doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.027

沼气工程高效稳定运行技术现状及展望*

李伟¹ 吴树彪¹ Hamidou Bah² 庞昌乐¹ 董仁杰¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 法拉纳高等农牧学院农业推广系, 法拉纳 131)

摘要: 总结分析了沼气工程相关技术现状和技术需求, 并对其未来发展进行了展望。我国的原料收贮和预处理技术亟待升级, 仍需大量的科研投入以研发关键的核心技术装备。实现沼气工程运行情况的有效监测和及时预警, 以及开发合适的微量元素添加剂和功能微生物菌剂对推动我国沼气工程的高效稳定运行具有重要意义。试验并研发新型膜材料和对常规材料的共混与改性处理是提高沼气膜分离提纯能力的主要手段。沼液的资源化利用技术是摆脱沼气工程可持续发展瓶颈的关键。结合沼气工程产业发展需求, 充分论证技术瓶颈, 合理配置科技资源, 加大科技攻关投入, 实现自主化技术研发、标准化工程设计、工厂化装备制造、模块化安装建设以及专业化安装调试等标准化集成, 同时创新沼气工程技术的应用模式能更好地推动沼气工程技术的发展。

关键词: 沼气工程 预处理 监测 微量元素 菌剂 沼液

中图分类号: X71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0187-10

Status Analysis and Development Prospect of Biogas Engineering Technology

Li Wei¹ Wu Shubiao¹ Hamidou Bah² Pang Changle¹ Dong Renjie¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Department of Agricultural Extension, Institute Superior of Agronomy and Veterinary, Faranah 131, Guinea)

Abstract: Current situation of biogas engineering technology was overviewed and its development prospect were analyzed. Generally, with the growing popularity in China, biogas engineering technology has made great progress. The technology for collection, storage and pretreatment of raw materials need urgent upgrading. More and more researches are required to develop key technology and equipment. It is significant for the efficient and stable operation of biogas project to realize effective monitoring and timely warning and develop appropriate trace element additives and functional microbial agents. Testing and development of new membrane materials and blending or modification of conventional materials were the primary means to improve the separation and purification capabilities of bio-methane from biogas. The resourceful utilization of biogas slurry is the key steps for the sustainable development of biogas engineering. Further development of biogas technology claims to realize the standardized integration of independent research and development, standardized engineering design, industrialized production of equipment, modular construction and installation, and professional installation and debugging along with full argumentation of technical bottleneck, rational allocation of resources of science and technology, and increased investment in scientific problem tackling based on the demand of biogas engineering industry development, besides, innovating the application mode of biogas engineering technology is also important and helpful. This paper can provide certain reference for biogas industry practioners and related researchers.

Key words: Biogas engineering Pretreatment Monitoring Trace element Microbial agent Digestate

收稿日期: 2014-11-18 修回日期: 2014-11-28

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD14B03)和北京市科技计划资助项目(D141100001214002)

作者简介: 李伟, 博士生, 主要从事废弃物处理与资源化利用研究, E-mail: tianxingliwei@163.com

通讯作者: 吴树彪, 讲师, 博士, 主要从事生物质能源工程与低碳技术研究, E-mail: wushubiao@cau.edu.cn

引言

在循环农业中,废弃物的资源资源化利用是农业废弃物再生利用循环模式中非常重要的环节。农业废弃物的成分一般比较复杂,处理不当,会造成严重的环境污染。沼气化利用是农业废弃物资源化的一种有效方式,目前在循环农业中占据了相当大的比重。沼气工程是以厌氧发酵为核心的能源环保工程,以污染治理为主要目的,以沼气厌氧发酵为主要技术环节,以有机废物的资源化为效益保障,集环保、能源、资源再用于一体,是废弃物资源化利用为主要途径的系统工程。沼气工程的高效稳定运行需要经济的原料收集贮存技术、合理的原料预处理技术、及时的监测预警技术、高效的运行调控技术、有效的沼气分离提纯技术、规范的沼液处置与利用技术。本文拟从以上几个方面对沼气工程相关技术现状及技术需求进行总结和分析,并展望沼气工程技术的未来发展,以期对沼气行业从业者和相关研究人员提供一定的参考。

1 原料的收贮与预处理技术

农业废弃物具有分散性、季节性等特点,沼气工程的首要任务就是原料的收集贮存。粪便类原料含砂量大,秸秆类原料难降解,在进入沼气发酵罐前需要进行原料预处理。

1.1 原料的收贮技术

粪便类原料的收集通常使用罐车直接运送到沼气工厂,也有部分采用管道输送,其贮存方式一般为堆放或直接进入沉砂池进行除砂预处理。而纤维素类原料收集运输难度较大,主要体现在产地分散,收购价格存在地区差异。纤维素类原料资源丰富,但季节性较强,其贮存方法一般分为干贮存和湿贮存。干贮存较低的水分含量可以阻止微生物的生长,在

干旱地区是十分有效的贮存方法。湿贮存是在纤维素水分含量大于45%时收获并立即保存,贮存过程中的干物质损失较少。湿贮存之后的产品比干贮存条件下的木质纤维素生物质更容易降解,甚至在潮湿的地区也是如此,使得湿贮存兼具贮存和预处理的作用^[1-2],应用前景广阔。目前,我国的原料收贮技术亟待升级,而且缺乏关键的核心技术装备,沼气工程原料的收集与贮存仍需大量研究工作。

1.2 原料的预处理技术

粪便类原料易于降解,但含砂量大,一般用栅格或沉砂池进行分离,但分离效果不如螺旋分离器。纤维素类原料由于木质素的阻碍对厌氧消化存在抗性^[3],采用适当的预处理方法,增大微生物和酶与纤维素的接触面积,可以提高纤维素和半纤维素的生物降解性,改善纤维素原料的厌氧发酵性能^[4]。物理、化学和生物方法都能提高纤维素厌氧发酵效率和产气率,表1总结了不同预处理方法对纤维素类原料沼气发酵效果的影响。

不同预处理方法都能改善纤维素特性、提高原料消化率和增加产气量,但均存在一系列问题,各有局限性。物理预处理的效果与成本投入密切相关,化学处理对设备要求高,并可能造成二次污染,生物预处理周期长,占地大,需要高效的生物菌剂,我国现有技术离规模化的应用还有一定的差距。鉴于纤维素类原料的结构特点,应着眼于工程应用,开展多种预处理方法综合利用的研究,将两种或更多种预处理方法结合起来,弥补单一方法的缺陷。另外,我国现有预处理技术之所以难以实现工程化应用,更主要的原因在于无论哪种预处理都会增加建设和运行费用,加上目前我国沼气工程商业化运作程度低,盈利困难,预处理或多或少都会给沼气工程建设带来经济压力。因此找到有效、便捷、便宜的预处理方法是推动我国纤维素沼气发展的重要内容之一。

表1 预处理对纤维素类原料发酵效果的影响

Tab.1 Effect of pretreatment on anaerobic digestion performance of lignocellulosic materials

