

DOI: 10.13205/j.hjgc.202503010

孙广东, 马俊怡, 郝书, 等. 畜禽粪污厌氧消化产甲烷效能的关键影响因素研究进展[J]. 环境工程, 2025, 43(3): 114-129.

SUN G D, MA J Y, HAO S, et al. Research progress on key influencing factors of methane production efficiency in anaerobic digestion of livestock and poultry manure[J]. Environmental Engineering, 2025, 43(3): 114-129.

畜禽粪污厌氧消化产甲烷效能的关键影响因素 研究进展

孙广东^{1,2} 马俊怡^{1,2} 郝书^{1,2} 董贺^{1,2} 赵心茹^{1,2} 柴强龙^{1,2} 党岩^{1,2*}

(1. 北京林业大学 水体污染源控制技术北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学 污染水体源控与生态修复技术北京高校工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 在畜禽养殖方式逐渐规模化的背景下, 规模化养殖所产生的粪污具有集中排放量大、处置需求强的特点, 这为利用厌氧消化技术处置畜禽粪污来实现沼气产量、产能效益最大化提供了契机, 完全契合我国能源结构优化、碳中和等战略的需要。然而, 由于畜禽粪污组分复杂、厌氧消化调控操作条件繁多以及技术自身反应速率限制等原因影响, 厌氧消化技术在处置畜禽粪污过程中存在产气效率低、过程稳定性差的缺陷, 掌握其产甲烷效能关键影响因素变得尤为重要。该文分析介绍了不同畜禽粪污的特性以及影响其厌氧消化产甲烷潜力的原因, 综述了近年来畜禽粪污厌氧消化的温度、pH、氨氮等主要环境因子以及进料负荷、进料方式等外部调控因素对产甲烷效能、微生物群落丰度的影响研究, 探讨了投加功能菌剂、导电材料等辅助方式对系统产甲烷效能提升的作用以及系统微生物的反馈机制, 对后续的重点研究方向进行了展望, 以期为未来的畜禽粪污厌氧消化技术理论与工程应用提供参考。

关键词: 畜禽粪污; 厌氧消化; 产甲烷古菌; 产甲烷潜力; 导电材料

Research progress on key influencing factors of methane production efficiency in anaerobic digestion of livestock and poultry manure

SUN Guangdong^{1,2}, MA Junyi^{1,2}, HAO Shu^{1,2}, DONG He^{1,2}, ZHAO Xinru^{1,2}, CHAI Qianglong^{1,2}, DANG Yan^{1,2*}

(1. Beijing Key Lab for Source Control Technology of Water Pollution, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Research Center for Source Control & Eco-remediation of Water Pollution,
Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Under the background of the gradual scale of livestock and poultry breeding methods, the generated manure has the characteristics of large centralized emissions and strong disposal demand, which provides an opportunity for the use of anaerobic digestion technology to dispose of livestock and poultry manure to achieve the production of biogas energy and maximize productivity benefits, which fully meets the strategic needs of China's energy structure optimization and carbon neutrality. However, due to the complex components of livestock and poultry manure, the various operating conditions of anaerobic digestion regulation, and the limitation of the reaction rate of the technology itself, there are defects of low gas production efficiency and poor process stability in the process of anaerobic digestion disposal of livestock and poultry manure, so it is particularly important to understand the key factors affecting its methanogenic efficiency. This paper analyzes and

收稿日期: 2025-01-21; 修改日期: 2025-02-09; 接收日期: 2025-02-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3207702); 国家自然科学基金面上项目(52270023)

第一作者: 孙广东(1993-), 男, 博士研究生, 研究方向为有机固废厌氧生物处理和水污染控制。sunguangdong@bjfu.edu.cn

* 通信作者: 党岩(1983-), 男, 教授, 主要从事有机固废资源化能源化和废水低能耗处理领域研究。yandang@bjfu.edu.cn

introduces the characteristics of different livestock and poultry manures and the reasons influencing their methane-producing potential through anaerobic digestion. It reviews the research on the impacts of major environmental factors such as temperature, pH, and ammonia-nitrogen, as well as external control factors such as feeding load and feeding methods on methane-producing efficiency and microbial community abundance in the anaerobic digestion of livestock and poultry manures in recent years. It also explores the roles of auxiliary methods, such as adding functional microbial agents and conductive materials in enhancing the methane-producing efficiency of the system and the feedback mechanisms of system microorganisms. Moreover, it looks ahead to the key research directions in the future, providing a reference for the theoretical research and engineering applications of anaerobic digestion technology for livestock and poultry manures in the future.

Keywords: manure from livestock and poultry; anaerobic digestion; methanogenic archaea; biochemical methane potential; conductive material

0 引言

由于我国居民饮食结构中畜禽产品占比逐渐增大,畜禽养殖市场呈现出稳定增长的趋势,畜禽粪污排放量与日俱增。根据农业农村部等相关数据统计,全国每年产生畜禽粪污总量近40亿t,约为生活垃圾年产量的16倍^[1]。畜禽粪污中有机质含量为30%~70%,有效处理率不到50%,畜禽养殖业水污染物排放量的化学需氧量(COD)约为1000.53万t,占全国水污染物总排放量的46.67%^[2]。畜禽粪污是具有巨大应用潜力的碳源,其等效二氧化碳排放量约为1.23亿t,为生活垃圾处理碳排放量的2.5倍。厌氧消化技术通过微生物的代谢活动将废弃有机物稳定化,同时伴有甲烷和二氧化碳产生,具有处置畜禽粪污减量无害化、产生沼气可再生能源的双重优势,引起各国关注^[3,4]。随着我国养殖方式从分散饲养向集约化和现代化的方式快速转变,所产畜禽粪污集中化程度不断提高,这为厌氧消化技术推广后的设施规模化、沼气能源产量化、产能效益最大化提供了可能。

然而,畜禽粪污厌氧消化产甲烷过程历经水解、酸化、乙酸化和甲烷化等阶段,是一种由具有不同代谢机制的微生物共同参与的生物化学反应过程,系统中微生物之间的协同合作既微妙又复杂^[5]。厌氧消化过程涉及微生物主要包括水解酸化细菌和产甲烷古菌,至少涵盖了20个门的细菌和5个目的古菌^[6,7]。产甲烷古菌作为厌氧消化过程关键微生物,是严格的专性厌氧菌,只能利用有限的简单有机物,主要为乙酸、氢气和少数简单有机物^[8]。产乙酸菌和产甲烷古菌之间互营关系成为影响厌氧消化最重要的因素,这两类微生物的不平衡是导致厌氧消化系统不稳定的首要原因^[9]。传统的厌氧消化存在产气效率低、过程稳定性差的缺陷,常常遭遇超负荷、氨

抑制等诱发的过程失稳现象。厌氧消化系统一旦失稳,二次启动运行通常需要较长时间恢复,从而为其所服务的养殖企业或固废环保企业带来极大的环保、经济风险。因此,探明影响畜禽粪污厌氧消化过程稳定以及促进消化产甲烷效率的关键因素,对厌氧消化技术可持续性发展具有重要意义。

在化石能源逐渐枯竭的背景下,依托厌氧消化技术实现畜禽粪污的资源化高效利用,是提升碳回收和生物质能生产效率的重要举措,对助力实现我国的“双碳目标”意义重大^[10]。本文分析了以不同畜禽粪污为底物的厌氧消化产甲烷效能与潜力,总结了畜禽粪污厌氧消化产甲烷过程中不稳定的关键环境因素和干扰机制,探讨了进料负荷和不同进料方式对产甲烷效能的影响,对后期畜禽粪污厌氧消化技术的重点研究方向进行了展望,以期为该技术的基础研究和工程化应用提供参考。

1 不同底物类型厌氧消化产甲烷效能与潜力分析

牛粪、猪粪和鸡粪是我国主要的3种畜禽粪污,分别占畜禽粪污总产量的45.2%、39.2%和15.6%^[11]。由于畜禽消化特征的差异和饲料成分、饲养方式以及粪污收集方式等外部因素,各畜禽粪污的成分结构、理化性质、产甲烷潜能各不相同^[12]。各畜禽粪便的成分对比见表1。

表1 各种畜禽粪便理化性质^[13]

Table 1 Physical and chemical properties of various livestock and poultry manure

畜禽粪污种类	易降解组分/%	结构性碳水化合物/%	(VS/TS)/%	C/N	pH
牛粪	39.49	60.51	75~85	30~60	7.0~8.5
猪粪	47.09	52.92	70~80	10~20	6.5~7.5
鸡粪	59.73	40.27	70~80	3~10	4.0~7.0

注:VS为挥发性固体含量,TS为总固体含量,C/N为碳氮比。

粪污底物中易降解组分含量由高到低依次为鸡粪(59.73%)、猪粪(47.08%)和牛粪(39.49%)。常见的畜禽粪污厌氧消化产甲烷工

艺为连续搅拌式反应器(CSTR)工艺、升流式厌氧污泥床反应器(UASB)工艺,具体工艺流程见图1。

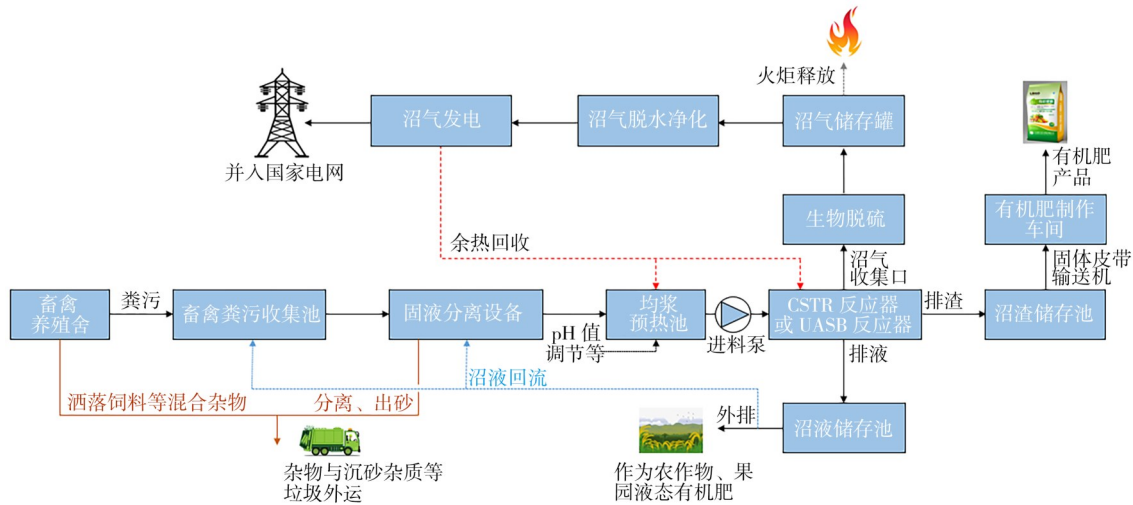


图1 畜禽粪污厌氧消化产甲烷常见的工艺流程

Figure 1 Common process flow chart of anaerobic digestion of livestock and poultry manure for methane production

