[14]</sup>进行了燕麦秸秆酒精发酵后连续产沼气的实验,实验结果显示蒸汽爆破的方法能够有效的提高沼气的产量,缩短沼气生产时间,提高原料利用率。也有研究者<sup>[15]</sup>利用微波对污泥产沼气的研究,各种物理手段处理方法对甘蔗产沼气的研究如何有待摸索,确定能耗最少、产气最高的切实可行处理方法。

#### 4.1.3 化学预处理

秸秆类物质一般含有大量的纤维素、木质素、半纤维素等而不易降解。为了充分利用这些物质,发挥其最大的产气潜能,对秸秆类物质的处理主要集中在这些物质的降解和充分利用上。甘蔗中含有大量的木质纤维素,可以借助于秸秆类物质化学处理方法研究甘蔗预处理化学添加剂的最佳量。碱处理秸秆类物质的研究比较多,一般都能使沼气产量得到很大提高。康佳丽<sup>[16]</sup>、孙辰<sup>[17,18]</sup>运用NaOH分别预处理麦秸、稻秆和芦笋秸秆,使厌氧消化时间显著缩短,产气量得到很大的提高。艾平<sup>[19]</sup>等用不同浓度的Ca(OH)<sub>2</sub>溶液浸泡对秸秆有机物降解的影响,表明碱处理能有效促进秸秆水解。

#### 4.1.4 生物处理

生物处理是通过添加一些特定的菌种预先处理生物质,使有机生物质得到充分的降解,利于后续产沼气的利用。一些研究者<sup>[20-24]</sup>采用复合菌剂预处理秸秆,与未加负荷菌剂预处理的对照组相比产气量有明显提高,与麦秆和猪粪混合后的沼气甲烷含量基本无差别。实验结果表明,秸秆不仅可以完全替代禽畜粪便产沼气,也可以采用粪草相结合进行沼气发酵。Weizhang Zhong<sup>[25]</sup>利用生物复合菌种制剂预处理玉米秸秆,研究发现秸秆沼气产量显著增加。胡晓明<sup>[26]</sup>等采用实验室培养的不同复合霉菌预处理稻草秸秆效果显著。对于甘蔗的处理需要研究出最佳的预处理复合菌。也可通过添加适当的酶类来预处理物料,李建昌<sup>[27]</sup>等采用 $\alpha$ -淀粉酶和 $\gamma$ -淀粉酶共同前处理的猪粪沼气发酵,实验结果表明沼气产量明显提高。水解酶前处理技术涉及到的水解酶很多,在实际应用方面,尚需大量的研究工作。

#### 4.2 青贮技术

青贮技术广泛应用于饲料行业,是一种降解大分子有机物,减小营养物质损失的有效储藏方法。近几年,青贮技术也运用于沼气生产过程中原料的贮藏。实验研究结果表明<sup>[28-30]</sup>,青贮技术不仅在一定程度上降解了大分子有机物,减少了粗放存放引起的原料质量下降和有效成分损失的问题,延长了沼气原料的保藏期,利于常年沼气的生产。青贮技术处理甘蔗原料,使其充分的分解其纤维素、多糖等物质,为后续的厌氧消化做准备,同时,也方便了甘蔗的贮藏和应用,保证原料的常年供应,减少原料中有效成分的不必要损失,缩短发酵产沼气的周期,增加其沼气的产量。

#### 4.3 物料接种

秸秆类物质产沼气常用的接种物为新鲜牲畜粪便、老沼气池的沼渣、腐败河池或者城市污水沟的污泥等。也有研究者通过添加特定的菌群来提高秸秆类产沼气的产量,缩短沼气生产周期。叶发斌等<sup>[31]</sup>通过向沼气池中添加多种微生物混合制剂,强化了水解细菌的优势菌群,提高了有机物的分解,促进了沼气发酵原料的分解利用率,提高了产气量。

与粪便和生活污水厌氧发酵产沼气相比,秸秆类物质由于自身附带的微生物菌群较少,很难通过自身的富集迅速启动并完成发酵产沼气过程。文献报道了秸秆产沼气的过程中添加生物菌种的研究成果。甘蔗产沼气也需要开发合适的发酵菌株。