方法	处理方式	发酵原料	发酵工艺	发酵效果	文献序号
物理	粉碎	水稻秸秆	批试,37℃	磨碎比切碎总产气量和VS产气率增加17.4%和16.2%	[5]
	蒸汽爆破	玉米秸秆	批试,35℃	VS产气率增加15.1%,滞留时间减少42.1%	[6]
	超声波	玉米秸秆	批试,37℃	VS产气率增加51.1%,产气高峰提前4~10d	[7]
	微波	玉米秸秆	批试,35℃	VS产气率增加20.1%,滞留时间减少31.6%	[6]
化学	稀硫酸	水葫芦	批试,35℃	TS产气率增加6.7%,容积产气率增加6.5%	[8]
	氢氧化钠	花生壳	批试,35℃	总产气量增加48.9%,CH ₄ 体积分数能达到60%	[9]
	氨水	水稻秸秆	批试,35℃	VS产气率增加11.7%,CH ₄ 体积分数能达到70%	[10]
生物	白腐真菌	玉米秸秆	批试,35℃	21d的VS产CH ₄ 量占73.1%,增加29.2%	[11]
	白腐真菌	玉米秸秆	批试,35℃	产气和CH ₄ 产量增加10.5%~19.7%和11.7%~21.2%	[12]
	白腐真菌	水稻秸秆	批试,30℃	总产气量和CH ₄ 产量分别提高了34.7%和46.2%	[13]
联合	微波+氢氧化钠	污泥	半连续,35℃	总CH ₄ 产量增加64%,最大CH ₄ 产生速率增加76%	[14]
	氨化+白腐真菌+木霉菌	小麦秸秆	批试,38℃	总产气量增加23.11%,CH ₄ 体积分数增加6.01%	[15]

2 沼气发酵过程的监测与调控技术

监测发酵情况并实时调控,调节发酵系统中的微量元素含量和添加功能微生物菌剂可以促进发酵效率并提高厌氧发酵过程的稳定性。

2.1 沼气工程的监测预警技术

为实现沼气工程的长期稳定运行,需要实时监测发酵过程中各项指标的波动情况,对运行风险提前预警和对发酵过程及时调控。表2总结了沼气发酵监测控制系统发展现状。

表2 沼气发酵监测控制系统发展现状

Tab.2 Development situation of biogas fermentation monitoring and control system

参数	监测方法	运行效果	文献序号
温湿度、沼气压、力、温度	通过单片机进行多传感器数据采集,采用 nRF905 进行信号远程无线传输,利用经 Visual C++ 设计的上位机系统接收与实时监测	实验室和现场测试结果表明,系统操作简单,运行稳定,能有效实现相关参数的无线监测	[16]
温度、液位、压力、CH ₄	通过 CC2530F256 芯片控制传感器进行信号采集并利用 ZigBee 无线通信技术和 GPRS 技术将数据传送到终端的 PC 监测中心	系统可以在 1 000 m 范围内比较复杂的地形进行应用,而且可以通过一定的协议简化数据的传输量,可以降低误包率	[17]
温度、压力、液位、pH 值	通过传感器和数据采集卡 PCI-6221 将数据信号传输到 PC 终端,在虚拟仪器软件 LabVIEW 开发环境下,完成实时显示和存储	系统满足监控要求,管理人员可实时掌握现场工况,并分析生产数据,使控制和管理相结合,提高控制精度及管理水平	[18]
温度、流量、液位、压力	由 S7-200 PLC 控制传感器进行数据的采集,基于 Intouch 组态软件开发系统进行监测控制和数据存储,并通过 Internet 实现远程监测控制	系统能满足大型沼气池的工艺要求,实现沼气生产过程的自动化监测与控制,达到了高效的产气要求,提升了经济效益	[19]
温度、液位、pH 值、ORP	采用 S7-300 PLC 控制传感器进行数据的采集,采用力控 Forcecontrol 6.1 组态软件搭建上位机监控软件对厌氧发酵环境参数实时监测与控制	系统运行可靠、结构简单、维护容易,较好地满足了工艺提出的控制要求,保证了发酵过程各个阶段良好的发酵环境	[20]

但目前大中型沼气工程中,普遍只有 pH 值、温度、沼气产率、沼气成分等指标的简单监测控制,预警性不足,往往系统已经失稳,上述指标才表现出稍许波动。针对沼气工程监测手段的滞后性,开发实时监测厌氧消化系统中碱度和有机酸变化的自动化沼气工程在线监测预警系统具有重要意义及市场推广价值。优化的 Nordmann 滴定法,可同时测定挥发性脂肪酸(VFA)浓度及碳酸氢盐碱度(TIC),监测发酵液酸碱缓冲能力,提前预警酸败风险^[21],相关研究表明修正的 Nordmann 滴定法测得的 VFA/TIC 对发酵系统酸化的预警比 pH 值及时有效^[22]。基于此滴定法研制的在线监测系统,能够实现滴定过程的实时监测和信息化管理^[23],但该系统尚处于试验研制阶段,其工程化应用还需要进一步的科研投入。

2.2 沼气工程的微量元素调控技术

微量元素对厌氧发酵过程起着重要的调控作用,常作为辅酶、辅基、辅因子的成分出现在厌氧发酵微生物的酶系统中^[24]。李文哲等^[25]认为微量元素对毒性物质具有拮抗作用,缓解了毒性物质对产甲烷菌的限制作用,使反应器内甲烷菌的优势菌种发生变化,提高乙酸利用率。补充微量金属元素是提高厌氧消化过程效率和稳定性的重要途径,但微量元素需直接加入反应器,从而保证甲烷菌的充分

利用。

围绕对产甲烷菌有激活作用的 Fe、Co、Ni 等微量元素在厌氧消化中的作用,国外学者进行了较为深入的研究,并研制了商业化的微量元素添加剂。表3总结了近年来国内外关于微量元素添加对沼气发酵效果影响的研究,添加适量的微量元素能够有效促进有机酸的转化,提高产气效率,使发酵能够在较高负荷下稳定运行。国内对微量元素在厌氧发酵中的重要性认识较晚,其工程应用相对较少,目前也尚未研制出自己的商业化微量元素添加剂。国内沼气工程为保证其高效产气只能从国外购买沼气工程高效添加剂,但进口价格高昂且存在技术配方封锁。因此开发适合中国沼气工程厌氧消化特性的微量元素添加剂对推动我国沼气工程的高效稳定运行具有重要意义。

2.3 沼气工程的微生物菌剂添加技术

厌氧消化过程是一个多种微生物协同参与的生化反应,微生物的群落结构及代谢类型决定有机物的降解途径及产甲烷效率。功能微生物发酵菌剂的投加可以有针对性的、有方向性的引导厌氧反应沿着高效稳定的途径进行。

从表4可以看出添加微生物菌剂能提高有机物降解速率,缩短发酵启动时间,使发酵过程向着有利于甲烷产生的方向进行,提高产气量。然

而,不同菌种对有机物的利用能力不同,如何提高外源微生物对有机物的竞争能力是研究的重点和难点,需要进一步研究添加菌种对特殊环境的适应度、以及功能菌种与发酵罐中原有土著菌种的协同与竞争作用等机理。分析连续投加功

能强化菌体形成的优势菌群与土著菌群的竞争,避免功能微生物流失,不仅可以全面地评估功能微生物对生态系统的影响,且对于群落特征、种群结构、分布格局、群落竞争及互生作用响应的研究尤为重要。

