

规模畜禽养殖污染治理与资源利用技术集成研究与示范^{*}

黄振侠¹, 陈鹏宇², 万里平³

(1. 江西省农村能源管理站, 江西 南昌 330046; 2. 江西晨明实业公司, 江西 南昌 330046; 3. 江西正合环保工程公司, 江西 南昌 330046)

摘要: 为促进农业废弃物资源化利用和农业循环可持续发展, 文章针对江西省规模化养殖相对集中区域, 以区域性农业废弃物无害化处理和资源化利用规模集中供气沼气工程为节点, 在新余市罗坊镇、彭泽马当镇等地示范“以‘集中处理-厌氧发酵-生物燃气/发电并网’为核心的第三方模式”, 构建“种养业-清洁能源-生态环境”的“3D”循环农业模式。

关键词: 规模养殖; 粪污资源; 规模供气沼气; “3D”区域循环

中图分类号: S954

文献标志码: A

文章编号: 1672-3872 (2017) 08-0170-04

1 技术背景分析

1.1 江西省规模养殖现状分析

1) 江西是生猪养殖大省, 规模化养殖的占较高。据江西省生猪养殖重点县养殖规模统计(2013年)数据分析: 江西28个生猪养殖重点县年末生猪出栏数为2076.6万头、存栏数为1911.6万头, 年出栏500头以上的规模养殖占比很高, 全省有规模化养猪场8662户, 占全省生猪养殖规模比重68%。

2) 江西各地生猪养殖分布整体相对均匀。分析全省各设市生猪养殖数据(见表1), 人均生猪出栏数超过全省平均水平(0.73头/人)的有7个, 其中宜春市人均生猪出栏数最高(1.21头/人), 比全省平均水平高出0.48头/人, 是景德镇市的3.3倍; 单位土地面积生猪出栏数超过全省平均数(199头/km²)的设区市有5个, 其中南昌最高(484头/km²), 是景德镇市的4.4倍。

表1 江西11个地市单位生猪出栏数据分析(2014年)

地区	年末出栏数 (头)	人均生猪出栏数 (头/人)	单位土地面积生猪 出栏数(头/km ²)
南 昌	3586330	0.69	484
景德镇	583943	0.36	111
萍 乡	1541394	0.82	405
九 江	2216371	0.46	118
新 余	929040	0.80	294
鹰 潭	1361488	1.19	383
赣 州	6424342	0.76	163
吉 安	4090931	0.84	162
宜 春	6650284	1.21	356
抚 州	2903476	0.73	154
上 饶	2968009	0.44	130
全省平均水平		0.73	199

分析结论: 江西各设区市生猪养殖分布相对均匀的特点, 对养殖粪污处理模式具备了广阔的可复制空间和潜力巨大的推广价值。

3) 养殖污染形势仍较为严峻, 粪污消纳压力日趋增大^[1]。根据南方地区8省畜禽粪污统计数据分析(2013年)分析(见表2), 2013年, 南方地区可收集的养殖粪便总量约为33044.9万t, 其中又以生猪养殖粪便为主(约18285.9万t), 占比约为55.34%。

基金项目: 省科技计划项目(20122BBF60092)

作者简介: 黄振侠(1968-), 男, 江西南昌人, 高级农艺师, 研究方向: 农村能源、生态农业。

表2 南方地区8省畜禽粪污统计数据分析(2013年)

地区	猪	禽	牛	羊
饲养(出栏)周期/天	180	90	365	365
一周期排粪量(t/头)	0.72	0.009	7.3	0.55
南方地区年饲养量(万头)	25397.2	356611.8	2717.6	2416.6
粪便收集系数	1.00	0.60	0.60	0.60
粪便可收集量(万t)	18285.9	1925.7	11902.9	930.4
合计(万t)	33044.9			

1.2 规模养殖场沼气工程分析

据统计, 到2012年底, 全省共建设沼气工程5732处, 总池容101万m³, 其中大型沼气工程494处、中型沼气工程608处、小型沼气工程4630处。根据全省沼气工程运行情况调查统计分析(见图1), 正常使用数量为4126处, 占71.98%; 间歇使用1441处, 占25.14%; 弃用数133处, 占2.32%; 报废32处, 占0.56%。

