

江苏省沼气工程调研及工艺分析

吴佳军¹, 张少鹏¹, 韩瑞萍¹, 周俊^{2,3}, 王昌松¹

(1. 南京工业大学 材料化学工程国家重点实验室, 南京 210009; 2. 南京工业大学 生物与制药工程学院, 南京 211816; 3. 南京工业大学 生物能源研究所, 南京 211816)

摘要: 文章对江苏省 32 家沼气工程进行了实地考察。调研中发现, 江苏省沼气工程主要以畜禽粪便为原料; 发酵温度主要为常温发酵; 发酵装置工艺主要以完全混合式厌氧反应器 (CSTR) 为主; 常采用机械搅拌; 受到工程规模的影响, 沼气利用方式存在差异, 中小型的燃烧, 大型的发电; 对于沼液、沼渣处理, 大多直接还田或用于附近的林园。江苏省的养殖业形式和规模决定了沼气工程在很长一段时间以中小型为主, 不适合直接引入国外先进的面向大型沼气工程的工艺, 必须开发适合江苏省特色的中小规模的沼气工程工艺, 将目前普遍采用的常温发酵改为中温发酵是可行的突破口之一。

关键词: 沼气工程; 工艺; 调研; 江苏

中图分类号: S216.4 文献标志码: B 文章编号: 1000-1166(2017)02-0104-06

A Survey on Biogas Project in Jiangsu and the Technology Analysis / WU Jia-jun¹, ZHANG Shao-peng¹, HAN Rui-ping¹, ZHOU Jun^{2,3}, WANG Chang-song¹ / (1. State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. College of Biotechnology and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 3. Bioenergy Research Institute, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: An on site survey for 32 biogas projects in Jiangsu province was made in this paper. It was found that the biogas projects in Jiangsu province mainly use livestock manure as substrate, ambient temperature ($< 25^{\circ}\text{C}$), CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor) process with mechanical agitation. The way of biogas utilization depended on the project scale. For the small or medium scale projects, the biogas was mainly used for combustion, and for large scale projects, it was mainly used for power generation. Most of the slurries and residues were used as fertilizer. With the limitation of the breeding size and structure, the small or medium scale biogas project will still be in majority for a long time. Therefore, the advanced foreign technologies for large scale biogas project are not suitable at present, and so the characterized technologies for Jiangsu project need to be developed or optimized. One of the possible breakthrough could be mesophilic digestion instead of ambient digestion.

Key words: biogas plant; process; survey; Jiangsu province

沼气技术可以将低劣生物质通过厌氧消化过程产生沼气和有机肥, 是废弃生物质资源化利用的最优方式, 它关系到我国能源结构的改善、保护环境和资源的循环利用, 是我国未来可持续发展的重要的综合性基础产业^[1]。

我国低劣生物质 (秸秆、粪便、垃圾) 世界排放第一^[2], 而江苏省是种植业和养殖业大省, 种植业和畜禽养殖业在给江苏省带来巨大收益的同时污染也日益严重。种植业污染以秸秆为主, 据统计, 江苏

全年秸秆产量约 3876 万 t^[3]。畜禽业污染以畜禽粪便为主, 据估算, 江苏全省畜禽粪便总量年产量可达 4600 多万 t, 畜禽尿液总量年产量达 2700 多万 t, 粪尿总量年产量 7300 多万 t^[4]。如果不对这些污染物加以处理而任意排放, 将会对环境造成严重的污染, 随之也会给地区经济带来不可估量的损失。

生物质废弃物厌氧消化生产沼气是处理农业、工业废弃物的一种有效手段, 2011 年江苏省将生物质能纳入战略性新兴产业^[13-14], 自此沼气产业得到

收稿日期: 2016-03-03 修回日期: 2016-06-12

项目来源: 国家重点基础研究发展计划 (2013CB733503); 江苏高校优势学科建设工程。

作者简介: 吴佳军 (1993-) 男, 汉族, 安徽省宣城市人, 在读硕士, 研究方向为新能源研究, E-mail: 15852911807@163.com

通信作者: 王昌松, E-mail: wcs@njtech.edu.cn

长足发展。江苏省政府按照环境保护部《“十二五”主要污染物总量减排核算细则》的要求,每年建设完善 1000 家左右的规模化畜禽养殖治污工程^[5],到 2015 年,全省规模化养殖场(小区)全部建设治污设施并稳定达标运行。由于多种条件的局限,虽然治污的目标已经达到,但是江苏省沼气工程依然处于较低的层次。工艺水平低,“三沼”利用率低,运行困难等都是江苏省沼气工程面临的问题。为了扭转这一形势,使沼气工程在减少污染的同时,可以更好的使资源得到循环利用,笔者展开了此次江苏省沼气工程的抽样调研。