表3 添加微量元素对沼气发酵效果的影响

Tab.3 Effect of trace elements addition on anaerobic digestion performance

发酵原料	发酵工艺	微量元素	发酵效果	文献序号
牛粪	批试,35℃	Fe、Co、Ni	总产气量增加7.5%,促进厌氧污泥的颗粒化	[26]
牛粪	批试,35℃	Fe、Co、Ni	球菌占优势,使反应向着有利于产甲烷的方向进行	[27]
牛粪	批试,20℃	Fe	总产气量增加68%,发酵周期短,pH值、氨态氮稳定	[28]
餐厨垃圾	批试和半连续,36℃	Co、Se	5 g/(L·d)负荷下稳定,有效促进丙酸的转化	[29]
酒糟	半连续,37℃	Fe、Co、Ni	4 g/(L·d)负荷下稳定,CH ₄ 产量460 mL/g	[30]
食品加工废水	批试和半连续,37℃	Fe、Co、Ni	促进有机酸的降解,改善产甲烷菌优势菌群结构	[31]
餐厨垃圾	批试和半连续,37℃	Fe、Co、Ni	促进有机酸转化,提高反应器容积产气率	[32]
餐厨垃圾	半连续,37℃	Fe、Co、Ni、Se、Mo、W	4 g/(L·d)负荷下稳定,CH ₄ 含量和pH值稳定	[33]
餐厨垃圾	半连续,37℃	Fe、Co、Ni、Mo	使有机酸快速转化,6.64 g/(L·d)负荷下稳定运行	[34]

表4 添加微生物菌剂对沼气发酵效果的影响

Tab.4 Effect of microbial agent addition on anaerobic digestion performance

发酵原料	发酵工艺	微生物菌剂	发酵效果	文献序号
水稻秸秆	批试,50℃	WSC-6	降解效率达75%,90%产物是乙酸,其次是少量乙醇、丁酸等	[35]
水稻秸秆	批试和半连续,50℃	FLW-1	较强的遗传稳定性和pH值缓冲能力,产物中90%以上是乙酸	[36]
水稻秸秆	批试,50℃	WSC-6	失重率达48.3%,直接进入对数生长期,提高了稻秆降解速率	[37]
水稻秸秆	半连续,35℃	LZF-12	降解率达76%,乙酸和丁酸是主要产物,占总VFAs的90%	[38]
水稻秸秆	批试,35℃	LZF-12	降解率达74%,产物以乙酸为主,占总VFAs的90%	[39]
水稻秸秆	批试,50℃	MC3F	7 d后稻草的降解率为75.3%	[40]
报纸、硬纸	批试,50℃	MCl	12 d后VS产CH ₄ 量分别增加4倍和3倍	[41]
玉米秸秆	批试,35℃	C14	快速启动,沼气总量和CH ₄ 总量分别提高27.3%和21.5%	[42]
牛粪	批试,30℃	Th3	缩短发酵启动时间2~3 d,增加沼气产气量8.5%~11.5%	[43]
牛粪	批试,36℃	CN6	纤维素降解率比增加6.8%,沼气总产量比对照增加18.4%	[44]

中国尚未有商业化的功能微生物菌剂,国内沼气工程为保证高效产气只能从国外购买,其价格高昂且存在技术封锁,国内沼气工程正处在快速发展阶段,购买量并不能满足国内逐年增长的需求。此外,国外产品对我国环境中长期的影响,残留菌剂的污水回用对土壤、作物、地下水的影响等均未经论证。开发适合中国沼气工程厌氧消化特性的功能微生物菌剂对推动我国沼气工程的高效稳定运行意义重大。

3 沼气高效分离提纯技术

沼气提纯后可用作化工原料、燃料电池和车用燃料,也可用于热电联产或进入天然气管网^[45]。水洗和变压吸附是两种传统的沼气提纯技术,水洗为纯物理吸收过程,有一定量的CH₄损失,适用于低品质沼气的初步提纯;变压吸附对气体来源要求严格,高压/低压变换操作对设备要求较高且能耗较高。

膜分离技术具有低能耗、维修简便、工艺简单、操作方便、产品回收率高等优点,应用前景广泛。然而,综合考虑投资成本、操作成本及维护成本,目前可用于沼气提纯的膜材料成本较高,膜技术用于沼气纯化时,由于分离过程不足而采用多级膜会造成较大的甲烷损失^[46],高分子聚合物膜还存在不耐高温以及在有机溶剂中的溶解和溶胀问题。膜材料是气体进行分离的关键,研发具有良好气体选择性、优良耐热性和化学稳定性以及机械强度高的膜材料已成为世界各国膜分离提纯技术的重点。

除继续研制新型膜材料外,在尽量减小影响膜本身性能的前提下,对现有膜材料进行共混、改性也是提高膜处理能力的有效途径。目前,研究较多的共混膜分离材料主要是有机-无机共混膜材料。有机-无机共混膜材料也可以描述为微观的或纳米级的复合材料分散在聚合物基质中。从表5可以看出不同的混合基质膜对沼气的提纯都有增强作用。然

而,对现有工业膜材料进行改性成本高,一次投资大,沼气中存在的杂质也会导致膜受损。因此,常规气体膜分离材料的共混和改性处理是目前研究的重点,对于提高沼气膜分离提纯能力和膜化学稳定性有重要意义。

表5 几种混合基质膜的沼气提纯效果

Tab.5 Biogas purification performance of mixed matrix membranes

膜材料	填充物	效果	文献序号
铝硅酸盐凝胶	T型沸石	增强	[47]
聚醋酸乙烯酯	4A沸石	增强	[48]
聚酰亚胺	碳气凝胶	增强	[49]
聚醚砜	2-羟基-5-甲基苯胺	增强	[50]
聚醚砜	碳纳米管	增强	[51]
聚酰亚胺	二氧化钛	增强	[52]

表6 沼液施用对作物和环境的影响

Tab.6 Effect of biogas application on crop and environment

影响对象	发酵原料	作物种类	影响效果	文献序号
作物	猪粪尿	苹果	苹果总产量增加12.2%,叶色浓绿,叶面积增大22.3%,树枝粗度提高42.9%	[54]
	猪粪尿	番茄、辣椒	化肥和沼液1:1施用,增产效果最佳,番茄和辣椒产量分别增加1.5倍和0.5倍	[55]
	牛粪尿	黑麦草	施用沼液能增加黑麦草产量1.1倍,减少杂草生长,增加土壤中蚯蚓的数量	[56]
	猪粪尿	萝卜	沼液和化肥1:1施用总糖含量最高,比单施化肥高1.5倍,比单施沼液高1.9倍	[57]
	猪粪尿	苹果	产量增加6.6%~6.8%,还原糖和维生素C含量分别增加1.5%~5.9%和3.1%~67.6%	[58]
	酒精废水	甜瓜	施用沼液后甜瓜的硝酸盐含量比施用化肥减少约60%	[59]
水土	猪粪尿	苹果	施用沼液使土壤的磷酸酶和蔗糖酶活性分别增加1.9~6.0倍和10.7~11.0倍	[60]
	猪粪尿	菜花、西瓜	增加土壤微生物量,改善土壤微生物区系,提高土壤的磷酸酶和蛋白酶等酶活性	[61]
	鸡粪		沼液的水分、铵氮和总氮集中在0~5cm土壤,但硝氮在0~15cm土壤含量均较高	[62]
	鸡粪		底施沼液可减少水分和氮素损失,使其富集在有效土壤耕层内,提高养分利用率	[63]
	酒精废水	甜瓜	施用沼液使土壤的有机碳含量增加22%,除Cu外,土壤重金属含量无显著变化	[59]
	牛粪		增加土壤有机质和速效养分含量,若用量合理短期不会对地下水造成硝态氮污染	[64]
大气	庭院废物	大麦	经过硝化处理的沼液在施用时代氮淋洗明显增加,约为原始沼液的8倍	[65]
	鸡粪		沼液施用深度为10cm时便可有效减少土壤表面的NH ₃ 挥发损失	[63]
	牛粪等		CO ₂ 排放量增加2倍,比牛粪少25%;N ₂ O排放量增加2~3倍,与牛粪相当	[66]
	餐厨垃圾		CH ₄ 排放量7.3~11.5mg/L,引起的温室效应与沼液施用排放的N ₂ O相比作用甚微	[67]