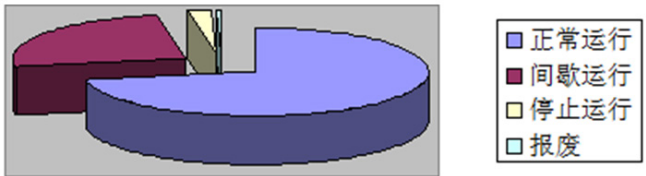


图1 全省沼气工程运行情况调查统计分析(2012年)

分析结论: 目前, 江西省沼气工程运行效益不高, 存在以下问题:

1) 发酵工艺有缺陷, 物料浓度低, 一般仅在1~4%左右运行, 产气效率低; 发酵耗能高, 冬季耗能是自身产生能量的30%以上; 进料和出渣流程性差等。

2) 工程技术有不足, 中小型沼气工程大多采用地下式钢筋混凝土结构, 施工技术要求高, 不确定因素多, 建设质量不稳定。

3) 综合利用效益低, 饲料添加等因素, 一定程度上影响了沼渣作肥料使用范围; 沼液中有有效肥效成份较低, 直接作肥料成本较高, 效果较低, 又不能直接作灌溉用水。

2 模式工艺技术路线

分离式厌氧发酵处理模式研究, 采用“高浓度厌氧处理粪便+低浓度厌氧处理污水”工艺技术模式, 选择高效厌氧发酵器, 将粪便和污水分离处理, 提高养殖粪便处理效果和效率, 提高沼气产气率。

工程模块化设计研究, 针对不同的养殖规模、不同的养殖种类、不同的饲养方式和粪污特点, 进行沼气工程的模块

化设计,以及发酵装置和配套设备的标准化和非标设备的工厂化生产,提高并稳定工程的质量和建设水平。

综合利用技术验证研究,基于新工艺模式下,高浓度原料发酵后的沼渣、沼液的组分结构和肥效测定,施用技术和方式研究试验,施用效果试验。

3 模式工艺技术集成研究

3.1 工厂化沼气集中供气工程建设模式示范

1) 技术工艺集成。针对江西省规模养殖场特点,采用“高浓度厌氧处理粪便+低浓度厌氧处理污水”分离式厌氧发酵处理工艺技术模式,集成先进的发酵技术和控制技术,进行沼气的模块化设计:发酵原料前处理模块、沼气厌氧发酵模块、发酵加热模块、发酵搅拌模块、电气控制模块、在线检测模块等六大模块,和沼气贮存及输气管网系统和沼液渣消纳系统等两大系统,实现了全程机械化和电气自动化控制下的连续作业。

2) 示范工程案例。永修县恒丰镇(原恒丰垦殖场)金山村大型集中供气沼气工程,建设10组90m³共900m³HCPF中温发酵罐、2组200m³湿式储气柜、561m²发酵及管理车间、60m²太阳能集热器,制肥设备及全自动化控制设备,按照城镇燃气管网标准,采用双循环管网建设金山村委的鄱湖新村、凤凰新村、金山新村三个村庄751户居民集中输气管网系统,工程已持续稳定运行4年。

3) 发酵装置研发。发酵装置设计。研发了“沼气工程集中供气的卧式发酵装置”,采用卧式发酵模块安装在室内地面的横梁上,气温变化小,保温、增温能耗低;发酵罐采用液体搅拌方式,在发酵罐内安装有射流搅拌器,通过动力泵使得发酵罐内的发酵液循环搅拌并充分混合,从而提高了分解率,且射流搅拌器的检维修基本为零,动力及阀门部分的检维修又不会影响发酵模块的正常运行,大大提高了供气的稳定性和连续性;发酵模块中各个发酵罐通过优化的管道连接,使得每个发酵罐既可独立运行又可并联运行,且单个发酵罐的启动便利,能根据用气情况很好的控制产气量,特别适合集中供气沼气工程(见图2)。



图2 卧式发酵装置

发酵装置试验过程。系统以猪粪为原料进行启动,当发酵系统(TS=6%)稳定产气后,按 $m_{\text{秸秆}}:m_{\text{猪粪}}=1:12$ ($VS_{\text{秸秆}}:VS_{\text{猪粪}}=0.4:1$)的比例进行投料(见表3)。待系统发酵(TS=11%)稳定后,开始记录沼气产量与甲烷含量,同时监测pH、TS、VS、TIC、VFA、NH₄⁺-N等指标。

过程指标检测共设5个监测点:其中进料点、出料点各设一个,即进料点位于水解池;出料点位于储液池进口;其余三个监测分别设在发酵罐(卧式反应器)的前、中、后三个位置,即:“1#”位于进料端、“2#”位于中部、“3#”位于出料端。