1 调研方法

笔者调研采用了典型抽样^[6]的方法于 2015 年

11~12 月,对江苏省的 32 家沼气工程进行了调研。调查人员采取与沼气工程业主或者管理人员面对面交谈并填写调查问卷的方式来了解江苏省 32 家沼气的运行情况。调查的数据统计如表 1 所示。

2 调查结果与分析

2.1 沼气工程总体情况

此次调研选取了江苏省南京市 9 处沼气工程,盐城市 8 处沼气工程,南通市 7 处沼气工程,镇江市 5 处沼气工程,常州市 2 处沼气工程,苏州张家港 1 处沼气工程,总共 32 家沼气工程。其中大型沼气工程 12 处,中型沼气工程 15 处,小型沼气工程 5 处,调研基本情况见表 1。

表 1 江苏省沼气工程抽样调查基本情况

序号	地点	投产时间	规模情况	原料类型	工艺情况	运行情况
1	南京市	2010 年	中型	猪粪	CSTR 发酵装置,常温发酵	停止
2	南京市	2013 年	中型	牛粪	CSTR 发酵装置,常温发酵	运行中
3	南京市	2013 年	中型	猪粪	CSTR 发酵装置,常温发酵	运行中
4	南京市	2013 年	中型	猪粪	CSTR 发酵装置,常温发酵	停止
5	南京市	2013 年	中型	猪粪和秸秆	CSTR 发酵装置,常温发酵	停止
6	南京市	2013 年	中型沼气工程	猪粪	CSTR 发酵装置,常温发酵	运行中
7	南京市	2013 年	中型沼气工程	猪粪	CSTR 发酵装置,常温发酵	运行中
8	南京市	2013 年	中型沼气工程	秸秆和牛粪	CSTR 发酵装置,常温发酵	运行中
9	南京市	2009 年(一期) 2013 年(二期)	大型沼气工程 大型沼气工程	猪粪 猪粪	CSTR 发酵罐,常温发酵 CSTR 发酵罐,常温发酵	运行中 运行中
10	镇江丹徒区	2014 年	中型沼气工程	猪粪	CSTR 发酵罐,常温发酵	运行中
11	镇江丹徒区	2014 年	中型沼气工程	屠宰污水和猪粪	CSTR 发酵罐,常温发酵	运行中
12	镇江市	2011 年	大型沼气工程	猪粪	CSTR 发酵罐和盖泄湖并用二次发酵,常温发酵	运行中
13	镇江市	—	大型沼气工程	酒精废水	CSTR 发酵罐,高温发酵	运行中
14	镇江扬中市	2012 年	中型沼气工程	猪粪	CSTR 发酵罐,常温发酵	运行中
15	常州金坛市	2008 年	小型沼气工程	秸秆	CSTR 发酵罐,常温发酵	运行中
16	常州金坛市	2009 年	大型沼气工程	猪粪	CSTR 发酵罐,常温发酵	运行中
17	盐城市	2013 年	小型沼气工程	鸡粪	地下发酵池,常温发酵	运行困难
18	盐城市	2014 年	小型沼气工程	鸡粪	地下发酵池,常温发酵	运行困难
19	盐城市	2014	小型沼气工程	猪粪,牛粪,鸡粪	地下发酵池,常温发酵	运行困难
20	盐城市	2014 年	大型沼气工程	猪粪	CSTR 发酵罐和盖泄湖并用二次发酵,常温发酵	运行中
21	盐城市	2014 年	中型沼气工程	猪粪	地下发酵池,常温发酵	停止
22	盐城市	2014 年	中型沼气工程	猪粪	地下发酵池,常温发酵	运行困难
23	盐城市	2014 年	中型沼气工程	猪粪	地下发酵池,常温发酵	停止
24	盐城市	—	大型沼气工程	猪粪	CSTR 发酵罐,中温发酵	运行中
25	南通市	2012 年	中型沼气工程	牛粪	CSTR 发酵罐,常温发酵	运行中
26	南通市	2013 年	大型沼气工程	猪粪	CSTR 发酵罐,常温发酵	运行中
27	南通市	2014 年	大型沼气工程	猪粪	CSTR 发酵罐和盖泄湖并用二次发酵,常温发酵	运行中
28	南通市	2012 年	大型沼气工程	猪粪	CSTR 发酵罐和盖泄湖并用二次发酵,常温发酵	运行中
29	南通市	2011 年	大型沼气工程	猪粪	CSTR 发酵罐,常温发酵	运行中
30	南通通州区	2011 年	大型沼气工程	猪粪	CSTR 发酵罐和盖泄湖并用二次发酵,常温发酵	运行中
31	南通海安县	2013 年	小型沼气工程	鸡粪	地下发酵池,常温发酵	运行中
32	苏州张家港	—	大型沼气工程	鸡粪	CSTR 发酵罐,常温发酵	运行中