1.1 牛粪污的厌氧消化产甲烷效能与潜力

牛类反刍动物以草饲料为主,其瘤胃是一个天然发酵罐,瘤胃内部微生物体系具有强大的木质纤维素水解酸化能力,将复杂的木质纤维素生物质转化为可溶性有机物和挥发性脂肪酸(VFAs),通常能够在2 d内降解60%以上的纤维^[14]。由于牛饲料中易降解部分已经被牛瘤胃中微生物利用,牛粪中易降解组分与典型的鸡粪、猪粪相比含量最低,含有超过总固体含量50%的不易降解有机组分,包括纤维素、半纤维素和木质素,其复杂的结构而阻碍了牛粪在厌氧消化中的水解,使其成为限速步骤。根据牛粪化学成分分析结果,理论上牛粪的厌氧消化甲烷生产潜力值为206~219 mL/g TS,实际实验中产甲烷潜力为130~139 mL/g TS,仅为前者的60%~70%^[15, 16]。

提高牛粪厌氧消化的效能,通常使用预处理、共消化、添加剂等途径来解决。通过预处理可以分解复杂的有机物,使木质纤维素化合物更容易被水解从而提高厌氧消化效能;共消化是通过将不同性质的有机废弃物混合,以提高厌氧消化效能。生物酶添加剂能够将难降解的物质,分解为更易被微生物利用的小分子有机物,从而提升厌氧消化的速率。Fernandez等^[17]研究发现在对牛粪进行机械破碎和混合的预处理后,甲烷的产量可以提高12%。与其他畜

禽粪污相比,牛粪中所含的氮化合物含量较低,但结构性碳水化合物含量最高,属于富碳基质,其较高的C/N(30~60)也是阻碍厌氧消化的主要障碍之一^[18]。当牛粪废水与其他有机组分进行共消化时,其强大的缓冲能力更有利于提高甲烷产量,即牛粪的存在会促进给定底物的厌氧消化过程。Xing等^[19]研究发现当牛粪废水与餐厨垃圾以1:2.5的比例混合时,甲烷的产率最高可达到2.71 L/(L·d)。在牛瘤胃内部的微生物含有产甲烷古菌,其数量占瘤胃微生物总量的2%~4%。目前已有研究分离出的瘤胃液中产甲烷古菌主要有4个属:甲烷八叠球菌属 *Methanosarcina*、甲烷微菌属 *Methanomicrobium*、甲烷短杆菌 *Methanobrevibacter* 和甲烷杆菌属 *Methanobacterium*^[20, 21]。当瘤胃液与牛粪以3:7的比例混合时,牛粪中的微生物与瘤胃液中的微生物各自发挥优势,分工协作,甲烷产率最大值达到169 mL/g VS^[22]。

1.2 猪粪污的厌氧消化产甲烷效能与潜力

猪粪成分复杂,包括蛋白质、脂肪、有机酸、纤维素、半纤维素等;含氮较多,C/N约为14;脂肪含量(11.18%)显著高于牛粪、鸡粪^[13]。相对于保育猪、生长期猪的猪粪,妊娠母猪的猪粪含有更多的纤维素、木质素和芳香族化合物等难降解有机物,这些物质高度腐殖化,难生物降解,保育猪粪便、生长期猪粪

便和妊娠母猪粪便的产甲烷值分别为 273, 272, 230 mL/g VS, 且保育猪粪便和生长期猪粪便的产甲烷过程十分相近^[23]。

由于养殖模式的原因,不少猪场使用水泡粪清粪工艺清理猪粪便,使得每头猪平均每天产生 4~8 L 废水,主要包括洗涤、粪便以及尿液等成分;猪粪受冲栏洗涤水的掺混,所形成猪粪废水具有排放水量大,且时间相对集中的特点^[24, 25]。在一定范围内,随着猪粪废水 TS 的增加,厌氧发酵产气效能也增加;若猪粪废水 TS 含量较低时,发酵系统内酸浓度低,产甲烷古菌群底物不足,虽然产气速率快,但容积产气效率低;若猪粪废水 TS 过高,形成的水泡粪流动性差,给猪舍的粪污管理带来麻烦。选择合适的水泡粪 TS 含量对其厌氧消化尤为重要。陈欣等^[26]研究猪粪废水 TS 在 2%、6%、10% 和 14% 4 个梯度下厌氧消化试验下,发现 TS 对猪粪厌氧消化过程及甲烷产率有较大影响,TS 为 6% 和 10% 的甲烷产率较高,当 TS 进一步提高至 14% 时,物料中过高 VFAs 以及氨氮浓度对产甲烷古菌群活性产生抑制作用。

1.3 鸡粪污的厌氧消化产甲烷效能与潜力

鸡禽类常以谷物为饲料,饮水少,加之鸡禽类的消化道仅为其体长的 7 倍,比其他畜禽的消化道短,饲料在体内停留仅约 4 h,营养物质的消化吸收率很低,40%~70% 营养物质会随粪便排出体,肥分浓厚^[27, 28]。理论上每克干鸡粪全部降解可以产生 421~520 mL,实际实验中产甲烷潜能为 250~370 mL/g TS,比典型的牛粪、猪粪产甲烷潜能高^[29, 30]。

鸡粪属于高氮物质,相对于其他畜禽粪便,含有更多的蛋白质、氨基酸及尿酸,其蛋白质组分最高,

为牛粪、猪粪的 2 倍^[13]。在厌氧消化处理过程中,有机氮转化为氨氮(包括 NH_4^+ 和游离氨 NH_3)的效率为 62.6%~80.3%,故高固体鸡粪厌氧消化面临着更大的氨抑制风险,因此常控制鸡粪厌氧消化 TS 含量在 10% 以下^[31]。最初的鸡粪厌氧消化处理研究主要在低浓度(0.5%~3%)条件下进行,将水加进鸡粪稀释 TS 浓度,这也是工程普遍采用的方式,可实现反应器的快速启动以及后期的稳定运行。由于鸡粪有着较高的固体含量,更适用于高固体厌氧消化技术,但增加鸡粪进料 TS 浓度势必增加反应器发酵液氨氮浓度,实现高固体鸡粪厌氧处理仍然存在较大的挑战^[32]。Bi 等^[33, 34]研究发现,在鸡粪固体浓度为 15%,水力停留时间(HRT)为 20~30 d,甲烷产率仅为 0.16~0.29 L/g,并且有较高的有机酸残余。鸡粪中温厌氧消化系统的甲烷转化率会随着有机负荷和总氨氮(TAN)的升高而受到抑制,在有机负荷达到 8.5 kg TS/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$)以上,或 TAN 浓度达到 10000 mg/L 以上时,系统几乎不再产气直至崩溃^[35]。

2 环境因子对厌氧消化产甲烷体系的影响

2.1 温度对微生物代谢活动的影响

温度是影响厌氧消化效率的关键参数,对微生物的生长速度和代谢有着重要影响,进而关系到厌氧消化体系中产甲烷性能。根据厌氧微生物适合生存的环境温度不同,可以在低温(15~25 °C)、中温(35~40 °C)和高温(50~60 °C)条件下进行。根据表 2 总结的产甲烷古菌生长环境参数可知:多数产甲烷古菌的最佳生长温度为 30~40 °C 的中温环境,低温和高温对大多数厌氧微生物而言为极端环境,不适宜生长^[36, 37]。

表 2 常见的产甲烷古菌属的生长环境参数

Table 2 Growth environmental parameters of common methanogenic archaea

产甲烷古菌属	拉丁学名	基本形态	通用底物	适宜温度/°C	适宜 pH 范围	参考文献
甲烷八叠球菌属	<i>Methanosarcina</i>	不规则球状	氢气/二氧化碳、甲醇、乙酸等	35~40	5.0~7.0	[38]
拟甲烷球菌属	<i>Methanococcoides</i>	不规则球状	甲醇	42	7.0~7.5	[39]
鬃毛甲烷菌属	<i>Methanosaeta</i>	杆状	乙酸	35~60	7.0~7.5	[40]
甲烷丝状菌属	<i>Methanothrix</i>	丝状	乙酸	35~45	7.1~7.8	[8]
甲烷杆菌属	<i>Methanobacterium</i>	长棒长丝	氢气/二氧化碳	35~62	6.6~8.5	[41]
甲烷热杆菌属	<i>Methanothermobacter</i>	长棒长丝、杆状	氢气/二氧化碳	65~70	7.0~8.0	[42]
甲烷短杆菌属	<i>Methanobrevibacter</i>	短棒短链	氢气/二氧化碳、甲酸	37~39	—	[43]
甲烷嗜热菌属	<i>Methanothermus</i>	短棒	氢气/二氧化碳、甲酸	83	<7.0	[42]
甲烷热球菌属	<i>Methanococcus</i>	不规则	氢气/二氧化碳、甲酸	65	—	[42]
甲烷微菌属	<i>Methanomicrobium</i>	短棒	氢气/二氧化碳、甲酸	40	6.1~6.9	[42]
甲烷叶形菌属	<i>Methanolacinia</i>	不规则杆状	氢气/二氧化碳	40	7.0	[44]
甲烷螺菌属	<i>Methanospirillum</i>	弯曲杆长螺旋丝	氢气/二氧化碳、甲酸	30~40	—	[45]