施用沼液促进了营养物质在土壤-植物系统中迁移,从而增加了土壤矿物质的利用效率^[68]。然而也有研究表明作物的产量品质随着沼液施用量的增加呈先增后减的趋势,不合理的施用甚至对作物造成毒害^[69],作物对沼液的承受量有一定限度。未来的研究需要进一步揭示沼液中营养物质在土壤-植物-大气系统的迁移规律,深入探讨沼液增产提质机理,从而推动沼气工程综合效益的提高和农业“优质高效增产”增长方式的转变。

此外,沼液的成分复杂多变,沼液在处理 and 贮藏过程中,环境不断发生变化,光、热、氧等外在因素会对营养成分产生影响,而目前关于各种营养成分在沼液处理和贮藏过程中的变化规律研究较少,因此有必要对不同来源的沼液的营养成分进一步研究,并探索其在处理和贮存过程中变化规律,为制定合

4 沼液的资源化利用与无害化处理技术

沼液的处理与资源化利用是沼气工程的关键环节,使物质在产业链条上的流动与消耗形成宏观循环。

4.1 沼液作为肥料农田施用技术

沼液的营养成分速缓兼备,养分可利用率高,是多元、卫生的速效复合肥料和生物农药,可以增加产量、提高品质、增强抗性、抑制病害、改良土壤,具有较高的应用价值^[53]。沼液作为肥料在农田施用是一种传统的、经济有效的处置方式。表6显示沼液能够增加作物产量,提高作物品质,并改善土壤状态,在用量适当,施用方式合理的情况下不会对水土和大气环境产生危害。

理的沼液施用方案提供数据支撑。

4.2 沼液的减量化及无害化技术

固液分离后将沼液回流到沼气发酵系统前端稀释进料,能减少沼液向沼气系统外的排放量,并大量减少用于稀释进料的清水,这种回流主要适用于低含水量的物料,例如秸秆、干清粪等。回流还可以使消化液中残留的有机组分重新被微生物利用,同时也促进养分与酶的均匀分布,提高厌氧消化的效率^[70-71]。

但回流会导致发酵系统中氨氮浓度升高,发酵效果降低,甚至停止工作^[72]。因此,需要采用高效的氮磷回收技术,去除沼液的氮磷、悬浮固体等对厌氧发酵过程不利的成分,并消除次生污染风险。对于农田施用和回流仍无法消纳的沼液,无害化处理达标排放与高附加值产品开发可能是沼液工程可持续发展的必由之路。从表7可以看出,不同的脱氮

除磷工艺对沼液中氮磷等成分都具有较好的去除效果,处理后沼液满足国家相关的排放标准。不同的浓缩工艺在对沼液体积进行有效减量的同时,回收

了丰富的营养物质,并保证了处理后的出水水质。不同的灭菌工艺能有效杀灭病菌,使沼液菌落数量达到相关的卫生要求。

表7 不同技术工艺对沼液的无害化和减量化效果

Tab.7 Harmless disposal and reduction effect of different technologies on biogas slurry

处理目的	工艺方法	处理效果	文献序号
脱氮除磷	NH ₃ 吹脱 + MBR	污染物浓度低于《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001),处理成本7.76元/m ³	[73]
	两级 A/O 工艺	NH ₄ ⁺ -N、SS 和 pH 均能达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级排放要求	[74]
	A/O-MBR	NH ₄ ⁺ -N、COD 和 PO ₄ ³⁻ -P 去除率达到 98.1%、96.3% 和 76.6%,系统碱洗效果良好	[75]
	SBBR	温度升高、NH ₄ ⁺ -N 浓度增加以及 COD 浓度过高都会导致总磷的去除效果下降	[76]
	微电解 + 电极 + SBBR	COD、NH ₄ ⁺ -N、SS 等达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)要求	[77]
	氯化钠改性沸石吸附	每 100 mL 沼液加 10 g 沸石,48 h 后 NH ₄ ⁺ -N 和总磷的去除率可达 90.66% 和 85.97%	[78]
	氧化塘-蚯蚓生态湿地	COD、NH ₄ ⁺ -N、总磷达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)要求	[79]
	磷酸铵镁结晶	Mg 与 P 摩尔比为 1.5:1 和 2:1,pH 值为 10.0 时,PO ₄ ³⁻ -P 去除率为 86.6% 和 91.9%	[80]
	磷酸铵镁 + SBR + 混凝	COD、NH ₄ ⁺ -N、总磷达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)要求	[81]
减量	超滤膜 + 纳滤膜浓缩	最大浓缩 21 ~ 23 倍,总磷、Fe、Mn 和 Zn 的浓度分别提高了 309、104、335、84 倍	[82]
	负压浓缩	真空度为 90% 时冷凝液水质达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)要求	[83]
灭菌	絮凝 + 紫外线杀菌	粪大肠菌群数量低于检测限,达到《粪便无害化卫生要求》(GB 7959—2012)要求	[84]
	絮凝 + 超声波处理	粪大肠菌群数量小于 10 ⁴ 个/L,满足《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)	[85]
	絮凝 + 臭氧杀菌	粪大肠菌群数量小于 10 ⁴ 个/L,满足《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)	[85]

上述工艺虽然能较好地实现沼液的无害化和减量化,但也存在工艺构筑复杂、机械设备多、投资大、能耗高、运行维护费用高等问题,对于运行相对粗放,利润相对微薄的养殖场来讲仍不太适宜,也与我国经济发展水平不相适应。因此,进一步开发低成本高效的沼液氮磷回收耦合深度处理工艺,并对不同组合工艺进行经济性评价,将对于进一步推动沼气工程的可持续发展具有重要研究意义。

5 沼气工程技术发展展望

5.1 沼气工程技术及设备研发

沼气工程技术是一门集成环境科学、机械科学、微生物科学等众多科学技术的综合性技术。中国沼气工程系统中,原料的收集、运输、贮存、预处理,沼气工程的长期、高效、稳定运行,沼气的提纯、净化、利用,沼液沼渣的深度处理、合理使用、风险评估等技术并不十分成熟,设备制造和工程安装质量不高。应结合沼气工程产业发展需求,在对沼气工程技术瓶颈充分论证的基础上,合理配置科技资源,加大科技投入,进行技术攻关,为沼气工程技术的发展提供有力支撑。主要技术研究方向有:①研究多种厌氧微生物协同作用的优化结构,在工程上提高厌氧发酵过程的效率。②探索微量元素对厌氧发酵过程中的作用机理,阐明微量元素的生物有效性。③研发新型高效厌氧发酵工艺,如高压厌氧发酵等。④开发新一代生物燃气高效分离提纯技术,优化脱碳脱硫一体化技术改良脱碳剂和脱硫剂再次还原利用技术。⑤研究沼渣沼液农田施用后养