试验结果及分析:①发酵系统整体运行。发酵浓度控制在10~12%和发酵温度在33~35℃的条件下,发酵系统较为稳定,其日产沼气产量基本处于200~231m³/d,甲烷含量为55~65%;②发酵指标分析。发酵罐(卧式反应器)过程指标(1#、2#、3#)监测数据显示:三个监测点的VFA/TIC

表3 启动阶段运行方案

序号	项目	进料量	实验周期
1	试水试压		
2	“接种物+猪粪”的试行		
3	低浓度进料(TS<6%)	0.6t	待产气稳定后
4	6%浓度混合物料	0.6t	10天
6	8%浓度混合物料	0.6t	10天
9	11%浓度混合物料	0.6t	10天

比值均处于0.4(警戒值)以下;NH₄⁺-N指标也基本维持在3000~5000mg/L;pH维持在7.2~8.0。各监测点的TS、VS显示:整个发酵系统的VS降解率为60.1%,其中发酵罐的VS降解率为48.8%;③发酵试验结论。经过连续多年的监测,在达到设计发酵浓度情况下,该沼气发酵装置实际运行容积产气率平均达到1.62m³/m³·d,较常规沼气发酵装置容积产气率(0.65m³/m³·d)提高了149.23%。该项研究获得了国家实用新型专利(ZL201420556578.0)。

4) 配套设施设备研发。沼气工程前处理用自动格栅除污机研发。针对大中型沼气工程前处理池工序常用格栅除污机存在容易阻塞,人工打捞又脏又费时,使用寿命短及安装困难等问题。研发沼气工程前处理用自动格栅除污机,由机架、驱动装置、铰链式格栅板、除杂物滚刷和输送机总成组成,该装置具有自动拦截并清除杂物、保证下道工序正常运行、结构紧凑、体积小、传动效率高、能耗少、耐腐蚀、不易被缠绕而卡死、捞起杂物过程中不易折断、便于拆卸维修的优点。根据应用效果,本自动格栅除污机较常规固定格栅清污效果提高2倍,节省人工95%。该研究获得了实用新型专利(ZL201420390114.7)。

沼气工程前处理用自动破碎捞草机研发。针对大中型沼气工程进料时稻草、杂物、猪毛、小药瓶、塑料及塑料袋等易造成格栅的网孔堵塞,导致前置工艺的瘫痪,人工来打捞清运又脏又费时等问题。研发了沼气工程前处理用自动格栅除污机,由机架、驱动装置、铰链式格栅板、除杂物滚刷和输送机总成组成,该装置具有主动对各种杂物(如牛粪中混入的长稻草、结团硬块、猪毛等)进行清除、捣碎、捞起、输送等综合功能,具有结构紧凑、体积小、传动效率高、能耗少、耐腐蚀、不易被缠绕而卡死、捞起杂物过程中不易折断、便于拆卸维修的优特点。该项研究获得了实用新型专利(ZL2014200390113.2)。

3.2 “3D”区域沼气生态循环农业模式试点示范

1) 试点示范工程概况:2013年,在新余市罗坊镇院前村建设江西首个大型集中供气沼气工程项目,建成“3D”区域沼气生态循环农业模式示范基地。该项目建设一级CSTR厌氧发酵罐3座,有效容积6900m³,二级一体化CSTR发酵罐1座,有效容积1700m³,单座储气膜容积1080m³,高压沼气储气柜6座,储气总容积3840m³;固肥加工生产线一条;按城市燃气管网标准,建设沼气供户管网系统,向罗坊集镇供气6000户;一期工程于2014年12月建成试运行,二期工程于2015年12月建成试运行,日产沼气能力7000m³,年处理有机废弃物约22390t。

2) 模式工艺技术集成。原料收集和预处理单元。在规模养殖场统一建设粪便收集平台,基地定期将畜禽粪便运回,去除杂质进入匀浆池;死亡禽畜由冷库暂存,基地定期将死亡畜禽运回,经过破碎和高温蒸煮消毒处理后进入匀浆池混合调配;水稻收割时秸秆由收割机直接打捆运回堆储,秸秆