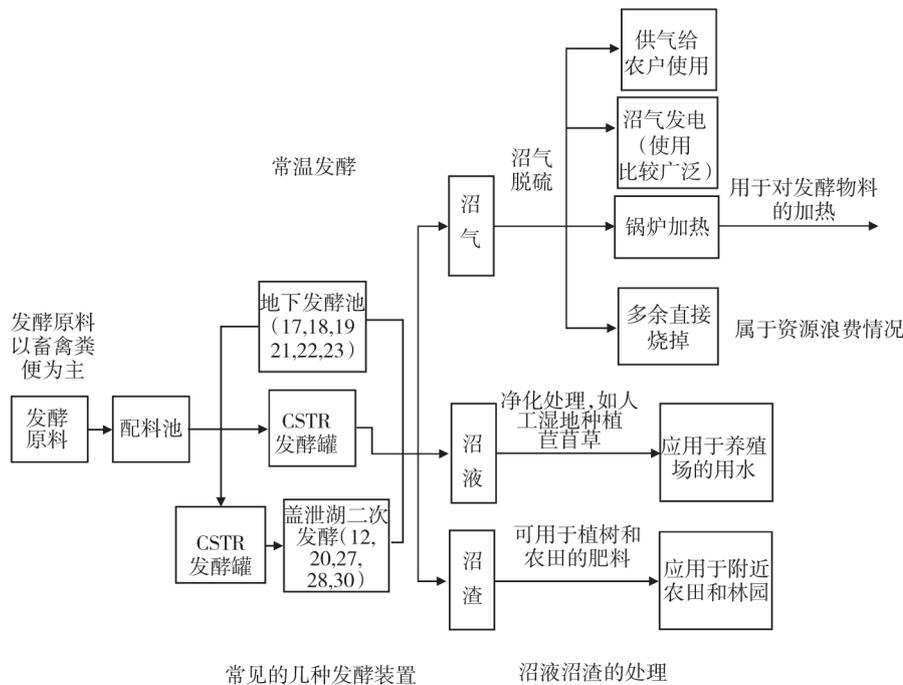


图1 江苏省沼气工程运行流程图

如图1所示是调研的江苏省32家沼气工程的总体运行流程图。从图中可以看出,多种低劣生物质原料经配料池后进入不同的发酵装置中,经过常温发酵后产生沼气、沼液和沼渣,其中数字为表1中相应沼气工程的编号。下面将从工程的工艺情况,发酵原料和“三沼”的利用情况来具体分析江苏省沼气工程。

2.2 工程工艺情况

2.2.1 发酵装置工艺类型

调研中发现,江苏省沼气工程发酵装置类型主要采用的是完全混合式厌氧消化反应器(CSTR),约占调研沼气工程数量的81.2%;但对于规模小于300 m³的小型沼气工程,常采用地下发酵池水压式沼气池的装置进行发酵;而对于一些存栏量超万头的大型养殖场,则采用盖泻湖和CSTR混合的二次发酵模式。表2为对江苏省常见的3种沼气工程发酵装置类型的运行情况对比。