分的迁移转化规律,制定沼渣沼液农田施用规范。⑥完善沼渣沼液氮磷回收及深度处理达标排放工艺。

在工程装备方面进一步提高沼气工程装备水平和建设效益,在预处理、发酵和气体净化等重点工艺环节的重点设备开展装备设计标准化、制造成套化、产品谱系化研究和筛选,满足不同原料、不同规模和不同终端产品沼气工程的需求,实现自主化技术研发、标准化工程设计、工厂化装备制造、模块化安装建设以及专业化安装调试等标准化集成。例如:①清粪-除砂工艺的标准化,以处理后沼液回冲工艺代替水冲粪或者水泡粪,制定进料含砂量标准,选用主动分离式除砂技术与装备。②进料量控制的标准化,合理选用输送与切割设备,使罐内状态稳定。③发酵罐体生产安装的标准化,搅拌加温保温材料的首选和优化,自动化监控及反馈控制系统改进与标准化。④气体提纯产品的标准化及工艺优化。

5.2 创新沼气工程技术应用模式

结合地区实际,建立具有区域特色的循环农业发展模式,合理布置物质和能量的多级利用,构建现代农业循环产业链。从价值增长的角度,阐述农业生产系统中产业链条链接的内在运动规律;从物质循环的角度,研究农业资源、环境、生产、消费等系统的运动与发展规律。微观层次上,以企业、农户为主体;中观层次上,以循环农业产业园(示范村)为重点;宏观层次上以区域为整体单元,通过合理的生态设计及沼气工程纽带作用的优化升级,构建区域循环农业闭环和循环农业经济体系。

参 考 文 献

- 1 Shinnars K, Binversie B, Muck R, et al. Comparison of wet and dry corn stover harvest and storage[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2007, 31(4):211-221.
- 2 Richard T L. Challenges in scaling up biofuels infrastructure[J]. *Science*, 2010, 329(5993):793-796.
- 3 Fernandes T V, Bos G J, Zeeman G, et al. Effects of thermo-chemical pre-treatment on anaerobic biodegradability and hydrolysis of lignocellulosic biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(9):2575-2579.
- 4 Kumar P, Barrett D M, Delwiche M J, et al. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, 48(8):3713-3729.
- 5 牛潇, 李晖, 张亚兵, 等. 粗磨粉碎对秸秆厌氧发酵产沼气的影晌[J]. *安全与环境学报*, 2012, 12(5):73-76.
Niu Xiao, Li Hui, Zhang Yabing, et al. Effects of coarse grinding machine shattered straw on biogas anaerobic fermentation[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(5):73-76. (in Chinese)
- 6 刘伟伟, 马欢, 曹成茂, 等. 太阳能蒸汽爆破和微波预处理对玉米秸秆产沼气的影晌[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22):227-234.
Liu Weiwei, Ma Huan, Cao Chengmao, et al. Effects of pretreatments with steam-explosion using solar energy and microwave irradiation on biogas production of corn stalk[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(22):227-234. (in Chinese)
- 7 陈岩. 超声波预处理与搅拌强度对秸秆发酵产沼气的影晌[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2013.
Chen Yan. The efficiency of ultrasonic pretreatment and stirring intensity on biogas from straw fermentation[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013. (in Chinese)
- 8 杨姝, 章可, 段青松, 等. 预处理方法对水葫芦厌氧发酵产沼气的影晌[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(4):1663-1668.
Yang Shu, Zhang Ke, Duan Qingsong, et al. Effect of pretreatment methods on biogas production efficiency of anaerobic fermentation using water hyacinth[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(4):1663-1668. (in Chinese)
- 9 邵艳秋, 邱凌, 石勇, 等. NaOH 预处理花生壳厌氧发酵制取沼气的试验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(3):573-578.
Shao Yanqiu, Qiu Ling, Shi Yong, et al. Experiments on anaerobic digestion of peanut shell for biogas production under NaOH pretreatment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3):573-578. (in Chinese)
- 10 罗立娜, 李文哲, 徐名汉, 等. 预处理方式对水稻秸秆厌氧发酵产气特性的影晌[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(11):152-156.
Luo Lina, Li Wenzhe, Xu Minghan, et al. Effect of pretreatment methods on anaerobic fermentation characteristics from rice straw[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(11):152-156. (in Chinese)
- 11 柳珊, 吴树彪, 张万钦, 等. 白腐真菌预处理对玉米秸秆厌氧发酵产甲烷影晌实验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(增刊2):124-129, 142.
Liu Shan, Wu Shubiao, Zhang Wanqin, et al. Effect of white-rot fungi pretreatment on methane production from anaerobic digestion of corn stover[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(Supp. 2):124-129, 142. (in Chinese)
- 12 Liu S, Wu S, Pang C, et al. Microbial pretreatment of corn stovers by solid-state cultivation of phanerochaete chrysosporium for biogas production[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2014, 172(3):1365-1376.
- 13 Ghosh A, Bhattacharyya B C. Biomethanation of white rotted and brown rotted rice straw[J]. *Bioprocess Engineering*, 1999, 20(4):297-302.
- 14 池勇志. 微波结合碱解预处理改善剩余污泥厌氧消化效能的研究[D]. 天津:天津大学, 2010.
Chi Yongzhi. Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by combined microwave/alkali pretreatment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- 15 刘荣厚, 吴晋锴, 武丽娟. 菌种添加量对生物预处理小麦秸秆厌氧发酵的影晌[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(11):147-151.
Liu Ronghou, Wu Jinkai, Wu Lijuan. Effect of supplement dose of microorganism in biological pretreatment of wheat straw on its characteristics of anaerobic digestion for biogas production[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(11):147-151. (in Chinese)
- 16 薄军. 太阳能沼气工程无线监测系统设计[D]. 重庆:西南大学, 2010.
Bo Jun. Design of wireless monitoring system for solar energy and biogas plant[D]. Chongqing: Southwest University, 2010. (in Chinese)
- 17 陈正涛, 郑争兵. 基于物联网的农村沼气监测预警系统设计[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(10):2424-2426.
Chen Zhengtao, Zheng Zhengbing. Designing the monitoring and warning system of rural marsh gas based on internet of things[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(10):2424-2426. (in Chinese)
- 18 顾书敏. 基于虚拟仪器的沼气发酵环境监控系统的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2008.
Gu Shumin. Research on methane fermentation environment monitoring system based on virtual instrumentation[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2008. (in Chinese)