相比中温环境,当温度降低至 10℃ 时,系统内氢型产甲烷古菌甲烷杆菌目(Methanobacteriales)、乙酸型产甲烷古菌甲烷八叠球菌目(Methanosarcinales)菌群丰度均降低,系统内 VFAs 升高,甲烷产率有所下降^[46]。王华等^[47]对比不同温度条件下厌氧发酵的试验结果发现,在 10~30℃ 范围内,产甲烷古菌的产气能力随着温度的降低而减小,并且其日产气量的最高峰也随之往后推迟。当温度超过 40℃ 时,微生物菌群中的物种数量会急剧下降,47℃ 可能是中温厌氧产甲烷古菌生长的上限^[48]。

在中温厌氧消化过程中,甲烷的生成可经由乙酸营养和氢营养型产甲烷途径实现,但高温厌氧消化过程则主要通过氢营养型产甲烷途径产甲烷^[49]。虽然高温环境下的厌氧微生物群落多样性较低,但比中温却有更高的有机物降解效率,在短时间内对寄生虫卵的杀灭率较高,有更高的产气量。然而,高温厌氧消化能耗大、能源净输出降低、运行成本较高。因此,考虑到产甲烷的效率与反应器运行能耗之间的平衡,且多样性水平高的微生物菌群具有更高的抗压性和弹性,通常建议畜禽粪污厌氧消化产

生甲烷的温度为 35~37℃^[50]。

2.2 pH 对产酸代谢途径的影响

pH 的动态变化会引起微生物群落结构的变化,对系统稳定性起着至关重要的作用。产甲烷古菌对 pH 值极为敏感,当环境 pH 值维持在 6.5~7.8 时,对大多数产甲烷古菌生存比较适宜。根据图 2 厌氧消化产甲烷代谢过程可知:约 70% 甲烷是产甲烷古菌以乙酸为底物代谢的结果,目前为止,乙酸营养型产甲烷古菌只发现了甲烷八叠球菌属 *Methanosarcina* 和甲烷丝状菌属 *Methanothrix*,它们的最适 pH 范围为 6.8~7.2。而水解与产酸菌对 pH 值有较大范围的适应性,大多数产酸菌群在 pH 值为 5.0~8.5 内生长良好^[51]。当厌氧消化体系中 pH 值为 5.5 时,产甲烷速率下降 80%;pH 值 < 5.0 时,厌氧体系几乎不再产生甲烷。Sun 等^[52]研究发现,当 pH 值为 5.1 时,几乎 90% 的乙酸营养型甲烷菌和氢营养型甲烷菌在 6 d 的培养过程中从培养物中消失,低 pH 环境提高了产甲烷微生物的死亡速度,且这种抑制是不可逆的。因此,pH 也是判断厌氧消化产甲烷反应是否正常进行的重要指标。

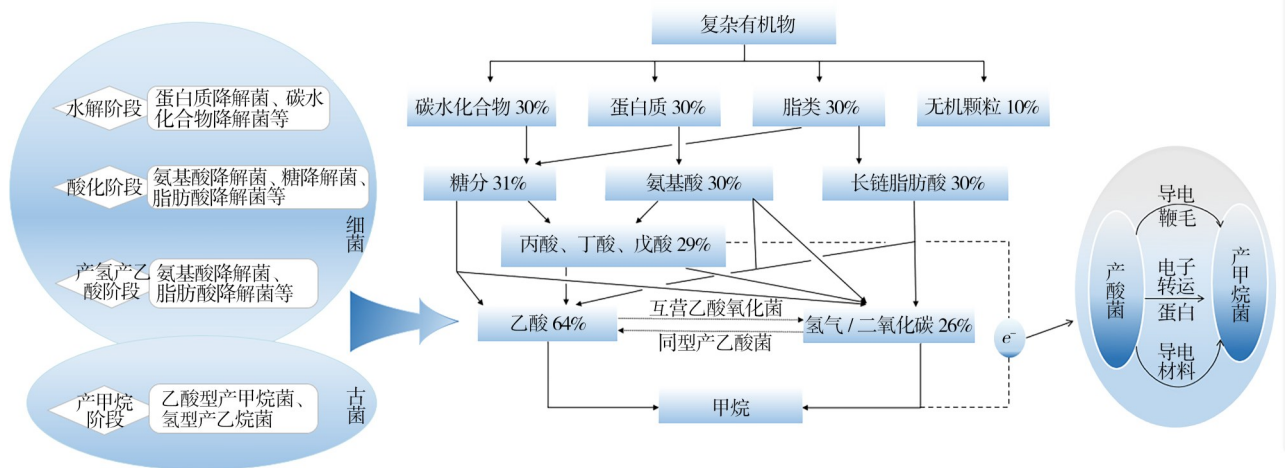


图2 厌氧消化产甲烷代谢过程

Figure 2 Anaerobic digestion methanogenic metabolic process

pH 可以改变厌氧消化过程中产酸代谢途径,导致 VFAs 的种类和含量产生很大变化^[53]。产酸代谢过程中所产生的乙酸盐、丙酸酯与丁酸酯的比例通常是 75:15:10 至 40:40:20^[54]。Jiang 等^[55]研究发现当 pH 值为 5.0 时,产酸消化的主要产物是乙酸;但当 pH 值为 6.0 或 7.0 时,主要产物则是丁酸。当厌氧发酵体系具有良好的缓冲能力时,局部的 VFAs 浓度变化过高不会显著降低体系的 pH,对甲烷转化效率不

会有显著影响,系统中产氢产乙酸菌群和产甲烷古菌群代谢动态平衡在此起着关键作用。

2.3 氮氮对厌氧消化系统的影响

在厌氧消化过程中,氮氮是微生物生长所必需的营养物质,主要由发酵原料中的含氮有机化合物降解而产生,如蛋白质、氨基酸、尿素、核酸等,并以 NH_4^+ 和 NH_3 (FAN) 分子的形态存在,二者之和为 TAN^[56]。氮氮在一定程度上可中和厌氧消化过程中

所产生的有机酸,保证厌氧消化系统具有足够的缓冲能力,维持了细胞生长所必需的中性 pH 条件,从而提高厌氧消化系统的稳定性。但粪污在厌氧消化过程中,具有含氮高的特点,过量的氨氮会对厌氧消化产生抑制,影响厌氧消化系统的性能,甚至导致其失稳^[57]。厌氧微生物对原料的 C/N 也有一定的要求,碳的消化速率比氮的速率快 30~35 倍,C/N 的最佳范围在理论上在 30~35 之间,通过加碳或氮来改变体系中的碳氮比,以维持厌氧消化反应的良好运转。

乙酸营养型产甲烷古菌 *Methanosaeta* 和 *Methanosarcina* 对氨氮更敏感,而嗜氢产甲烷古菌具有较好的氨氮耐受性。当氨氮浓度为 1300 mg/L 时,

乙酸营养型产甲烷古菌 *Methanosarcina* 开始受到抑制^[58]。当氨氮浓度升高至 3500 mg/L 以上时,嗜氢产甲烷古菌 *Methanoculleus* 也会受到不同程度的氨抑制^[59, 60]。孟晓山等^[61]研究发现,猪粪厌氧消化系统中氨氮超过 4000 mg/L,将促使产甲烷古菌群结构发生显著变化,乙酸营养型产甲烷古菌 *Methanosaeta* 逐渐被 *Methanosarcina* 代替,而氢利用型产甲烷古菌属中 *Methanospirillum* 的优势性逐渐被 *Methanoculleus* 和 *Methanomassiliicoccus* 取代,高浓度氨氮也会促使产甲烷途径由乙酸利用型为主向氢利用型为主转变。在畜禽粪污厌氧消化过程中,氨氮抑制产甲烷效果的相关情况总结见表 3。

表 3 畜禽粪污厌氧消化氨氮抑制产甲烷效果

Table 3 Results of ammonia inhibition during anaerobic digestion of livestock and poultry manure

底物	TS/%	温度/℃	TAN 浓度/(mg/L)	FAN 浓度/(mg/L)	产甲烷抑制情况	参考文献
牛粪	6.4	55	>4000	>3000	较 TAN1500 mg/L 时,减少 25%	[62]
牛粪	2.9	55	5000	3500	较抑制前减少 67.3%	[63]
牛粪	4.2	40~60	6000	>8000	较 TAN2500 mg/L 时,减少 40%	[64]
牛粪	2.0	55	6200	7000	较抑制前减少 38%	[65]
猪粪	2.3	37	1600	—	较未添加氮源减少 8%	[66]
			3200	—	较未添加氮源减少 62%	
			4000	—	较未添加氮源减少 83%	
猪粪	4.5	37	6000	—	较理论值减少 38%	[67]
		55	6000	—	较理论值减少 78%	
猪粪	15.6	25	4000	2000	较 TAN1600 mg/L 时,减少 45%	[68]
猪粪	2.0	35	4000	<1000	较 TAN1600 mg/L 时,减少 13%	
猪粪		34	>5200	—	完全不产气	
鸡粪	10	55	6000	—	较抑制前减少 50% 以上	[69]
鸡粪	3~8	55	500~3500	—	逐渐适应 OLR 的提升,未减少	[70]
鸡粪	15	40	5590	—	较抑制前减少 10%	[71]
鸡粪	30	36	6960	—	较抑制前减少 32%	[72]
			9000	—	彻底酸化,不产气	

3 进料负荷和进料方式对厌氧消化产甲烷效能的影响

3.1 水力停留时间对厌氧消化产甲烷效能的影响

有机负荷率(OLR)是运行厌氧消化系统的重要工程控制参数,通过调整 HRT 可改变系统的有机负荷,从而平衡畜禽粪污厌氧消化产酸速率与产甲烷效率,实现最佳的产气性能^[73]。厌氧消化反应器产气量会随进料有机负荷的增加而加大,但当 HRT 缩短到一定程度,则会因负荷过高而造成有机挥发酸的积累,尤其是丙酸,对厌氧消化过程产生抑制,从而导致产气量降低^[74]。HRT 从 10 d 减少到 7.5 d,促进了甲烷八叠球菌属 *Methanosarcina* 的生长,相对甲烷丝状菌属 *Methanothrix* 具有优势^[75]。单纯的粪污