经过破碎后，先进入水解酸化池酸化后进入匀浆池。

沼气发酵生产单元。经过预处理后的物料预混后，通过螺杆泵输送至一级 CSTR 反应器；反应器内使用立式搅拌器进行搅拌，保证物料浓度和温度的均匀；一级 CSTR 出料溢流至二级 CSTR 发酵罐进行二次发酵，延长发酵滞留时间，有效增加沼气产量；设置自动温控沼气热水锅炉供热中心一座，以保证厌氧发酵罐温度相对恒定。

沼气净化及输配单元。发酵罐产生的沼气集中在二级发酵罐顶部的储气膜内，经脱硫和脱水处理后，增压储存于高压储气罐中。然后经调压通过中低压输气管网，输送到居民区，再次调整为常压后，入户供给周边居民做生活用气，剩余沼气供给基地沼气热水锅炉、发电上网及供基地病死猪处理和有机肥生产用电。

沼液沼渣加工利用单元。发酵后的料液经固液分离后，沼渣用于生产固态有机肥；分离后的沼液部分回流用做预处理的稀释水，剩余部分生产液态有机肥（见图 3）。

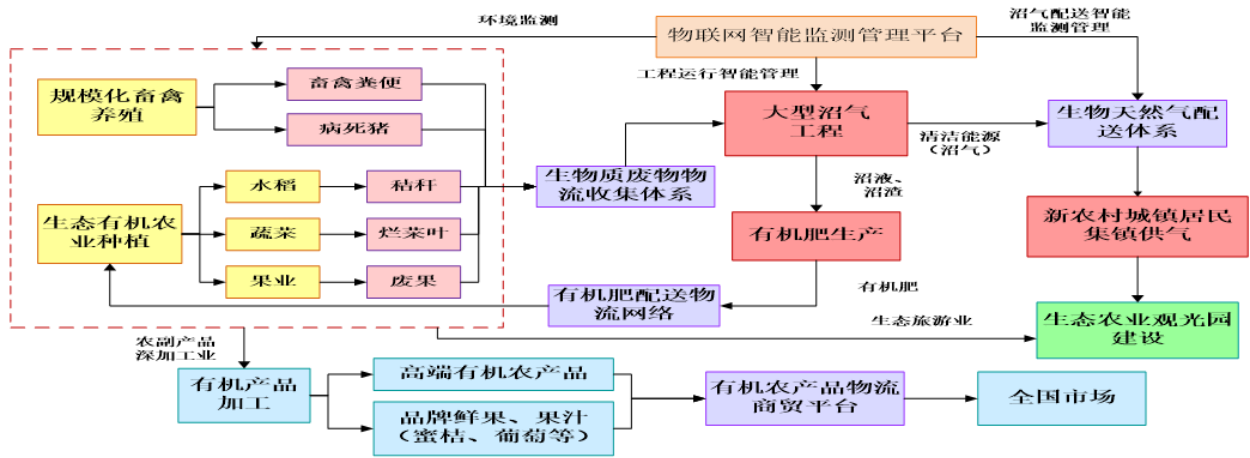


图 3 罗坊镇规模集中供气沼气工程工艺流程图

3) 模式技术试点示范。工程运行的 GPRS+PLC 沼气远程监控。系统对工程设备运行基于网络的点对点、点对多点、多点对多点的远程实时现场监视、远程遥控摄像机以及录像、报警处理等。通过兼容模拟视频设备实现模拟视频系统与数字视频系统的数字化统一管理，操作员可以在室内进行集中管理，可实现车间无人值守。

用气服务的智能化管理。按照“集中供气、用气收费、专人管理”的管理模式，每位沼气农户建立档案，为用户提供开卡充值、维修等业务；为 6000 用户统一安装了智能沼气流量表，先预存费用、后用气；建立沼气服务网点，对用户进行一年四次免费上门巡查服务。

发酵原料的全量化收集。养殖场按协议约定严格控制用水，粪污浓度在 6% 左右，较常规发酵浓度（3 ~ 4%）提高了 40%。基地全量运走集中处理。

4) 试点示范结论：①通过特大型沼气工程这一核心以及纽带集中处理养殖粪污，将农业废弃物转化为生物质能源与有机肥，实现了废弃物资源化、生态农业、生物质燃气等相关产业的耦合，是实现生态循环农业体系建设的重要途径；②通过养殖粪污的第三方集中回收和资源化利用，减少养殖场的粪污消纳和病死猪处理环节，可杜绝污染物不经处理擅自外排的可能，解决污染物的环境污染问题，进而保障周边农牧食品安全。降低企业生猪养殖的整体成本，解决养殖场市场竞争力不足的问题；③通过养殖粪污的第三方集中回收和资源化利用，让粪污处理在该环节形成规模效应，并且在专业化的管理运作下进行资源化综合利用，提升粪污治理的