- 19 官雪芳,徐庆贤,林碧芬,等. 智能化大型沼气池高效产气自控系统[J]. 福建农业学报,2013,28(2):166-171.
Guan Xuefang, Xu Qingxian, Lin Bifen, et al. Automated industrial biogas system[J]. Fujian Agricultural Sciences, 2013, 28(2): 166-171. (in Chinese)
- 20 张影微,李文哲,李岩,等. 利用PLC和组态软件构建沼气生产自动控制系统研究[J]. 农机化研究,2014(3):216-219.
Zhang Yingwei, Li Wenzhe, Li Yan, et al. Automatic control system of biogas production of anaerobic fermentation process based on PLC and force control[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(3): 216-219. (in Chinese)
- 21 Rieger C, Weiland P. Prozessstörungen frühzeitig erkennen[J]. Biogas Journal, 2006(4):18-20.
- 22 刘芳,张万钦,吴树彪,等. 厌氧发酵中挥发酸含量与碳酸氢盐碱度的滴定法修正[J]. 农业机械学报,2013,44(9):91-96,106.
Liu Fang, Zhang Wanqin, Wu Shubiao, et al. Titration method for total inorganic carbon and volatile fatty acids determination in anaerobic digestion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 91-96, 106. (in Chinese)
- 23 吴树彪,顾雯雯,庞昌乐,等. 厌氧发酵碱度和有机酸在线监测系统设计与实验[J]. 农业机械学报,2013,44(10):172-176.
Wu Shubiao, Gu Wenwen, Pang Changle, et al. Design and test of alkalinity and VFA online monitoring system in anaerobic fermentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 172-176. (in Chinese)
- 24 Feroso F G, Bartacek J, Jansen S, et al. Metal supplementation to uasb bioreactors: from cell-metal interactions to full-scale application[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(12): 3652-3667.
- 25 公维佳,李文哲,刘建禹. 厌氧消化中的产甲烷菌研究进展[J]. 东北农业大学学报,2006,37(6):838-841.
Gong Weijia, Li Wenzhe, Liu Jianyu. Progress of research on methanogens bacteria in anaerobic digestion[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2006, 37(6): 838-841. (in Chinese)
- 26 潘云锋,李文哲. 微量金属元素对厌氧污泥颗粒化的影响[J]. 可再生能源,2007,25(6):51-54.
Pan Yunfeng, Li Wenzhe. The effects of trace metals on sludge granulation in dairy manure anaerobic fermentation[J]. Renewable Energy Resources, 2007, 25(6): 51-54. (in Chinese)
- 27 张涵,李文哲. 微量金属元素添加频率对牛粪厌氧发酵细菌种类的影响[J]. 农机化研究,2006(6):173-175.
Zhang Han, Li Wenzhe. The effects of frequency of addition of trace metals on biogas production characteristic in dairy manure by anaerobic fermentation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(6): 173-175. (in Chinese)
- 28 田菲,邱凌,井良霄,等. 不同外源添加剂对牛粪厌氧发酵的影响[J]. 西北农业学报,2012,21(7):190-194.
Tian Fei, Qiu Ling, Jing Liangxiao, et al. Influences of different extraneous source supplements on cow dung anaerobic fermentation [J]. Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica, 2012, 21(7): 190-194. (in Chinese)
- 29 Banks C J, Zhang Y, Jiang Y, et al. Trace element requirements for stable food waste digestion at elevated ammonia concentrations [J]. Bioresource Technology, 2012, 104: 127-135.
- 30 Gustavsson J, Svensson B H, Karlsson A. The feasibility of trace element supplementation for stable operation of wheat stillage-fed biogas tank reactors[J]. Water Science and Technology, 2011, 64(2): 320-325.
- 31 Karlsson A, Einarsson P, Schnurer A, et al. Impact of trace element addition on degradation efficiency of volatile fatty acids, oleic acid and phenyl acetate and on microbial populations in a biogas digester[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2012, 114(4): 446-452.
- 32 Qiang H, Lang D L, Li Y Y. High-solid mesophilic methane fermentation of food waste with an emphasis on iron, cobalt, and nickel requirements[J]. Bioresource Technology, 2012, 103(1): 21-27.
- 33 吴树彪,郎乾乾,张万钦,等. 微量元素对餐厨垃圾厌氧发酵的影响实验[J]. 农业机械学报,2013,44(11):128-132.
Wu Shubiao, Lang Qiangqiang, Zhang Wanqin, et al. Effect of trace elements on anaerobic digestion of food waste [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 128-132. (in Chinese)
- 34 Zhang L, Jahng D. Long-term anaerobic digestion of food waste stabilized by trace elements [J]. Waste Management, 2012, 32(8): 1509-1515.
- 35 刘爽,李文哲,王春影,等. 高效木质纤维素分解复合菌系降解稻草特性的研究[J]. 环境工程学报,2010,4(3):700-704.
Liu Shuang, Li Wenzhe, Wang Chunying, et al. Research on characteristics of degrading straw by high efficient lignocelluloses degrading microbial community[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(3): 700-704. (in Chinese)
- 36 郑国香,李文哲,关正军,等. 复合菌系 FLW-1 在分批补料中的发酵特性及其种群动态[J]. 太阳能学报,2011,32(12):1741-1747.
Zheng Guoxiang, Li Wenzhe, Guan Zhengjun, et al. Fermentation characteristic and population dynamics of microbial system FLW-1 in fed-batch experiment[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(12): 1741-1747. (in Chinese)
- 37 潘云霞,李文涛,刘爽,等. 高温复合菌系 WSC-6 预处理稻秆对沼气生产的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(6):228-232.
Pan Yunxia, Li Wentao, Liu Shuang, et al. Effect of pretreatment with high-temperature composite strains WSC-6 on biogas production of rice straw[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 228-232. (in Chinese)
- 38 李文哲,朱婷,徐凤花,等. 稻草降解复合菌系 LZF-12 发酵特性研究[J]. 东北农业大学学报,2013,44(8):99-104.