厌氧消化效率相对较低,抗降解成分需要较高的 HRT。通过与餐厨垃圾、粗甘油、秸秆等物料共消化可有效提高甲烷产量。在牛粪与餐厨垃圾共消化的研究中,发现缩短 HRT(25, 20, 15, 10, 7, 5, 4 d)会减少甲烷转化率,系统中拟杆菌门(Bacteroidetes)和厚壁菌门(Firmicutes)成为优势菌,醋酸合养氧化菌(主要是 *Pelotomaculum* 和 *Pseudothermotoga*)的比例明显增加;优势产甲烷古菌由乙酸营养型产甲烷古菌转变为嗜氢型产甲烷古菌^[76, 77]。在不同的 HRT 下,不同类型底物的厌氧消化系统中产甲烷古菌变化情况见表 4。

为提高畜禽粪污的处置效率,常见的减少 HRT 的方法有混合搅拌和预处理。混合搅拌可使消化物

表 4 不同水力停留时间的厌氧消化系统产甲烷古菌变化情况

Table 4 Changes of methane archaea in anaerobic digestion system under different HRT

底物	$\rho(\text{TCOD})/(\text{g/L})$	HRT	厌氧消化系统产甲烷古菌丰度变化情况	参考文献
牛粪和食物垃圾	74.6 ± 3.5	20 d 缩短至 5 d	在 HRT 为 20 d 时, <i>Methanosarcina</i> 丰度占产甲烷古菌总丰度的 86.7%, 同时含有 <i>Methanobrevibacter</i> 、 <i>Methanospirillum</i> 、 <i>Methanosaeta</i> 等多类产甲烷古菌; 在 HRT 为 5 d 时, <i>Methanobrevibacter</i> 占比达 90% 以上, 产甲烷古菌丰度降低明显	[76]
猪粪和食物垃圾	40.0 ± 0.2	41 d 缩短至 21 d	<i>Methanobacterium</i> 和 <i>Methanobrevibacter</i> 的丰度随着 HRT 的降低而降低, <i>Methanosarcina</i> 和 <i>Methanoculleus</i> 的丰度保持相对稳定	[78]
鸡粪	494 ± 82	60 d 缩短至 40 d	缩短 HRT 使产甲烷古菌的优势菌种明显从 <i>Methanoculleus</i> 向 <i>Methanobacterium</i> 转变, <i>Methanobacterium</i> 在 HRT 为 40、60 d 时分别占比 48.45% 和 12.45%, <i>Methanoculleus</i> 在 2 个系统中分别占比 1.94% 和 83.14%	[35]
葡萄糖	0.25	2 次/d、1 次/d、0.5 次/d	所有系统以 <i>Methanosaeta</i> 为主; 在较低进料频率下, <i>Methanosaeta</i> 的丰度略有减少	[79]

料混合和分布均匀,防止物料在发酵罐底部沉淀,增大反应物与微生物的接触面积,有利于保证良好的消化速度,从而提高消化产气量。Karim 等^[80]研究发现,机械搅拌、沼气回流搅拌、出水回流搅拌和未搅拌相比,厌氧消化的产气量分别提高了 22%、15% 和 29%。预处理方法中热水解法应用最为广泛,粪污预处理后的营养成分更容易被微生物利用,厌氧消化能力提高,停留时间也相应减少^[81]。宋晓聪等^[82]将牛粪于 70℃处理 3 d 后进行厌氧消化,发现其产气量较未处理的牛粪提高了 210%,有机组分降解和木质素含量降低是产气性能提高的原因。

3.2 不同进料方式对厌氧消化产甲烷效能的影响

不同的进料方式可能造成微生物群落差异,进而影响产气率。在较高的 OLR 下,低进料频率可能在短时间内对系统造成较重的负荷冲击,高进料频次可以有效降低消化系统的负荷冲击,使系统产生的 VFAs 能够被及时消耗^[83]。序批式间歇流反应器(SBR)的低进料频次会导致底物梯度随时间变化,初始底物浓度较高。相反,连续流反应器(CFR)的长进料时间会促使系统时刻保持稳定和低底物浓度状态^[84]。Kine 等^[85]研究发现,每天进料 1 次时,丙酸的浓度峰值为 2500 mg/L,而每 2.4 h 进料 1 次时,丙酸浓度始终保持在 40 mg/L 以下。甲烷八叠球菌属 *Methanosarcina* 在间歇式进料的情况下表现出一定优势,而甲烷丝状菌属 *Methanothrix* 则表现出相反的行为^[86]。在较低 OLR 下,不同进料频次均未产生较重的负荷冲击,酸化现象一般不会出现;且无论 HRT 或进料方式的如何变化,甲烷丝状菌属 *Methanothrix* 均主要的产甲烷古菌属^[87]。

4 外部添加材料对厌氧消化产甲烷效能的提升

4.1 投加功能菌剂对厌氧消化产甲烷效能的提升

向反应系统中投入具有一定功能的微生物功能菌剂,能够在很大程度上提高生化效率,达到加快厌氧系统启动时间、缩短 HRT、增加难降解原料利用率、促进酸败系统的恢复、应对氨抑制等目标^[88]。根据目标产物的不同,可将其划分为水解产酸、产氢产乙酸、产甲烷阶段的生物强化,其促进效果见表 5。由于畜禽粪污中含有大量的木质纤维素,有效发酵成分不易降解,对水解产酸阶段生物强化,促进木质纤维原料的水解,为厌氧消化可提供更多易降解的底物。Henrik 等^[89]研究发现,向牛粪及其分离组中投加乳酸杆菌 *Caldicellulosiruptor lactoaceticus* 可以使得甲烷产率提高 10%~24%。然而,Costa 等^[90]研究发现,尽管在高温厌氧发酵畜禽粪便体系中投加热线梭菌 *Clostridium thermocellum* 及解糖纤维素分解菌 *Caldicellulosiruptor saccharolyticus*,虽然原料水解率提高了,但甲烷的产量并没有明显增多,这是由于产甲烷速率跟不上纤维素水解产酸菌速率,导致 VFAs 累积,抑制了产甲烷。通过对水解产酸阶段的生物强化,向系统中投加产氢菌,所产的沼气中氢气含量并未增加,即甲烷与氢气组分比例无明显减小,说明投加产氢菌所增加的氢气是以中间产物存在的。氢气作为产甲烷古菌的底物,被进一步用于产甲烷。此外,产氢菌的生物强化还可使甲烷菌的数量增加,即氢营养型产甲烷古菌在数量上得到了强化^[91]。

根据图 2 厌氧消化产甲烷代谢过程可知:产酸细菌和产甲烷古菌之间存在种间电子转移(IET),该方式是菌属之间互养代谢产甲烷极其重要的环节。由

表 5 生物功能菌剂对厌氧消化的促进效果

Table 5 Promoting effect of biofunctional bacteriotics on anaerobic digestion

生物强化菌	主要促进阶段	反应底物	强化效果	参考文献
<i>Caldicellusiruptor lactoaceticus</i>	水解产酸阶段	牛粪及其分离组分	提高甲烷产量 10%~24%	[92]
<i>Clostridium cellulolyticum</i>	水解产酸阶段	家禽垃圾	提高累计甲烷产量 15%	[90]
<i>Fervidobacterium pennivorans</i>	水解产酸阶段	鸡羽毛	提高水解率 40%,未提高甲烷产量	[93]
<i>Caldicellulosiruptor saccharolyticus</i>	产氢产酸阶段	猪粪	提高沼气产量 60%~70%	[94]
<i>C.saccharolyticus</i> l <i>Enterobacter Cloacae</i>	产氢产酸阶段	猪粪+甜高粱	提高沼气产率 30%	[95]
<i>Clostridium sp.WY-1 Clostridium sp.WW-5</i>	产氢产酸阶段	猪粪	提高甲烷产量 3%~11%	[96]
<i>Methanosaeta</i>	产甲烷阶段	废水	提高沼气产量 10%~12%	[97]

于较快的水解发酵产酸和较慢的产甲烷之间的不平衡,从而导致畜禽粪污厌氧消化处理负荷只能维持在相对较低效能,产甲烷效率受到了限制^[98]。IET产甲烷途径是微生物菌群降低热力学能垒、实现互养代谢快速产甲烷的核心过程。互养代谢产甲烷过程除了常见已知的种间氢转移^[99]和种间甲酸转移^[100]之外,美国马萨诸塞大学 Derek Lovley 教授团队^[101]于 2010 年在国际上首次报道了电活性微生物硫还原地杆菌 *Geobacter sulfurreducens* 和金属还原地杆菌 *Geobacter metallireducens* 之间存在直接种间电子传递(DIET)过程,这种代谢方式不需要电子穿梭体,可以突破传递过程的速率限制,能够以更高的电子转移效率或较低的能量消耗直接将电子转移至二氧化碳,将二氧化碳还原为甲烷,可极大提升产甲烷速率。目前已发现 2 类种间直接电子传递形式,一类是依靠细胞外

膜上的 c 型细胞色素,另一类是通过导电菌毛(pili)^[102]。

通过对参与 DIET 产甲烷途径的互养代谢微生物群落结构进行厌氧消化调控,增加可参与 DIET 过程的微生物丰度,进而提高产甲烷效率。Jiang 等^[92]研究发现通过添加富集的丙酸降解产甲烷培养基,培养基中所含优势菌属为甲烷丝状菌属 *Methanothrix* (66.15%~94.70%) 和甲烷杆菌属 *Methanobacterium* (4.81%~33.56%),相比与非生物强化组,系统中甲烷丝状菌属 *Methanothrix* 的丰度超过 80%,有机负荷和沼气产量分别提高 8 倍和 12 倍。目前报道的确认可以参与直接种间电子传递的菌属(表 6)可知:供电微生物多为具有胞外电子传递能力的微生物,如地杆菌属 *Geobacter*,而受电子的产甲烷古菌则主要是可以利用乙酸盐的鬃毛甲烷菌属 *Methanosaeta* 和甲烷八叠球菌属 *Methanosarcina*。