经济效益，解决传统方式的盈利能力差和不可持续等问题；④通过集镇集中供气，解决农村城镇化过程中，集镇居民对优质、清洁的燃气的迫切需求与天然气管网无法覆盖的矛盾。

3.3 管理系统研究

1) 规模集中供气沼气工程在线监测平台。建设规模集中供气沼气工程远程在线监测平台，包括数据管理单元、物联网数据传输单元、数据采集单元，通过现场传感器（沼气成分分析仪、沼气流量表、沼液浓度及液位计、温度变送器、压力变送器），通过专业沼气工程测控系统 DTU、采用物联网技术、实现对现有规模集中供气沼气的数字化监控。目前，平台已初步建成接入试运行，并将全省 14 处规模集中供气沼气工程接入监测系统。

2) 沼气服务体系建设。针对农村沼气后续服务体系、技术、规范缺失等问题。首创“协会领办”的农村沼气服务技术模式，实现管理制度和服务模式的两大创新，完成了“五个规范”和“六个统一”，解决了“建、管、用、修”四个环节技术

与管理问题，达到了“三个全覆盖”的技术效果，万安县窑头镇鲁下村“协会领办”服务模式入选农业部“农村沼气服务十大模式”。

3.4 综合利用研究

1) 沼肥安全性研究。《规模养殖场沼气工程沼肥安全性研究》，主要内容：①开展运用大小水葫芦和浮萍分别对沼液的原液、稀释 10 倍、稀释 100 倍、自来水四种浓度，沼液磷、氮的吸附作用试验（见表 4）；②沼液对小白菜产量、品质和土壤质量的影响试验。各施肥处理小白菜产量和品质的分析（见表 5）。

表 4 水葫芦净化后污水各理化指标的相关性分析

相关性系数	水葫芦初始重	水葫芦增重	粪水 COD 去除量	氨氮去除量	BOD 去除量
水葫芦初始重	1	0.943**	0.625*	0.032	0.358
水葫芦增重	0.943**	1	0.781*	0.062	0.517
COD 去除量	0.625*	0.781*	1	-0.234	0.203
氨氮去除量	0.032	0.062	-0.234	1	0.581
BOD 去除量	0.358	0.517	0.203	0.581	1

表5 各施肥处理小白菜产量和品质的分析

处理	产量 (g·株)	叶绿素 (mg·kg ⁻¹)	维生素 (mg·kg ⁻¹)	干物质 (%)	硝酸盐 (mg·kg ⁻¹)
对照	25.32±2.13b	3726±120.3a	15.36±1.18c	6.25±0.63a	538.42±28.63b
沼渣	36.15±2.25a	3868±231.1a	47.25±2.14a	4.98±0.25b	808.96±32.65a
沼液	39.23±1.36a	3785±303.8a	51.76±1.25a	6.26±0.12a	789.28±51.25ab
化肥	32.28±2.17ab	3678±245.3a	32.83±3.85b	5.64±0.31ab	852.36±11.89a

2) 沼肥应用研究。《沼肥施用对水生蔬菜品质影响的研究》,主要内容:①不同沼肥处理对水芹产量影响试验结果(见表6);②不同施肥量对水芹菜中营养成分含量的影响(见表7);③不同施肥处理对土壤养分的影响(见表8)。

表6 不同施肥处理对水芹菜生长和产量的影响

实验组	株高 (cm)	小区产量 (kg/小区)	产量 (kg/667m ²)	产量增幅 (%)
100% 沼肥	63.67±4.31	155.06±8.31	5168.67±277.01	2.15
50% 沼肥	66.25±4.28	156.38±11.64	5212.50±388.40	3.02
25% 沼肥	65.67±4.52	168.19±14.27	5609.27±475.77	10.85
化肥	59.33±3.84	151.72±7.92	5059.86±264.13	-