表2 沼气工程发酵装置类型对比

发酵工艺	优点	缺点
CSTR	产气效率高、安全、占地少	造价较高、能耗稍高、操作复杂。
盖泻湖	操作简单、耗能低、造价低	占地广、危险性大、无搅拌、产气效率低、排渣困难。
地下发酵池	操作简单	产气效率低、排渣困难。

2.2.2 发酵温度

现有的沼气发酵工程根据发酵温度的不同分为是常温发酵、中温发酵和高温发酵,江苏省主要采用常温发酵,占此次调研沼气工程的93%。以下是对江苏省几家运行较好的沼气工程的介绍。

江苏南京市友联村秸秆沼气集中供气工程采用常温发酵工艺,发酵装置采用CSTR工艺,以秸秆和新鲜牛粪作为发酵原料。年处理农作物秸秆720 t,年产沼气21.9万 m³,沼气经过脱硫等处理后输送

至附近农户作为燃料使用,每年只有10个月的供气时间,1月和2月会因为天气原因,停止供气;沼液、沼渣作为有机肥,年产优质沼肥360 t,沼肥主要用于附近农田的灌溉。

调研中江苏运行最好的中温发酵沼气工程就是中粮肉食(江苏)金东台农场,该项目是目前全国最大猪粪中温发酵沼气发电工程(发酵罐4座,总容积4×5000 m³),采用热电联产工艺,有中央控制室,有热量综合利用系统,发电余热加温发酵物料。

沼气工程运行每天大约可处理污粪 1200 t · d⁻¹，沼气工程的容积产气率可达 1.0 ~ 1.3 m³ · m⁻³ · d⁻¹，以国家补贴 0.65 元每度电计，每年发电收入约为 800 万元，同时沼渣沼液用于盐土改良、高效农业和树木灌溉。

江苏镇江长兴酒精厂采用高温发酵工艺，以木薯为原料，经过蒸煮发酵后，所产生的污水 COD 达到 30000 mg · L⁻¹，温度在 60℃ ~ 70℃，进入发酵罐

进行高温发酵，污水处理量达到 3000 ~ 3600 t · d⁻¹，容积产气率达到 2 ~ 3 m³ · m⁻³ · d⁻¹，发酵后沼液经过凉水塔冷却到 40℃ 左右，进入中温厌氧发酵罐发酵，然后沼液经过固液分离后，固体作为饲料添加剂外销，液体进入曝气池，经过好氧处理后，污水中 COD 下降到 500 mg · L⁻¹ 以下，排入市政工程管网。过程中产生的沼气，进入锅炉燃烧，产生的蒸汽用于酒精工业生产。表 3 为各发酵温度的优缺点对比。

表 3 沼气工程发酵温度的优缺点比较

发酵温度	沼气工程产气情况	投资及应用情况
常温发酵 21℃ ± 9℃	产沼气不稳定，受季节影响大；停留时间长	投资少，耗能小，系统简单，江苏沼气工程广泛采用。
中温发酵 35℃ ± 3℃	产沼气稳定，停留时间一般 20 天	投资高，耗能高，需要保温和供热系统，江苏应用较少。
高温发酵 55℃ ± 3℃	产沼气稳定，且产气率高，停留时间一般 10 天，有效杀死细菌和虫卵	投资高，耗能高，需要保温和供热系统，江苏应用较少。多应用于本身温度较高的发酵原料。

维持沼气发酵装置中适宜的温度主要有两种手段，一是向发酵装置物料中补充热量，二是对发酵装置的保温措施。江苏省部分沼气工程采用内部盘管加热的方式对发酵原料进行加热，但由于效果欠佳，使用率很低，所以普遍还是采用常温发酵的形式。对于不同的发酵方式保温措施和效果也不同。CSTR 发酵罐使用聚苯乙烯保温材料进行保温，保温效果较好。地下发酵池和盖泄湖是利用土壤的保温，保温措施效果一般。