表 6 可参与种间直接电子传递型互营产甲烷过程的微生物

Table 6 Microorganisms participated in DIET-type methane production process

底物	供电微生物	受电子微生物	参考文献
乙醇	<i>Geobacter metallireducens</i>	<i>Methanothrix harundinacea</i>	[103]
乙醇	<i>Clostridium spp.</i>	<i>Methanosarcina mazei</i>	[103]
乙醇	<i>Syntrophomonadaceae</i>	<i>Methanosarcinaceae</i>	[104]
乙醇	<i>Geobacter metallireducens</i>	<i>Methanosarcina barkeri</i>	[105]
乙醇	<i>Geobacter metallireducens</i>	<i>Methanosarcina acetivorans</i>	[105]
乙醇、葡萄糖	<i>Bacteroidales,Corynebacterium</i>	<i>Methanosarcina spp.</i>	[106]
乙酸盐	<i>Geobacter metallireducens</i>	<i>Methanosarcina barkeri</i>	[105]
乙酸	<i>Proteiniclasticum,Kosmotoga</i>	<i>Methanosarcina spp.</i>	[103]
1-丁醇	<i>Geobacter</i>	<i>Methanosaeta</i>	[105]
硫代硫酸盐	<i>Rhodospseudomonas palustris</i>	<i>Methanosarcina barkeri</i>	[107]
牛粪	<i>Clostridium</i>	<i>Methanosarcina spp.</i>	[108]

微生物功能菌剂投加成功的关键是能否在系统中持久稳定地发挥作用,所投加的微生物功能菌繁殖速度需高于其被土著菌吞噬及流失的速度,保证生物强化菌剂在被强化体系内的生物净持有量。为增加生物强化菌剂在被强化体系中的稳定性,可将生物强化菌剂固定化在载体上再进行投加,固定化

的载体主要有沸石、海泡石等^[109, 110]。对于连续流系统,在不断地进出料冲击及土著微生物的竞争下,微生物功能菌剂容易逐渐被淘汰,定期多次投加生物强化菌剂效果优于一次性投加^[111]。

4.2 投加导电材料对厌氧消化产甲烷效能的提升

采用导电材料强化 DIET 产甲烷途径的畜禽粪污

厌氧处理技术,是提高畜禽粪污资源利用的有效途径和研究热点。在厌氧系统中投加外源导电材料(如颗粒活性炭^[112]、碳布^[113]、生物炭^[114]、石墨烯^[115]、磁铁矿^[116]、磁性颗粒活性炭^[117]、聚苯胺^[118]等)可强化甲烷八叠球菌属 *Methanosarcina* 等产甲烷功能菌参与 DIET 过程,进而提高厌氧体系甲烷转化效率,其具体影响效果见表 7。外源导电材料具有高导电性、化学稳定性、吸附能力强等特点,能够作为生物导电连接重要补充;同时,不需要微生物消耗能量以合成生物电连接的自身导电结构,微生物可以利用更多能量于代谢作用。Pan 等^[119]研究发现,添加生物炭可以提

高鸡粪、牛粪及其混合物的产气潜力,并能提高所产沼气的甲烷含量,通过吸附作用,降低氨氮和硫化氢的含量。Lee 等^[120, 121]研究发现在系统中投加生物炭和活性炭后,其表面富集了鬃毛甲烷菌属 *Methanosaeta*、甲烷螺菌属 *Methanospirillum* 和甲烷杆菌属 *Methanobacterium* 等产甲烷古菌。Zeng 等^[122]探究了碳基导电材料负载核黄素后对畜禽粪污厌氧消化的影响,通过投加核黄素改变了微生物群落结构并提高了与 DIET 相关的功能基因丰度,最终提高了反应器的容积产气率和有机物去除率。

表 7 导电材料对畜禽粪污的厌氧消化影响

Table 7 Effect of conductive materials on anaerobic digestion of livestock and poultry manure

碳基导电材料	底物	剂量	产甲烷促进效果	参考文献
生物炭	秸秆和鸡粪	0.1 g/L	提高甲烷产量 27.8%~96.4%	[123]
纳米四氧化三铁	猪粪	—	提高甲烷产量 17.37%	[124]
微米级 Fe ⁰	猪粪	75 mmol/L	提高甲烷产量 23.9%	[125]
W-碳基	活性污泥+牛粪	5 g/L	缩短厌氧消化时间,甲烷产量提高 58.8%	[126]
颗粒活性炭	鸡粪	100 g/L	提高甲烷产量 26.7%	[127]
生物炭	鸡粪	5%(占干物质比例)	提高甲烷产量 68.97%	[128]
磁铁矿	鸡粪	100 g/L	提高甲烷产量 2.8%	[127]

4.3 投加非导电材料对厌氧消化产甲烷效能的提升

在厌氧系统中投加外源非导电材料(如尼龙纤维^[129]、聚乙烯^[130]、碱性树脂^[131]等)也可强化厌氧体系产甲烷效率。非导电材料能够提升甲烷产率主要是因其比表面积大,易于吸附定植相关功能微生物,如厌氧消化细菌、产甲烷古菌等,使其能够高效地参与到厌氧消化过程,部分载体还具有吸附能力、离子交换能力、优化菌群结构等特点^[132]。不同材质类型、粒径及浓度对厌氧消化的影响存在较大的差异,还有可能存在抑制厌氧消化的情况。Zhang 等^[133]发现在 55, 65 °C 下,聚乙烯塑料的存在能使奶牛粪污厌氧消化的甲烷产量分别提高 8.4%、41.2%, COD 降解率分别提高到 52.8% 和 52.4%。而厌氧消化系统中塑料含量超过 0.2 g/L 对厌氧消化有不良影响,甲烷产量减少了 17.9%~19.3%,这是由于厌氧消化系统中存在的微塑料物质影响了微生物种群的丰度和结构,使得甲烷杆菌属 *Methanobacterium* 和鬃毛甲烷菌属 *Methanosaeta* 的丰度降低^[134]。

5 结束语

厌氧消化技术是处置畜禽粪污有效手段,通过对比分析牛粪、猪粪、鸡粪的粪污特性,牛粪因含有

较多不易降解有机组分进而产甲烷潜力最低,鸡粪因含有较多营养物质进而产甲烷潜力最高。适宜的温度、pH、氨氮等环境条件是保障畜禽粪污厌氧消化稳定性运行的基础。基于系统产甲烷微生物的代谢环境要求,pH、氨氮变化也成为判断厌氧消化产甲烷反应是否正常进行的重要指标。不同的 HRT、进料方式能够改变系统产甲烷古菌类型,也会对禽粪污厌氧消化产甲烷效能产生影响。基于厌氧消化影响的关键因素探究,通过功能菌剂、导电材料等材料的投加,调控系统功能性微生物群落丰度,强化电活性微生物之间的直接种间电子传递,促进厌氧消化高负荷运行,进而提升产甲烷效能。未来的畜禽粪污厌氧消化产甲烷效能提升研究,应重点关注以下方面:

1) 产甲烷古菌的 DIET 代谢路径机制研究。从细胞水平对产甲烷古菌的 DIET 代谢路径进行优化提速,是提高系统有机质转化率以及容积负荷的重点突破口。产甲烷速率低于产酸速率时,有机酸在体系中积累造成系统酸化,酸积累导致厌氧发酵系统酸化的抑制作用。随着微生物菌群种间电子传递研究的深入,产甲烷功能菌株、导电材料也逐渐成为厌氧发酵失稳调控策略的研究热点,如何构建特异性

产甲烷功能菌株、改性导电材料来提高厌氧发酵系统稳定性和处理效率,成为理论研究亟待解决的问题。

2)智能化调控的厌氧消化装备研发。为精确控制厌氧消化过程中的关键参数,如温度、pH值、搅拌强度、进料负荷等,创造最适宜微生物生长和产甲烷的环境条件,可通过先进的传感器技术和在线监测设备,实时监测厌氧消化过程中的各项参数,建立智能化的控制系统,进而实现对消化过程的精准调控。基于自动化运行控制,及时调整工艺参数,可避免因参数波动导致的系统不稳定和产甲烷效率下降。