表7 不同施肥量对水芹鲜样中营养成分的含量

实验组	水分 (%)	类胡萝卜素 (mg/g)	Vc (μg/g)	酸度 (mmol/100g)	可溶性糖 (mg/g)	可溶性蛋白 (mg/g)
100% 沼肥	91.73±0.33	0.070±0.008	118.15±16.93	9.26±0.33	9.34±0.16	6.71±0.28
50% 沼肥	91.52±0.70	0.078±0.011	127.91±21.45	8.51±0.47	8.58±0.28	6.32±0.25
25% 沼肥	92.09±0.25	0.072±0.009	136.02±17.37	7.06±0.72	8.54±0.23	6.06±0.19
化肥	92.30±0.54	0.080±0.006	158.18±23.71	5.41±0.46	8.16±0.31	5.56±0.31

表8 沼肥施用后对土壤养分的含量

待测土样	全氮 (g/kg)	全磷 (P ₂ O ₅)	全钾 (K ₂ O) (g/kg)	速效氮 (mg/kg)	速效磷 (P ₂ O ₅)	速效钾 (K ₂ O) (mg/kg)	有机质 (g/kg)
100% 沼肥	3.11±0.17	1.24±0.27	23.89±1.18	230.63±9.48	25.22±2.12	113.83±9.48	40.30±2.41
50% 沼肥	3.08±0.16	1.42±0.12	23.95±0.49	294.82±12.72	39.13±4.36	133.90±6.85	40.63±2.84
25% 沼肥	2.72±0.12	1.15±0.13	24.53±0.84	221.96±8.74	16.86±1.82	137.29±10.81	36.82±3.58
化肥	2.64±0.11	1.07±0.10	23.43±1.56	200.36±8.19	9.74±0.25	155.28±10.36	34.54±2.29
土壤背景	2.63±0.36	1.05±0.12	22.94±0.63	183.00±8.17	9.13±0.46	78.28±2.97	30.17±3.29

3) 试验结论:增产最显著的是沼渣基肥+沼液追施的试验组,50%沼肥和25%沼肥均显著高于化肥组,与化肥相比,分别增产3.02%和10.85%,其次为100%沼肥组,化肥组产量最低。在不同沼肥施用方式下,施肥效果以25%沼肥处理组最佳,有利于提高水芹的产量。不同肥料处理组水芹的品质存在着一定差异,在实际生产中,从水芹营养价值和提高农产品品质的角度综合考虑,以25%沼肥施用量较好。化肥配合沼肥施用对土壤的培肥作用优于化肥,其全氮、全磷和有机质含量增加,特别是速效氮和速效磷含量增加显著,全钾含量变化不显著,速效钾含量有所降低。

4 技术突破和创新

4.1 构建了“3D”区域沼气生态循环农业发展模式

1) 构建“3D模式”沼气生态农业系统。一是区域性的多产业、多工程、多企业。围绕着区域内农业废弃物的资源化利用,培育多个投资、建设、运营“三位一体”的产业实体,建设多个农业废弃物处理沼气工程,联动多个养殖、沼气、

种植“三位一体”的经营实体。二是区域性的全空间、全方位的循环农业。

2) 构建“四轮驱动”运行机制。模式中构建“减量化生产、全量化处置、无害化处理、资源化利用”相结合的“四轮驱动”运行机制。

3) 建立“五化齐驱”发展取向。模式以“科技化、智能化、联盟化、标准化、品牌化”为发展取向,实现“农业产业生态化”向“生态农业产业化”的发展。

4) 实现“多方共赢”的综合效益。模式通过提供环保、民生、生态三大公共产品,实现了政府、企业、群众、社会多方共赢的效益。

4.2 建立了“规模化养殖场粪污集中处理及资源化利用技术模式”

以“集中处理-厌氧发酵-生物燃气/发电并网”为核

心的第三方模式技术特点:①区域养殖粪污全量化处理。采用“三改二分”技术,粪污浓度达到6%以上;②集成实用沼气发酵工艺技术。水稻秸秆的纤维素水解酸化,纤维素由大分子多糖变成小分子单糖,纤维素结构性成分液化,缩短厌氧消化停留时间50%以上,厌氧发酵系统稳定性及负荷更高4~5kgCOD(m³·d);厌氧发酵温度相对恒定35℃。采用低高压结合储气、中低压输气管网,常压入户技术。

4.3 建立“高浓度厌氧处理粪便+低浓度厌氧处理污水+沼气集中供气”

分离式厌氧发酵处理工艺技术模式,采用模块化设计、工厂化生产,工程模块化设计,确保沼气安全、稳定、持续供应。

参考文献:

[1] 石元春. 决胜生物质 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.

(收稿日期: 2017-4-10)