2.2.3 搅拌方式

在沼气工程发酵装置进行混合搅拌可以提高发酵装置内物料的传质、传热效率，促进发酵原料和微生物接触，维持发酵装置内物料和温度均匀，提高沼

气的产生速率。沼气工程中主要运用机械搅拌、气体搅拌、水力搅拌等 3 种搅拌方式。不同的搅拌方式的混合效果不同，且不同搅拌方式也有各自不同的优缺点。本次调研发现，虽然部分沼气工程由于能耗等原因并不采用搅拌，但相对于其它两种搅拌方式而言江苏省沼气工程运用的搅拌方式主要还是机械搅拌，约占此次调研采用搅拌沼气工程数量的 72%，使用水力搅拌和气体搅拌的沼气工程占少数。调研的 32 家沼气工程中，南京市友联村沼气集中供气站运用水力搅拌的方式，但是由于发酵罐外的水力泵被腐蚀而无法使用。镇江市康乐农牧有限公司采用沼回流的气体搅拌，这样一方面可以促进发酵罐中原料混合均匀，另一方面可以为发酵罐提供热量。

表 4 沼气工程搅拌方式对比

搅拌方式	优缺点	江苏省调研情况
气体搅拌	构造简单，施工维修简便，机械磨损小，运行费用低 ^[7] ；但是要求技术和设备费用高，对于高粘度物料搅拌效果不好，容易形成滞留区 ^[8] 。	镇江市康乐农牧有限公司
机械搅拌	混合物料效果好，适合高粘度的发酵物料，搅拌形式多样，但能耗高。	江苏省金东台农场
水力搅拌	能耗小，维护管理方便简单 ^[7] ；但容易出现搅拌死角；对泵的要求高。	南京市友联村沼气集中供应站

2.3 发酵原料

江苏省沼气工程主要是以畜禽养殖场为依托，发酵的原料以畜禽粪便为主，猪粪、牛粪和鸡粪等在调研中较为常见，占调研沼气工程的 85%；而秸秆由于收集困难，难于将其粉碎和一些发酵技术上的问题，尽管农委有明确专项用于支持秸秆沼气工程，但调研发现江苏省现有的沼气工程中以秸秆为原料发酵在 32 家沼气工程中仅仅只有 2 家，如常州市汀湘村秸秆沼气集中供气工程和南京友联村沼气集中

供气工程的原料都是以牛粪和秸秆的混合物料。

餐厨垃圾由于分类难度大，预处理技术不成熟，气味重等问题，江苏地区很少出现这类大规模的处理工程，且属于市政工程。调研中发现 1 家以餐厨垃圾为原料的沼气工程，但是并未运行，此处也并未列出。

对于以处理污水为目的，以污水为原料的沼气工程也占少数。此类工程原料一般是工厂的加工生产过程中产生的废水或者是屠宰场产生的废水，如

镇江长兴酒精厂和镇江丹徒益康屠宰加工有限公司。

2.4 “三沼”的利用情况

2.4.1 沼气的利用

调研中发现江苏省沼气工程产生的沼气用途大致可以分为4种情况:1) 沼气工程作为沼气供应站,产生的沼气提供给当地农户使用;2) 一些大型沼气工程产生的沼气发电并网,或者仅供畜禽养殖场自用;3) 对于一些小型的沼气工程,产生的沼气体量少,就直接用于家庭的烧水、做饭,应用比较局限;4) 在一些小型沼气工程中,由于没有沼气储存装置,一般在夏天,多余的沼气就直接露空烧掉。

如图2所示,在调研的工程内,20座沼气工程所产沼气以发电或作为热源使用,占到62.5%。但调研也发现,江苏省沼气工程产生的沼气效率普遍不高,受环境影响较大,且沼气工程规模都是以中小型为主,少数沼气工程沼气的利用方式只能局限于家用,甚至一些沼气工程由于产气效率低而无法运行,而对于一些大、中型沼气工程产生的沼气主要用于发电。但是发电产生的余热都没有充分利用。