参考文献

- [1] 农业部,国家发展改革委,财政部,等. 关于印发《关于推进农业废弃物资源化利用试点的方案》的通知[R]. 中华人民共和国农业部公报, 2016(10): 4-7.
Ministry of Agriculture, National Development and Reform Commission, Ministry of Finance, etc. Notice on Printing and Distributing the *Plan for Promoting the Pilot Program of Agricultural Waste Resource Utilization* [R]. Gazette of the Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2016(10): 4-7.
- [2] 生态环境部,国家统计局,农业农村部等. 第二次全国污染源普查公报[J]. 环境保护, 2020,48(18): 8-10.
Ministry of Ecology and Environment, National Bureau of Statistics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, et al. The second national pollution source census bulletin [J]. Environmental Protection, 2020, 48(18): 8-10.
- [3] WU D, LI L, PENG Y, et al. State indicators of anaerobic digestion: A critical review on process monitoring and diagnosis [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 148: 111260.
- [4] 吴浩伟,孙小淇,梁博文,等. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J]. 农业环境科学学报, 2020,39(6): 1168-1176.
WU H W, SUN X Q, LIANG B W, et al. Analysis of the current situation of livestock and poultry manure pollution and its treatment and resource utilization in China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(6): 1168-1176.
- [5] 程东,徐伟东,张启成,等. 厌氧消化影响因素的研究进展[J]. 广东化工, 2024,51(18): 62-65.
CHENG D, XU W D, Zhang Q C, et al. Research progress on influencing factors of anaerobic digestion [J]. Guangdong Chemical Industry, 2024, 51(18): 62-65.
- [6] XIA Y, MASSÉ D I, MCALLISTER T A, et al. Anaerobic digestion of chicken feather with swine manure or slaughterhouse sludge for biogas production [J]. Waste Management, 2012, 32(3): 404-409.
- [7] LANGE M, AHRING B K. A comprehensive study into the molecular methodology and molecular biology of methanogenic Archaea [J]. FEMS Microbiol Rev, 2001,25(5): 553-571.
- [8] 任师杰,孔令豆,刘骏,等. 产甲烷古菌的分类及代谢途径研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2024,44(9): 100-112.
Ren S J, KONG L D, LIU J, et al. Research progress on the classification and metabolic pathways of Methanogenic archaea [J]. China Biotechnology, 2024, 44(9): 100-112.
- [9] WANG L, ZHOU Q, LI F. Avoiding propionic acid accumulation in the anaerobic process for biohydrogen production [J]. Biomass and Bioenergy, 2006,30(2): 177-182.
- [10] ZOU C, LIN M, MA F, et al. Development, challenges and strategies of natural gas industry under carbon neutral target in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 476-497.
- [11] 李飞跃,吴旋,李俊锁,等. 畜禽粪便生物炭固碳量、养分量的估算及田间施用潜在风险预测[J]. 农业环境科学学报, 2019,38(9): 2202-2209.
LI F Y, WU X, LI J S, et al. Estimation of carbon sequestration and nutrient content of biochar from livestock and poultry manure and prediction of potential risks in field application [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(9): 2202-2209.
- [12] ILELEJI K. E. M C J D. Basics of energy production through anaerobic digestion of livestock manure [J]. Bioenergy, 2015(1): 287-295.
- [13] 韩娅新,张成明,陈雪兰,等. 不同农业有机废弃物产甲烷特性比较[J]. 农业工程学报, 2016,32(1): 258-264.
HAN Y X, ZHANG C M, CHEN X L, et al. Comparison of methane production characteristics of different agricultural organic wastes [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 258-264.
- [14] 穆兰,徐凤莲,程占军,等. 瘤胃微生物厌氧消化降解木质纤维素废弃物技术研究进展[J]. 能源环境保护, 2024,38(5): 78-91.
MU L, XU F L, CHENG Z J, et al. Research progress on anaerobic digestion technology of rumen microorganisms for degrading lignocellulosic wastes [J]. Energy Environmental Protection, 2024, 38(5): 78-91.
- [15] 邵希豪,黄金平. 十种沼气发酵原料的产气潜力[J]. 江西省科学院院刊, 1984(3): 56-59.
SHAO X H, HUANG J P. Gas Production potential of ten kinds of biogas fermentation raw materials [J]. Journal of Jiangxi Academy of Sciences, 1984(3): 56-59.
- [16] 简树贤,马文林,李荣旗,等. 牛粪最大甲烷生产能力及其发酵过程实验研究[J]. 中国沼气, 2013,31(2): 21-25.
JIAN S X, MA W L, LI R Q, et al. Experimental study on maximum methane production capacity of cow dung and its fermentation process [J]. China Biogas, 2013, 31(2): 21-25.
- [17] COARITA Fernandez H, TEIXEIRA Franco R, BAYARD R, et al. Mechanical pre-treatments evaluation of cattle manure before anaerobic digestion [J]. Waste and Biomass Valorization, 2020, 11(10): 5175-5184.

- [18] SIDDIQUE M N I, WAHID Z A. Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 194: 359–371.
- [19] XING B, CAO S, HAN Y, et al. Stable and high-rate anaerobic co-digestion of food waste and cow manure: optimisation of start-up conditions[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 307: 123195.
- [20] 董利锋, 付敏, 陈天宝, 等. 反刍动物瘤胃优势产甲烷菌菌群结构及多样性研究进展[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(9): 3927–3935.
- DONG L F, FU M, CHEN T B, et al. Research progress on the community structure and diversity of dominant methanogenic bacteria in the rumen of ruminants[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(9): 3927–3935.
- [21] 刘鑫, 姜鑫, 李洋, 等. 瘤胃微生物对甲烷生成的互作效应及减排措施[C]//第十二届中国牛业发展大会, 遵义, 2017: 6.
- LIU X, JIANG X, LI Y, et al. Interaction effects of rumen microorganisms on methane generation and mitigation measures [C]//The 12th China Cattle Industry Development Conference, Zunyi, China, 2017: 6.
- [22] KONRAD O, MARDER M, MÖRS J, et al. Digestates from the co-digestion of cattle rumen and manure improve the methane potential of maize silage [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2023, 24: 101625.
- [23] 刘翌晨, 马文林. 猪粪中有机成分对生物产甲烷潜力的影响研究[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(2): 102–107.
- LIU Y C, MA W L. Research on the influence of organic components in pig manure on biogenic methane potential [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(2): 102–107.
- [24] NAGARAJAN D, KUSMAYADI A, YEN H, et al. Current advances in biological swine wastewater treatment using microalgae-based processes [J]. *Bioresour Technol*, 2019, 289: 121718.
- [25] 郑苇, 刘淑玲, 靳俊平. 不同清粪工艺下猪、牛、鸡养殖场粪水和污水厌氧消化技术探讨[J]. *环境卫生工程*, 2017, 25(5): 58–60.
- ZHENG W, LIU S L, JIN J P. Discussion on anaerobic digestion technology of manure water and sewage from pig, cattle and chicken farms under different manure cleaning processes [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2017, 25(5): 58–60.
- [26] 陈欣, 涂德浴, 隋倩雯, 等. 固体浓度对猪粪厌氧消化甲烷产出特性的影响[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(2): 149–155.
- CHEN X, TU D Y, SUI Q W, et al. Influence of solid concentration on methane production characteristics of anaerobic digestion of pig manure[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(2): 149–155.
- [27] 李跻, 郭旭宏. 鸡粪的发酵处理方法与利用[J]. *农业科学研究*, 2007, 28(3): 97–98.
- LI J, GUO X H. Fermentation treatment methods and utilization of chicken manure[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2007, 28(3): 97–98.
- [28] 王磊, 张永东, 马斌, 等. 鸡粪的资源化利用途径[J]. *畜牧兽医学杂志*, 2016, 35(6): 81–82, 84.
- WANG L, ZHANG Y D, MA B, et al. Resource utilization ways of chicken manure[J]. *Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2016, 35(6): 81–82, 84.
- [29] 乔玮, 毕少杰, 尹冬敏, 等. 鸡粪中高温厌氧甲烷发酵产气潜能与动力学特性[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(1): 234–243.
- QIAO W, BI S J, YIN D M, et al. Methane fermentation gas production potential and kinetic characteristics of high-temperature anaerobic fermentation of chicken manure[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(1): 234–243.
- [30] FUCHS W, WANG X, GABAUER W, et al. Tackling ammonia inhibition for efficient biogas production from chicken manure: Status and technical trends in Europe and China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 97: 186–199.
- [31] SHAPOVALOV Y, ZHADAN S, BOCHMANN G, et al. Dry anaerobic digestion of chicken manure: a review [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(21): 7825.
- [32] 宋亚朋, 乔玮, 胡婉蓉, 等. 高固体浓度鸡粪厌氧消化氨氮耐受性能研究: 以长期实验为例[J]. *中国沼气*, 2023, 41(3): 33–40.
- SONG Y P, QIAO W, HU W R, et al. Study on ammonia nitrogen tolerance of anaerobic digestion of chicken manure at high solid concentration: a case of long-term experiment [J]. *China Biogas*, 2023, 41(3): 33–40.
- [33] BI S, WESTERHOLM M, QIAO W, et al. Enhanced methanogenic performance and metabolic pathway of high solid anaerobic digestion of chicken manure by Fe^{2+} and Ni^{2+} supplementation[J]. *Waste Management*, 2019, 94: 10–17.
- [34] BI S, WESTERHOLM M, QIAO W, et al. Metabolic performance of anaerobic digestion of chicken manure under wet, high solid, and dry conditions [J]. *Bioresour Technol*, 2020, 296: 122342.
- [35] 胡婉蓉. 水力停留时间对鸡粪高固体厌氧消化性能的影响研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
- HU W R. Study on the Influence of Hydraulic Retention Time on the Performance of High Solid Anaerobic Digestion of Chicken Manure[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2021.
- [36] 田光亮. 云南亚热带户用沼气池模拟系统中原核生物群落动态研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2016.
- TIAN G L. Study on the Prokaryotic Community Dynamics in the Simulated System of Household Biogas Digesters in Subtropical Yunnan[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2016.
- [37] ARIKAN O A, MULBRY W, LANSING S. Effect of temperature on methane production from field-scale anaerobic digesters treating dairy manure [J]. *Waste Management*, 2015, 43: 108–113.
- [38] ZHANG J, DONG H, LIU D, et al. Microbial reduction of Fe (III) in smectite minerals by thermophilic methanogen *Methanothermobacter thermautotrophicus* [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 106: 203–215.