#### 4.4 低温沼气发酵的研究

Li Lianhua<sup>[32]</sup>等对水稻秸秆产沼气中温度对其影响进行了研究。实验结果表明,适宜的温度有利于沼气的产生,低于一定温度时,沼气产量受到限制。王华等<sup>[33]</sup>研究了温度对沼气菌群产气能力的影响,实验结果表明,在10~30℃范围内,产甲烷菌的产气能力随着温度的降低而减小,且其日产气量的最高峰也随之往后推迟。因此,必须加强低温沼气发酵的研究。有研究者专门研究了适合粪类低温发酵的菌株。甘蔗沼气低温产气菌的开发,低温厌氧发酵装备及工艺的研发意义重大。

#### 4.5 发酵过程微生物的情况

沼气生产发酵过程中微生物区系复杂。不少研究者<sup>[34-36]</sup>对沼气发酵过程中的主要菌群进行了研究和分析。甘蔗与粪类发酵原料存在差异,因此发酵产沼气中的菌群也具有一定的差异。研究甘蔗产沼气过程中菌相的变化,揭示甘蔗沼气发酵机理,对甘蔗沼气生产提供研发理论基础。

#### 4.6 其他

B. Demirel<sup>[37]</sup>等概括了微量元素在沼气发酵中的影响。部分微量元素在厌氧发酵中表现出对发酵菌的毒性,另一些微量元素在厌氧发酵中起着发酵菌生长因素的作用。不同原料的厌氧消化处理可能需要添加不同的微量元素使其达到最佳的产气状态,必须研究微量元素对甘蔗沼气产量的影响。

王永泽<sup>[38]</sup>等以水稻秸秆粉为发酵原料通过研究不同种类树脂对沼气发酵效果的影响得出,添加强酸性树脂的试验组的总产气量及日平均产气量远高于其它试验组,各种吸附剂对发酵产气效果影响大小不一。添加不同的树脂是否对甘蔗产沼气也有影响需进一步实验验证。

### 5 展望

甘蔗沼气的产业化除了上述需要研究的内容外,还需考虑如下几个方面:栽培及选育高产沼气的甘蔗作物;研究适合甘蔗发酵产沼气的装置设备;沼气的分离和提纯以及压缩、输运技术。

中国是世界上最大的发展中国家,面临着发展和环境的双重压力,必须坚持走可持续发展的建设道路,充分利用地区特色,大力发展支柱产业,开发清洁能源。甘蔗沼气产业化生产的重要意义在于:建立一种符合可持续性发展要求的环保型绿色能源生产方式;扩大甘蔗产业链,促进甘蔗产业结构优化。实现环境和经济“双赢”。

#### 参考文献

- [1]R.Chandra,H.Takeuchi,T.Hasegawab.Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, (16):1462-1476.
- [2]张兰英.世界首列“沼气火车”启程[J].太阳能,2005,(6):62.
- [3]程序,梁近光,等.中国“产业沼气”的开发及其应用前景[J].农业工程学