- Li Wenzhe, Zhu Ting, Xu Fenghua, et al. Characteristic of rice straw degradation by microbial system LZF-12 [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(8):99-104. (in Chinese)
- 39 李文哲, 郑文玲, 郑国香, 等. 不同氮源对高效秸秆降解复合菌系 LZF-12 发酵性能的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(11):85-89.
- Li Wenzhe, Zheng Wenling, Zheng Guoxiang, et al. Effect of nitrogen sources on fermentative characteristics of microbial system LZF-12 with high straw-degradation ability [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(11):85-89. (in Chinese)
- 40 Wongwilaiwalin S, Rattanachomsri U, Laothanachareon T, et al. Analysis of a thermophilic lignocellulose degrading microbial consortium and multi-species lignocellulolytic enzyme system [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2010, 47(6):283-290.
- 41 Yuan X F, Cao Y Z, Li J J, et al. Effect of pretreatment by a microbial consortium on methane production of waste paper and cardboard [J]. Bioresource Technology, 2012, 118:281-288.
- 42 何木兰. 高效厌氧纤维素降解菌的筛选、复合菌系构建及对沼气发酵的影响 [D]. 兰州:兰州大学, 2014.
- He Mulan. Isolation of effective cellulytic anaerobic bacteria, construction microbial agent and application on biogas fermentation [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. (in Chinese)
- 43 程辉彩, 刁彦花, 郭建斌, 等. 产乙酸复合菌系 Th3 培养及其在沼气厌氧发酵中的应用 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(17):210-216.
- Cheng Huicai, Xi Yanhua, Guo Jianbin, et al. Culture of acetogenic complex strains Th3 and its application in biogas production [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17):210-216. (in Chinese)
- 44 程辉彩, 张丽萍, 左壮, 等. 复合菌系 CN6 生长特性及在沼气发酵中的应用 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(5):143-147, 153.
- Cheng Huicai, Zhang Liping, Zuo Zhuang, et al. Growth characteristics of complex strains CN6 and its application in biogas production [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):143-147, 153. (in Chinese)
- 45 Makaruk A, Miltner M, Harasek M. Membrane biogas upgrading processes for the production of natural gas substitute [J]. Separation and Purification Technology, 2010, 74(1):83-92.
- 46 Ryckebosch E, Drouillon M, Vervaeren H. Techniques for transformation of biogas to biomethane [J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(5):1633-1645.
- 47 Mirfendereski S M, Mazaheri T, Sadrzadeh M, et al. CO₂ and CH₄ permeation through t-type zeolite membranes: effect of synthesis parameters and feed pressure [J]. Separation and Purification Technology, 2008, 61(3):317-323.
- 48 Adams R T, Lee J S, Bae T H, et al. CO₂-CH₄ permeation in high zeolite 4a loading mixed matrix membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2011, 367(1-2):197-203.
- 49 Zhang Y, Musselman I H, Ferraris J P, et al. Gas permeability properties of mixed-matrix matrimid membranes containing a carbon aerogel: a material with both micropores and mesopores [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008, 47(8):2794-2802.
- 50 Cakal U, Yilmaz L, Kalipeilar H. Effect of feed gas composition on the separation of CO₂/CH₄ mixtures by PES-SAPO 34-HMA mixed matrix membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2012, 417-418:45-51.
- 51 Kusworo T, Johari S, Widiasta I N. The uses of carbon nanotubes mixed matrix membranes (mmm) for biogas purification [J]. International Journal of Waste Resources, 2012, 2(1):5-10.
- 52 Moghadam F, Omidkhan M R, Vashghani-Farahani E, et al. The effect of TiO₂ nanoparticles on gas transport properties of Matrimid5218-based mixed matrix membranes [J]. Separation and Purification Technology, 2011, 77(1):128-136.
- 53 吴树彪, 崔畅, 张笑千, 等. 农田施用沼液增产提质效应及水土环境影响 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(8):118-125, 179.
- Wu Shubiao, Cui Chang, Zhang Xiaoqian, et al. Effect of biogas slurry on yield increase, quality improvement, water and soil environment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8):118-125, 179. (in Chinese)
- 54 邱凌, 许卫娜, 巨鹏, 等. 沼肥种植对渭北苹果树势与产量的影响 [J]. 中国沼气, 2007, 25(6):28-30.
- Qiu Ling, Xu Weina, Ju Peng, et al. Effect of biogas fertilizer on growth and yield of apple tree in Weibei dry land [J]. China Biogas, 2007, 25(6):28-30. (in Chinese)
- 55 Kourimska L, Poustkova I, Babicka L. The use of digestate as a replacement of mineral fertilizers for vegetables growing [J]. Scientia Agriculturae Bohemica, 2012, 43(4):121-126.
- 56 Clements L, Salter A, Banks C, et al. The usability of digestate in organic farming [J]. Water Science & Technology, 2012, 66(9):1864-1870.
- 57 巨鹏, 邱凌, 贺光祥. 沼气发酵残留物对萝卜品质的影响 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(19):8176-8177, 8186.
- Ju Peng, Qiu Ling, He Guangxiang. Effects of biogas residue on radish quality [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2008, 36(19):8176-8177, 8186. (in Chinese)
- 58 许卫娜, 邱凌, 聂俊峰, 等. 沼气发酵残留物对苹果品质的影响 [J]. 中国农学通报, 2007, 23(9):350-353.
- Xu Weina, Qiu Ling, Nie Junfeng, et al. Effect of biogas residue on the quality of apple [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(9):350-353. (in Chinese)
- 59 Lopodota O, Leogrande R, Fiore A, et al. Yield and soil responses of melon grown with different organic fertilizers [J]. Journal of Plant Nutrition, 2013, 36(3):415-428.

- 60 许卫娜,邱凌,杨宝平,等. 沼气发酵残留物对红富士苹果园土壤酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(6):183-188,226.
Xu Weina, Qiu Ling, Yang Baoping, et al. Effect of biogas residues on soil enzyme activity of Fuji apple orchards[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(6):183-188, 226. (in Chinese)
- 61 Alburquerque J, de la Fuente C, Campoy M, et al. Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 43:119-128.
- 62 王忠江,蔡康妮,王丽丽,等. 沼肥表施对土壤氮素动态分布及氨挥发的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(7):139-143.
Wang Zhongjiang, Cai Kangni, Wang Lili, et al. Influence of surface application of biogas slurry on ammonia volatilization and dynamic distribution of soil nitrogen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7):139-143. (in Chinese)
- 63 王忠江,蔡康妮,王丽丽,等. 施灌沼肥对土壤氨挥发和氮素下渗规律的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(5):139-144.
Wang Zhongjiang, Cai Kangni, Wang Lili, et al. Influence of biogas slurry application on ammonia volatilization and nitrogen infiltration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5):139-144. (in Chinese)
- 64 郑苗壮,胡林,董仁杰,等. 草坪-土壤系统消纳沼肥氮的环境影响[J]. 农业工程学报,2011,27(11):294-299.
Zheng Miao Zhuang, Hu Lin, Dong Renjie, et al. Environment effect of turf-soil system disposing nitrogen in biogas fertilizers[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11):294-299. (in Chinese)
- 65 Haraldsen T K, Andersen U, Krogstad T, et al. Liquid digestate from anaerobic treatment of source-separated household waste as fertilizer to barley[J]. Waste Management & Research, 2011, 29(12):1271-1276.
- 66 Johansen A, Carter M S, Jensen E S, et al. Effects of digestate from anaerobically digested cattle slurry and plant materials on soil microbial community and emission of CO₂ and N₂O[J]. Applied Soil Ecology, 2013, 63:36-44.
- 67 Dieterich B, Finnan J, Frost P, et al. The extent of methane (CH₄) emissions after fertilisation of grassland with digestate[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(8):981-985.
- 68 Vaneeckhaute C, Meers E, Michels E, et al. Closing the nutrient cycle by using bio-digestion waste derivatives as synthetic fertilizer substitutes: a field experiment[J]. Biomass and Bioenergy, 2013, 55:175-189.
- 69 唐微,伍钧,孙百晔,等. 沼液不同施用量对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(12):2268-2273.
Tang Wei, Wu Jun, Sun Baiye, et al. Effect of application amounts of biogas slurry on yield and quality of rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(12):2268-2273. (in Chinese)
- 70 Bae J H, Cho K W, Lee S J, et al. Effects of leachate recycle and anaerobic digester sludge recycle on the methane production from solid wastes[J]. Water Science and Technology, 1998, 38(2):159-168.
- 71 Ledakowicz S, Kaczorek K. Laboratory simulation of anaerobic digestion of municipal solid waste[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2004, 39(4):859-871.
- 72 Hansen K H, Angelidaki I, Ahring B K. Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia[J]. Water Research, 1998, 32(1):5-12.
- 73 隋倩雯,董红敏,朱志平,等. 提高猪场沼液净化处理效果的氨吹脱控制参数[J]. 农业工程学报,2012,28(11):205-211.
Sui Qianwen, Dong Hongmin, Zhu Zhiping, et al. Ammonia stripping control parameters for improving effluent treatment effect in anaerobic digesters of piggery wastewater[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11):205-211. (in Chinese)
- 74 毕生兰. 两级 AN/O 工艺用于奶牛养殖低 C/N 值沼液处理[D]. 重庆:重庆大学,2011.
Bi Shenglan. The treatment of the low C/N ratio biogas slurry of dairy cow farming by using two-stage AN/O process[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- 75 Gong W J, Li W Z, Liang H. Application of a/o-mbr for treatment of digestate from anaerobic digestion of cow manure[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2010, 85(10):1334-1339.
- 76 万金保,何华燕,邓香平,等. 序批式生物膜反应器去除猪场厌氧消化液中的总磷[J]. 环境工程学报,2011,5(5):1047-1050.
Wan Jinbao, He Huayan, Deng Xiangping, et al. Total phosphorus removal in swine's anaerobic digestion by sequencing batch biofilm reactor[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(5):1047-1050. (in Chinese)
- 77 马焕春. 畜禽养殖场沼液的微电解-电极-SBBR 处理工艺研究[D]. 重庆:西南大学,2013.
Ma Huanchun. Treatment of livestock biogas slurry by micro-electrolysis and electrode-SBBR [D]. Chongqing: Southeast University, 2013. (in Chinese)
- 78 张文艺,郑泽鑫,韩有法,等. 改性沸石对猪场沼液氮磷吸附特性与机理分析[J]. 农业环境科学学报,2014,33(9):1837-1842.
Zhang Wenyi, Zheng Zexin, Han Youfa, et al. Mechanisms of nitrogen and phosphorus adsorption from biogas slurry of piggery by modified zeolite[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(9):1837-1842. (in Chinese)
- 79 田锁霞. 蚯蚓生态湿地系统处理厌氧发酵液的研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
Tian Suoxia. Study on the treatment of anaerobic digestion slurry by earthworm-constructed wetland system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