- [39] 田琪, 王佳, 范晓蕾, 等. 海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态[J]. 环境科学, 2014, 35(6).
- TIAN Q, WANG J, FAN X L, et al. Methanogenic activity and microbial ecology of sediments from offshore oil and gas fields[J]. Environmental Science, 2014, 35(6).
- [40] PRAKASH D, CHAUHAN S S, FERRY J G, et al. Life on the thermodynamic edge: Respiratory growth of an acetotrophic methanogen[J]. Science advances, 2019, 5(8): eaaw9059.
- [41] MA K, LIU X, DONG X. *Methanobacterium beijingen* sp. nov., a novel methanogen isolated from anaerobic digesters[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2005, 55(1): 325-329.
- [42] LEE M Y, CHEON J H, HIDAKA T, et al. The performance and microbial diversity of temperature-phased hyperthermophilic and thermophilic anaerobic digestion system fed with organic waste[J]. Water Science and Technology, 2008, 57(2): 283-289.
- [43] TAPIO I, SNELLING T J, STROZZI F, et al. The ruminal microbiome associated with methane emissions from ruminant livestock[J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2017, 8(1).
- [44] MOCHIMARU H, TAMAKI H, KATAYAMA T, et al. *Methanomicrobium antiquum* sp. nov., a hydrogenotrophic methanogen isolated from deep sedimentary aquifers in a natural gas field[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2016, 66(11): 4873-4877.
- [45] ZHOU L, LIU X, DONG X. *Methanospirillum psychrodurum* sp. nov., isolated from wetland soil[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2014, 64 (Pt_2): 638-641.
- [46] 刘智斌, 刘秀红, 周桐, 等. 温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4141-4149.
- LIU Z B, LIU X H, ZHOU T, et al. Influence of temperature on the operation performance and bacterial community structure of anaerobic biological filters for municipal sewage[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4141-4149.
- [47] 王华, 杨光, 刘小刚, 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.
- WANG H, YANG G, LIU X G, et al. Study on the influence of temperature on the gas-producing ability of biogas bacterial community and the changes of the community[J]. Acta Agriculturae Borealioccidentalis Sinica, 2008, 17(5): 294-297.
- [48] WRÓBEL-KWIATKOWSKA M, JABŁOŃSKI S, SZPERLIK J, et al. Impact of CAD-deficiency in flax on biogas production[J]. Transgenic Research, 2015, 24(6): 971-978.
- [49] RICHEN LIN J C L D. Improved efficiency of anaerobic digestion through direct interspecies electron transfer at mesophilic and thermophilic temperature ranges[J]. Chemical Engineering Journal, 2018(5): 173.
- [50] SAKAR S, YETILMEZSOY K, KOC AK E. Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment — a literature review[J]. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, 2009, 27(1): 3-18.
- [51] 唐宇轩, 韩志刚, 蒋小妹, 等. 猪场废水厌氧消化液好氧处理最适pH值的研究[J]. 中国沼气, 2021, 39(2): 3-9.
- TANG Y X, HAN Z G, JIANG X M, et al. Study on the optimal pH value for the aerobic treatment of anaerobic digestion liquid of pig farm wastewater[J]. China Biogas, 2021, 39(2): 3-9.
- [52] SUN M, LIU B, YANAGAWA K, et al. Effects of low pH conditions on decay of methanogenic biomass[J]. Water Research, 2020, 179: 115883.
- [53] 赵维鑫, 黄志勇, 黄津辉, 等. 厌氧消化酸抑制研究进展[J]. 微生物学通报, 2020, 47(10): 3442-3450.
- ZHAO W X, HUANG Z Y, HUANG J H, et al. Research progress on acid inhibition in anaerobic digestion[J]. Microbiology China, 2020, 47(10): 3442-3450.
- [54] MA J, FREAR C, WANG Z, et al. A simple methodology for rate-limiting step determination for anaerobic digestion of complex substrates and effect of microbial community ratio[J]. Bioresource Technology, 2013, 134: 391-395.
- [55] JIANG J, ZHANG Y, LI K, et al. Volatile fatty acids production from food waste: effects of pH, temperature, and organic loading rate[J]. Bioresour Technol, 2013, 143: 525-530.
- [56] JIAN LIN CHEN R O T W. Toxicants inhibiting anaerobic digestion: a review[J]. Biotechnology Advance, 2014(10): 5.
- [57] 刘健峰. 不同氮素对厌氧消化系统的影响及其转化机制研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2022.
- LIU J F. Research on the Influence of Different Nitrogen Sources on Anaerobic Digestion System and Their Transformation Mechanisms[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2022.
- [58] FOTIDIS I A, KARAKASHEV D, KOTSPOULOS T A, et al. Effect of ammonium and acetate on methanogenic pathway and methanogenic community composition[J]. FEMS Microbiol Ecol, 2013, 83(1): 38-48.
- [59] NIU Q, QIAO W, QIANG H, et al. Microbial community shifts and biogas conversion computation during steady, inhibited and recovered stages of thermophilic methane fermentation on chicken manure with a wide variation of ammonia[J]. Bioresource Technology, 2013, 146: 223-233.
- [60] NIU Q, KUBOTA K, QIAO W, et al. Effect of ammonia inhibition on microbial community dynamic and process functional resilience in mesophilic methane fermentation of chicken manure[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2015, 90(12): 2161-2169.
- [61] 孟晓山, 张玉秀, 隋倩雯, 等. 氨氮浓度对猪粪厌氧消化及产甲烷菌群结构的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(8): 2346-2356.
- MENG X S, ZHANG Y X, SUI Q W, et al. Influence of ammonia nitrogen concentration on anaerobic digestion of pig manure and the structure of methanogenic flora[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(8): 2346-2356.
- [62] SINGH R, HANS M, KUMAR S, et al. Thermophilic anaerobic

- digestion: an advancement towards enhanced biogas production from lignocellulosic biomass[J]. *Sustainability*, 2023, 15(3): 1859.
- [63] WANG H, FOTIDIS I A, ANGELIDAKI I. Ammonia - LCFA synergetic co-inhibition effect in manure-based continuous biomethanation process[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 209: 282-289.
- [64] 张寓涵, 潘云霞, 贺亚清, 等. 不同氮源对猪粪废水厌氧发酵中氨抑制效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(4): 955-962.
- ZHANG Y H, PAN Y X, HE Y Q, et al. Influence of different nitrogen sources on ammonia inhibition in anaerobic fermentation of pig manure wastewater[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(4): 955-962.
- [65] 孟晓山. 高含固率猪粪污水厌氧消化特征及其氨氮抑制的研究[D]. 北京: 北京矿业大学(北京), 2019.
- MENG X S. Research on Anaerobic Digestion Characteristics of High-solid-content Pig Manure and Its Ammonia Nitrogen Inhibition [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2019.
- [66] 高文萱, 张克强, 梁军锋, 等. 氨胁迫对猪粪厌氧消化性能的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015(10): 1997-2003.
- GAO W X, ZHANG K Q, LIANG J F, et al. Influence of ammonia stress on the anaerobic digestion performance of pig manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015(10): 1997-2003.
- [67] 卢振威, 孔德望, 张克强, 等. 不同温度下猪粪厌氧发酵的氨胁迫效应[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(10): 3297-3305.
- LU Z W, KONG D W, ZHANG K Q, et al. Ammonia stress effects of anaerobic fermentation of pig manure at different temperatures[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(10): 3297-3305.
- [68] GARCIA M L, ANGENT L T. Interaction between temperature and ammonia in mesophilic digesters for animal waste treatment[J]. *Water Research*, 2009, 43(9): 2373-2382.
- [69] NIU Q, TAKEMURA Y, KUBOTA K, et al. Comparing mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of chicken manure: Microbial community dynamics and process resilience[J]. *Waste Management*, 2015, 43: 114-122.
- [70] DALKILIC K, UGURLU A. Biogas production from chicken manure at different organic loading rates in a mesophilic-thermophilic two stage anaerobic system[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2015, 120(3): 315-322.
- [71] NIE H, JACOBI H F, STRACH K, et al. Mono-fermentation of chicken manure: Ammonia inhibition and recirculation of the digestate[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 178: 238-246.
- [72] SUN C, CAO W, BANKS C J, et al. Biogas production from undiluted chicken manure and maize silage: A study of ammonia inhibition in high solids anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 218: 1215-1223.
- [73] 许一平. HRT对厌氧消化系统运行效能及丙酸氧化菌群的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- XU Y P. Influence of HRT on the Operation Efficiency of Anaerobic Digestion System and the Propionate-oxidizing Bacterial Community[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [74] 代曦. 不同负荷提升方式诱导超负荷对猪粪厌氧消化稳定性及其微生物群落结构影响研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2022.
- DAI X. Research on the Influence of Different Load-increasing Methods Inducing Overload on the Stability of Anaerobic Digestion of Pig Manure and Its Microbial Community Structure [D]. Nanchong: China West Normal University, 2022.
- [75] LÜ W, ZHANG W, YU Z. Volume ratios between the thermophilic and the mesophilic digesters of a temperature-phased anaerobic digestion system affect their performance and microbial communities [J]. *N Biotechnol*, 2016, 33(1): 245-254.
- [76] BI S, HONG X, YANG H, et al. Effect of hydraulic retention time on anaerobic co-digestion of cattle manure and food waste [J]. *Renewable Energy*, 2020, 150: 213-220.
- [77] LI Q, YUWEN C, CHENG X, et al. Responses of microbial capacity and community on the performance of mesophilic co-digestion of food waste and waste activated sludge in a high-frequency feeding CSTR [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 260: 85-94.
- [78] DENNEHY C, LAWLOR P G, MCCABE M S, et al. Anaerobic co-digestion of pig manure and food waste; effects on digestate biosafety, dewaterability, and microbial community dynamics [J]. *Waste Manag*, 2018, 71: 532-541.
- [79] PIAO Z H, LEE J, KIM J Y. Effect of substrate feeding frequencies on the methane production and microbial communities of laboratory-scale anaerobic digestion reactors [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2018, 20(1): 147-154.
- [80] KARIM K, HOFFMANN R, KLASSON T, et al. Anaerobic digestion of animal waste: Waste strength versus impact of mixing [J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(16): 1771-1781.
- [81] WANG M, LI R, ZHAO Q. Distribution and removal of antibiotic resistance genes during anaerobic sludge digestion with alkaline, thermal hydrolysis and ultrasonic pretreatments [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13(3).
- [82] 宋晓聪, 李秀金, 左晓宇等. 水热预处理对提高牛粪厌氧产甲烷性能的研究[J]. *中国沼气*, 2019, 37(4): 23-29.
- SONG X C, LI X J, ZUO X Y, et al. Study on hydrothermal pretreatment to improve anaerobic methane production performance of cow dung [J]. *China Biogas*, 2019, 37(4): 23-29.
- [83] QIAN LI H L G W. Effects of loading rate and temperature on anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge in a high frequency feeding system, looking in particular at stability and efficiency [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 237: 231-239.