- 报,2010,26(5):1-6.
- [4]韩晶,宋微微,来玉良.我国最大沼气项目落户黑龙江省宾县(EB/OL). 2010-07-21[2012-11-10].<http://www.hlj.gov.cn/zwdt/system/2010/07/21/010084915.shtml>.
- [5]叶福.国内首个车用沼气项目今年落户海南(EB/OL).2010-05-23[2012-11-10].<http://www.hinews.cn/news/system/2010/05/23/010872571.shtml>.
- [6]海量.沼气用作车用燃料价格竞争力明显(EB/OL).2010-09-29[2013-1-10]. [http://www.cnr.cn/allnews/201009/t20100929\\_507119506.html](http://www.cnr.cn/allnews/201009/t20100929_507119506.html).
- [7]彭德科. 2010年广西甘蔗、木薯、蚕茧产量稳居全国第一(EB/OL).. 2011-01-24[2013-1-10].<http://www.gxny.gov.cn/web/2011-01/305159.htm>.
- [8]Chynoweth DP,Turick CE,Owens JM,Jerger DE, Peck MW. Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks[J]. Biomass and Bioenergy,1993,5(1):95-111.
- [9]路明.发展甘蔗燃料酒精的建议[J].作物杂志,2007,(3):1-3.
- [10]谭显平.能源甘蔗——生产燃料酒精的最佳原料[J].甘蔗,2004,11(2):30-32.
- [11]Deren CW,Snyder GH.Biomass production and biochemical methane potential of seasonally flooded inter-generic and inter-specific saccharum hybrids[J].Bioresource Technology,1991,36:179-84.
- [12]Chynoweth DP,Turick CE,Owens JM,Jerger DE,Peck MW.Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks[J]. Biomass and Bioenergy,1993,5(1):95-111.
- [13]王天光.沼气不同发酵时期加入碳酸氢铵对微生物和产气效率的影响[J].江苏农业科学,1985,(11):30-31.
- [14]Debebe Yilma Dererie ,Stefan Trobro,et al. Improved bio-energy yields via sequential ethanol fermentation and biogas digestion of steam exploded oat straw[J]. Bioresource Technology, 2011,(102) :4449-4455.
- [15]高端丽,严群,等.不同预处理方法对剩余污泥厌氧消化产沼气过程的影响[J].食品与生物技术学报,2009,28(1):107-112.
- [16]康佳丽,李秀金,等.NaOH 固态化学预处理对麦秸沼气发酵效率的影响研究[J].农业环境科学学报,2007,26(5):1973-1976.
- [17]孙辰,刘荣厚.稻秆NaOH预处理及厌氧发酵产沼气的试验研究[J].农机化研究,2010,(4):127-129.
- [18]孙辰,刘荣厚,章国栋.芦笋秸秆预处理与厌氧发酵制取沼气试验[J].农业机械学报,2010,41(8):94-99.
- [19]艾平,张衍林.稻秸厌氧发酵产沼气预处理[J].农业工程学报,2010,26(7):266-271.
- [20]闫志英,袁月祥,等.复合菌剂预处理秸秆产沼气[J].四川农业大学学报,2009,27(2):176-179.
- [21]黄如一,何万宁,等.秸秆预处理产沼气对比试验[J].中国沼气,2008,26(4):24-26.
- [22]白云,李为,等.棉秆沼气发酵生物预处理及接种物的驯化[J].微生物学通报,2010,37(4):513-519.
- [23]石卫国.生物复合菌剂处理秸秆产沼气研究[J].农业工程学报,2006,22(1):93-95.
- [24]万楚筠,黄凤洪,等.微生物预处理油菜秸秆对提高沼气产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(6):267-271.
- [25]Zhong, W., Zhang, Z.,et al. Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production[J].Bioresource Technology(2011), doi: 10.1016/j.biortech. 2011.09.077.
- [26]胡晓明,张无敌,等.微生物预处理稻草秸秆产沼气试验研究[J].安徽农业科学,2010,38(23):12797-12799,12801.
- [27]李建昌,孙可伟.淀粉酶前处理应用于猪粪沼气发酵的研究[J].环境科学与技术,2010,33(4):117-121.
- [28]D.Swaroopa Rani,Krishna Nand. Ensilage of pineapple processing waste for methane generation[J]. Waste Management,2004,(24):523-528.
- [29]H.Vervaeren,K.Hostyn,et al. Biological ensilage additives as pretreatment for maize to increase the biogas production[J].Renewable Energy, 2010,(35):2089-2093.
- [30]Christiane Herrmann,Monika Heiermann,Christine Idler.Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops [J].Bioresource Technology, 2011,(102):5153-5161.
- [31]叶发斌,赖世华,李世源,等.产沼气微生物促进剂的研制与应用[J].中国沼气,1999,17(1):28-30.
- [32] Li Lianhua, Li Dong, Sun Yongming,et al. Effect of temperature and solid concentration on anaerobic digestion of rice straw in South China[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2010,(35):7261-7266.
- [33]王华,杨光,等.温度对沼气菌群产气能力的影响及菌群变化的研究[J].西北农业学报,2008,17(5):294-297.
- [34]余软寿,项昌金,等.稻草猪粪沼气发酵过程中主要微生物类群的物质代谢及甲烷形成研究[J].中国沼气,1989,7(2):14-18.
- [35]蒙杰,王敦球.沼气发酵微生物菌群的研究现状[J].广西农学报,2007,22(4):46-49.
- [36]王刘阳.沼气发酵为神武区系变化及产甲烷古菌菌落结构分析[D].农业部沼气科学研究所,2008.
- [37]B. Demirel, P. Scherer. Trace element requirements of agricultural biogas digesters during biological conversion of renewable biomass to methane [J]. Biomass and Bioenergy, 2011,(35) :992-998.
- [38]王永泽,邵明胜,等.树脂对沼气发酵的影响[J].可再生能源,2010,28(1):63-65.