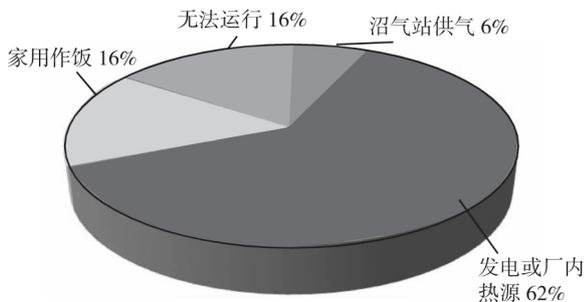


图2 江苏省沼气利用情况

为了将沼气更效率的利用,江苏省关于生物天然气项目已经立项。2015年大丰市申丰奶牛场畜禽粪污无害化处理及规模化生物天然气试点项目获批。项目建成后,可处理25000头奶牛的粪污及农作物废弃物,混合发酵生产清洁能源,减少奶牛场环境污染,减排温室气体。沼气经脱水脱硫净化加压后得到 $12000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的天然气,所有天然气并入天然气网出售。

2.4.2 沼液和沼渣的利用

沼气工程在产生沼气的同时也伴随着沼液沼渣的排放,在调研中笔者发现,江苏省沼气工程对沼液、沼渣的固液分离处理应用很少。大多数处理方法是沼液、沼渣直接还田或者用于林园植树。沼液对于提高土壤中有机质的含量具有一定的促进作用,

使土壤具有保肥力和缓冲性,能使土壤变得疏松。合理的使用沼液用于灌溉可以很好地提高土壤质量。但沼气工程产生大量的沼液、沼渣,长期大量的沼液灌溉使得土壤的有机污染物及重金属含量超过了土壤的吸持能力和作物的吸收能力,反而会引起土壤污染。所以沼液的利用要适量,要懂得因地制宜,因物制宜,谢晶^[9]等在对沼液给番茄的不同施肥条件做了效益分析,得出了对番茄喷施效果最好的沼液的最佳浓度量,在实际生产中沼液可以部分代替化肥,在促进番茄果实的同时,也为无公害蔬菜的生产提供了有效途径。

笔者在调研中发现,少数大型的沼气工程对沼液沼渣的处理方式较为完善,采用了人工湿地来处理沼气工程中排放出来的沼液沼渣。净化池中种植了菖草,这种植被可以有效的吸收沼液中的N、P元素。经过净化处理的沼液就可以用于畜禽养殖场的日常用水。这样既解决了沼液、沼渣的处理问题,水资源也得到了循环使用。

调研中还发现一种对沼液、沼渣处理而形成的“猪-沼液-蚯蚓-稻米”循环模式:沼气工程产生的沼液流入田间沼液缓冲池中,用于400~500亩的稻米灌溉,沼渣供给养殖家庭农场,用于蚯蚓和泥鳅养殖,蚯蚓粪便用于稻米肥料。此外沼液也可用于附近鱼塘的养殖,经管理人员介绍,沼液对鱼塘的养殖效果很好。

2.5 讨论

2.5.1 先进沼气工程介绍

德国和瑞典是欧洲沼气工程发展最为迅速的国家之一,也是沼气工程数量最多的国家之一。他们按照自己的国情需要发展了各自的沼气工程工艺。

德国的沼气工程主要以能源作物和畜禽粪便为原料;发酵的温度根据发酵原料TS含量的高低选择中温或者高温发酵,发酵效率高,受环境的影响小;沼气工程所产沼气主要用于发电或供热;区域性的土地资源基本能消纳所在地的沼气工程产生的沼液、沼渣^[10]。

瑞典沼气工程原料主要是餐厨垃圾和市政污泥,以农业废弃物为原料的沼气工程较少;使用中、高温发酵工艺,原料经过预热工序进入保温良好的发酵罐,且沼液余热经过回收用于加热冷物料,能量利用率高^[11];所产沼气用于区域供暖、发电及提纯制生物甲烷供车用燃气,沼气利用率高。

2.5.2 江苏省沼气工程与先进工程的对比

从表 5 可以看出,江苏省的沼气工程与国外相比,本质上的差异在于建设的目标和沼气工程规模,导致相应的工艺不同,对沼气、沼液和沼渣的利用要求方式和也不同。

表 5 江苏省与国外先进沼气的比较

地 区	德国和瑞典	江苏省
规模	1000 m ³ 甚至 5000 m ³ 以上	中小型为主 50 ~ 300 m ³ , 少数达到 1000 m ³ , 5000 m ³
建设目标	新能源开发利用	治污
原料	多样 稳定	单一 不稳定
发酵罐	多为 CSTR	CSTR 地下发酵池盖泻湖
发酵温度	中温高温	常温
搅拌	机械与水力搅拌	机械 水力搅拌(不常用)
容积产气率	大于 1.5 m ³ · m ⁻³ · d ⁻¹	平均小于 0.5 m ³ · m ⁻³ · d ⁻¹ , 冬天 2 月不产气
沼液沼渣利用	规范	不规范
沼气利用	发电,生物甲烷(发电余热利用)	大中型工程发电(发电余热浪费)