- 102: 8557 - 8568.
- 5 Chang J S, Lee K S, Lin P J. Biohydrogen production with fixed-bed bioreactors[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2002,27(11 - 12):1167 - 1174.
- 6 张全国,王毅. 光合细菌生物制氢技术研究进展[J]. 农业机械学报,2013,44(6):156 - 161.
Zhang Q G, Wang Y. Research progress of hydrogen production technology with photosynthetic bacteria[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(6):156 - 161. (in Chinese)
- 7 Liao Q, Wang Y J, Wang Y Z, et al. Formation and hydrogen production of photosynthetic bacterial biofilm under various illumination conditions[J]. Bioresource Technology 2010,101:5315 - 5324.
- 8 Zhang C, Zhu X, Liao Q, et al. Performance of a groove-type photobioreactor for hydrogen production by immobilized photosynthetic bacteria[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010,35(11):5284 - 5292.
- 9 何延青,刘俊良,杨平,等. 微生物固定化技术与载体结构的研究[J]. 环境科学,2004,25(增刊):101 - 104.
He Y Q, Liu J L, Yang P, et al. Immobilization technology and construction of carrier[J]. Environmental Science,2004,25(Supp.):101 - 104. (in Chinese)
- 10 廖强,张川,朱恂,等. 微槽透光板式光生物制氢反应器: 中国,200710078274.2[P]. 2007-08-22.
Liao Q, Zhang C, Zhu X, et al. Groove-type flat-panel photo-H₂ bioreactor. China, 200710078274.2[P]. 2007-08-22. (in Chinese)
- 11 蒋丹萍,韩滨旭,王毅,等. HAU-M1 光合细菌的生理特征和产氢特性分析[J]. 太阳能学报,2015,36(2):289 - 294.
Jiang D P, Han B X, Wang Y, et al. Characteristic analysis on physiological and hydrogen production by HAU-M1 photosynthetic bacteria[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2015,36(2):289 - 294. (in Chinese)
- 12 Koku H. Aspects of the metabolism of hydrogen production by *Rhodobacter sphaeroides* [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2002, 27(11 - 12):1315 - 1329.
- 13 Chen C H, Lu W B, Wu J F, et al. Enhancing phototrophic hydrogen production of *Rhodospirillum rubrum* via statistical experimental design[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007,32(8):940 - 949.
- 14 Androga D D, Sevinc P, Koku H, et al. Optimization of temperature and light intensity for improved photofermentative hydrogen production using *Rhodobacter capsulatus* DSM 1710[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014,39(6):2472 - 2480.
- 15 Kim M S, Baek J S, Lee J K. Comparison of H₂ accumulation by *Rhodobacter sphaeroides* KD131 and its uptake hydrogenase and PHB synthase deficient mutant[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006,31(1):121 - 127.
- 16 Melnicki M R, Bianchi L, De Philippis R, et al. Hydrogen production during stationary phase in purple photosynthetic bacteria [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008,33(22):6525 - 6534.
- 17 Ismail K S K, Najafpour G, Younesi H, et al. Biological hydrogen production from CO: bioreactor performance[J]. Biochemical Engineering Journal, 2008,39(3):468 - 477.

~~~~~

(上接第 196 页)

- 80 马泉智. 畜禽粪便沼液预处理及磷酸铵镁法回收磷的研究[D]. 北京:中国地质大学,2013.
Ma Quanzhi. Research on pretreatment of livestock and poultry manure fermenting slurry and phosphorus recovery by magnesium ammonium phosphate crystallization[D]. Beijing:China University of Geosciences,2013. (in Chinese)
- 81 王峰,严潇南,杨海真. 鸡粪厌氧发酵沼液达标处理工艺研究[J]. 农业机械学报,2012,43(5):84 - 90.
Wang Feng, Yan Xiaonan, Yang Haizhen. Treatment process of anaerobically digested effluent of chicken manure for meeting the discharging standard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(5):84 - 90. (in Chinese)
- 82 宋成芳,单胜道,张妙仙,等. 畜禽养殖废弃物沼液的膜过滤浓缩试验研究[J]. 中国给水排水,2011,27(3):84 - 86.
Song Chengfang, Shan Shengdao, Zhang Miaoxian, et al. Study on concentration of biogas slurry from livestock and poultry wastes using membrane technology[J]. China Water & Wastewater,2011,27(3):84 - 86. (in Chinese)
- 83 邓蓉. 畜禽养殖场沼液的负压浓缩与纳滤膜浓缩研究[D]. 重庆:西南大学,2014. (in Chinese)
Deng Rong. Vacuum concentration and nanofiltration concentration of livestock biogas slurry [D]. Chongqing: Southeast University,2013. (in Chinese)
- 84 李同,董红敏,陶秀萍. 猪场沼液絮凝上清液的紫外线杀菌效果[J]. 农业工程学报,2014,30(6):165 - 171.
Li Tong, Dong Hongmin, Tao Xiuping. Disinfection effects of ultraviolet on supernatants of flocculated digestate from swine farm [J]. Transactions of the CSAE,2014,30(6):165 - 171. (in Chinese)
- 85 李同. 猪场处理出水杀菌方法试验研究[D]. 北京:中国农业科学院,2014.
Li Tong. Pilot study on disinfection methods of treated effluent from swine farm [D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2014. (in Chinese)