2.5.3 江苏省沼气工程出路探讨

江苏的沼气工程与先进水平存在很大的差距,这主要还是由国情所决定。江苏省的养殖业形式和规模决定了沼气工程在很长一段时间以中小型为主,这就使得直接引入国外先进的面向大型沼气的工艺水土不服。因此必须推广适合中小规模的沼气工程工艺,如中温发酵工艺,可以有效提高沼气产气率,提高 COD 的降解率。

笔者所在课题组之前的研究发现,若能使得江苏的沼气工程由现有的常温发酵改为中温发酵,利用撬装式 LNG (Liquefied Natural Gas, 液化天然气) 液化车收集各中小型沼气的沼气,经过分离提纯转化为 LNG 运送至液化生物甲烷加气站的模式,在经济性上是可行的^[12]。这种模式可促进江苏的沼气工程升级,实现新能源与环境治理的双赢。

3 结论

江苏省沼气工程主要以畜禽粪便为原料;沼气工程工艺层次低,发酵温度以常温发酵为主;发酵装置工艺主要以完全混合式厌氧反应器(CSTR)为主;搅拌方式常采用机械搅拌;受到工程规模的影响,沼气利用方式存在差异,中小型的燃烧,大型的发电,普遍利用效率较低;对于沼液、沼渣处理,大多直接还田或用于附近的林园,且利用方式不规范。

江苏省沼气工程主要以畜禽养殖场为依托,规模以中小型为主,不适合直接引入国外先进大型沼气工程工艺技术,必须开发适合江苏省特色的中小规模的沼气工程工艺。将目前普遍采用的常温发酵改为中温发酵是可行的突破口之一。

参考文献:

- [1] 顾树华. 沼气工程产业化发展的正确途径[J]. 太阳能, 2007(2): 59-61.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2013 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [3] 金筱杰, 瞿伟, 陈静文, 等. 江苏农作物秸秆资源高效利用收储运系统的运营模式·存在问题及发展对策[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(8): 2487-2489.
- [4] 张绪美, 董元华, 王辉, 等. 江苏省畜禽粪便污染现状与防治对策[J]. 土壤, 2007, 39(5): 708-712.
- [5] 农业部科技教育司. 中国农村能源年鉴 2009-2013 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [6] 唐雪梦, 陈理, 董仁杰, 等. 北京市大中型沼气工程调研分析与建议[J]. 农机化研究, 2012, 34(3): 206-211.
- [7] 刘刘, 王智勇, 孔垂雪, 等. 沼气发酵过程混合搅拌研究进展[J]. 中国沼气, 2009, 27(3): 26-30.
- [8] 何群彪. 污泥两相厌氧消化及消化池沼气射流搅拌技术的研究[D]. 上海: 同济大学, 1996.
- [9] 谢晶, 陈理, 庞昌乐, 等. 山东省沼气工程发展调研报告[J]. 中国沼气, 2012, 30(4): 41-44.
- [10] 颜丽, 邓良伟, 任颜笑. 聚焦中德沼气产业发展现状[J]. 农业工程技术·新能源产业, 2007(4): 39-43.
- [11] 花镜, 滕子言, 陆小华, 等. 沼液余热回收对高温发酵沼气工程净产气率的影响[J]. 化工学报, 2014, 65(5): 1888-1892.
- [12] 韩瑞萍, 尚伟, 张少鹏, 等. 中小型沼气工程分散沼气源集中利用模式探讨[J]. 中国沼气, 2015, 33(4): 62-65.
- [13] 李景明, 薛梅. 中国生物质能利用现状与发展前景[J]. 农业科技管理, 2010, 29(2): 1-4.
- [14] 吴创之, 刘华财, 阴秀丽. 生物质气化技术发展分析[J]. 燃料化学学报, 2013, 41(7): 798-804.