- [84] CHANG H, DU B, HE K, et al. Mechanistic understanding of acclimation and energy metabolism of acetoclastic methanogens under different substrate-to-microorganism ratios [J]. Environ Res, 2024, 252(Pt 3): 118911.
- [85] KINE SVENSSON L P J C. Feeding frequency influences process performance and microbial community composition in anaerobic digesters treating steam exploded food waste [J]. Bioresource Technology, 2018(269): 276-284.
- [86] BONK F, POPP D, WEINRICH S, et al. Intermittent fasting for microbes: how discontinuous feeding increases functional stability in anaerobic digestion [J]. Biotechnology for Biofuels, 2018, 11(1).
- [87] KINE SVENSSON L P J C. Feeding frequency influences process performance and microbial community composition in anaerobic digesters treating steam exploded food waste [J]. Bioresource Technology, 2018, 269: 276-284.
- [88] SHIN S G, HAN G, LIM J, et al. A comprehensive microbial insight into two-stage anaerobic digestion of food waste-recycling wastewater [J]. Water Research, 2010, 44(17): 4838-4849.
- [89] HENRIK BANGSØ NIELSEN Z M B K. Bioaugmentation of a two-stage thermophilic (68-C/55-C) anaerobic digestion concept for improvement of the methane yield from cattle manure [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2007, 97(6): 1638-1643.
- [90] COSTA J C, BARBOSA S G, ALVES M M, et al. Thermochemical pre- and biological co-treatments to improve hydrolysis and methane production from poultry litter [J]. Bioresource Technology, 2012, 111: 141-147.
- [91] 王硕. 产氢产乙酸优势菌群构建及其对厌氧消化系统的强化效应[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- WANG S. Construction of Hydrogen-and Acetate-producing Dominant Bacterial Flora and Its Enhancement Effect on Anaerobic Digestion System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [92] JIANG J, LI L, LI Y, et al. Bioaugmentation to enhance anaerobic digestion of food waste: Dosage, frequency and economic analysis [J]. Bioresource Technology, 2020, 307: 123256.
- [93] COSTA J C, BARBOSA S G, SOUSA D Z. Effects of pre-treatment and bioaugmentation strategies on the anaerobic digestion of chicken feathers [J]. Bioresource Technology, 2012, 120: 114-119.
- [94] BAGI Z, ÁCS N, BÁLINT B, et al. Biotechnological intensification of biogas production [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, 76(2): 473-482.
- [95] KOVÁCS K L, ÁCS N, KOVÁCS E, et al. Improvement of biogas production by bioaugmentation [J]. BioMed Research International, 2013: 1-7.
- [96] 王芳, 刘晓飞, 刘晓风, 等. 产氢菌对沼气发酵的生物强化作用 [J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(2): 351-355.
- WANG F, LIU X F, LIU X F, et al. Biotechnological intensification of biogas fermentation by hydrogen producing bacteria [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2013, 19(2): 351-355.
- [97] MATTIASSON S J B. Acclimatization of methanogenic consortia for low pH biomethanation process [J]. Biotechnology Letters, 1998, 20(8): 771-775.
- [98] WANG T, ZHANG D, DAI L, et al. Magnetite triggering enhanced direct interspecies electron transfer: a scavenger for the blockage of electron transfer in anaerobic digestion of high-solids sewage sludge [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(12): 7160-7169.
- [99] ZHANG H, MA W, XIE B, et al. (NaI/2Bi1/2)/TiO₃-based lead-free co-fired multilayer actuators with large strain and high fatigue resistance [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2019, 102(10): 6147-6155.
- [100] HATTORI S, LUO H, SHOUN H, et al. Involvement of formate as an interspecies electron carrier in a syntrophic acetate-oxidizing anaerobic microorganism in coculture with methanogens [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2001, 91(3): 294-298.
- [101] SUMMERS Z M, FOGARTY H E, LEANG C, et al. Direct exchange of electrons within aggregates of an evolved syntrophic coculture of anaerobic bacteria [J]. Science, 2010, 330(6009): 1413-1415.
- [102] REGUERA G, MCCARTHY K D, MEHTA T, et al. Extracellular electron transfer via microbial nanowires [J]. Nature, 2005, 435(7045): 1098-1101.
- [103] ROTARU A, SHRESTHA P M, LIU F, et al. A new model for electron flow during anaerobic digestion: direct interspecies electron transfer to Methanosaeta for the reduction of carbon dioxide to methane [J]. Energy Environ. Sci., 2014, 7(1): 408-415.
- [104] LI H, CHANG J, LIU P, et al. Direct interspecies electron transfer accelerates syntrophic oxidation of butyrate in paddy soil enrichments [J]. Environmental Microbiology, 2015, 17(5): 1533-1547.
- [105] ROTARU A, SHRESTHA P M, LIU F, et al. Direct interspecies electron transfer between Geobacter metallireducens and Methanosarcina barkeri [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, 80(15): 4599-4605.
- [106] 马金莲. 磁铁矿促进有机质厌氧降解过程及微生物机制初探 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- MA J L. Preliminary Study on the Process of Magnetite Promoting Anaerobic Degradation of Organic Matter and Its Microbial Mechanism [D]. Beijing: Environmental Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [107] YIN Q. Enhancing electron transfer by ferroferric oxide during the anaerobic treatment of synthetic wastewater with mixed organic carbon [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016: S0472996277.
- [108] 李莹, 郑世玲, 张洪霞, 等. 产甲烷分离物中 *Clostridium* spp.

- 与 *Methanosarcina barkeri* 潜在的种间直接电子传递[J]. 微生物学通报, 2017, 44(3): 591-600.
- LI Y, ZHENG S L, ZHANG H X, et al. Potential interspecies direct electron transfer between *Clostridium* spp. and *Methanosarcina barkeri* in methanogenic isolates [J]. Microbiology China, 2017, 44(3): 591-600.
- [109] 赵军, 曹亚莉, 骆海鹏, 等. 固定化甲烷八叠球菌处理高浓度有机废水的研究[J]. 可再生能源, 2002(4): 10-13.
- ZHAO J, CAO Y L, LUO H P, et al. Study on treatment of high-concentration organic wastewater by immobilized methanosarcina [J]. Renewable Energy Resources, 2002(4): 10-13.
- [110] MILAN Z, VILLA P, SANCHEZ E, et al. Effect of natural and modified zeolite addition on anaerobic digestion of piggery waste [J]. Water Sci Technol, 2003, 48(6): 263-269.
- [111] 杨玉楠, 陈亚松, 杨敏. 利用白腐菌生物预处理强化秸秆发酵产甲烷研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5): 1968-1972.
- YANG Y N, CHEN Y S, YANG M. Research on strengthening straw fermentation to produce methane by biological pretreatment with white-rot fungi [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(5): 1968-1972.
- [112] YUQING LEI D S Y D, HOLMES D E. Metagenomic analysis reveals that activated carbon aids anaerobic digestion of raw incineration leachate by promoting direct interspecies electron transfer [J]. Water Research, 2019, 161: 570-580.
- [113] YAN DANG D E H Z, ZHANG D S L W. Enhancing anaerobic digestion of complex organic waste with carbon-based conductive materials [J]. Bioresource Technology, 2016, 220: 516-522.
- [114] CHEN S, ROTARU A, SHRESTHA P M, et al. Promoting interspecies electron transfer with biochar [J]. Scientific Reports, 2014, 4(1).
- [115] WU B, LIN R, KANG X, et al. Graphene addition to digestion of thin stillage can alleviate acidic shock and improve biomethane production [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(35): 13248-13260.
- [116] YIN Q, YANG S, WANG Z, et al. Clarifying electron transfer and metagenomic analysis of microbial community in the methane production process with the addition of ferroferric oxide [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 333: 216-225.
- [117] SONG X, LIU J, JIANG Q, et al. Enhanced electron transfer and methane production from low-strength wastewater using a new granular activated carbon modified with nano- Fe_3O_4 [J]. Chemical Engineering Journal (Lausanne, Switzerland: 1996), 2019, 374: 1344-1352.
- [118] 王选伦, 杨文青, 李义兵, 等. 聚乙烯/纳米石墨微片导电复合材料的制备与性能研究[J]. 中国塑料, 2015, 29(3): 57-62.
- WANG X L, YANG W Q, LI Y B, et al. Research on the preparation and properties of polyethylene/nano-graphite microflake conductive composite materials [J]. China Plastics, 2015, 29(3): 57-62.
- [119] PAN J, MA J, LIU X, et al. Effects of different types of biochar on the anaerobic digestion of chicken manure [J]. Bioresource Technol, 2019, 275: 258-265.
- [120] LEE J, LEE S, PARK H. Enrichment of specific electro-active microorganisms and enhancement of methane production by adding granular activated carbon in anaerobic reactors [J]. Bioresource Technology, 2016, 205: 205-212.
- [121] LUO C, LÜ F, SHAO L, et al. Application of eco-compatible biochar in anaerobic digestion to relieve acid stress and promote the selective colonization of functional microbes [J]. Water Research, 2015, 68: 710-718.
- [122] ZENG Y, LIU H, CHEN W, et al. Riboflavin-loaded carbon cloth aids the anaerobic digestion of cow dung by promoting direct interspecies electron transfer [J]. Environmental Research, 2024, 241: 117660.
- [123] 王彦朝, 吴瑒, 刘一苇, 等. 碳基导电材料促进有机固废厌氧消化产甲烷的研究进展[J]. 环境工程, 2023, 41(9): 146-155.
- WANG Y Z, WU Y, LIU Y W, et al. Research progress on carbon-based conductive materials promoting methane production from anaerobic digestion of organic solid waste [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(9): 146-155.
- [124] 卢铁东. 铁系化合物强化猪粪厌氧消化和抗性基因削减及其微生物学机制研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- LU T D. Research on the Enhancement of Anaerobic Digestion of Pig Manure and Reduction of Antibiotic Resistance Genes by Iron-Based Compounds and Their Microbiological Mechanisms [D]. Nanning: Guangxi University, 2020.
- [125] 陈瑞应. 纳米铁材料对猪粪厌氧消化特性及四环素类抗生素降解的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- CHEN R Y. Effects of Nano-Iron Materials on Anaerobic Digestion Characteristics of Pig Manure and Degradation of Tetracycline Antibiotics [D]. Guiyang: Environmental Science and Engineering, Guizhou University, 2022.
- [126] WANG Z, YUN S, SHI J, et al. Critical evidence for direct interspecies electron transfer with tungsten-based accelerants: An experimental and theoretical investigation [J]. Bioresource Technology, 2020, 311: 123519.
- [127] 江春景. 介导材料对鸡粪厌氧消化产气性能影响及沼渣利用试验研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022.
- JIANG C J. Experimental Study on the Influence of Mediating Materials on the Gas Production Performance of Chicken Manure Anaerobic Digestion and the Utilization of Biogas Residue [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2022.
- [128] 潘君廷. 生物炭介导的鸡粪厌氧消化特性及机理研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2016.
- PAN J T. Study on the Characteristics and Mechanism of Biochar-mediated Anaerobic Digestion of Chicken Manure [D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2016.
- [129] 李杰, 许洪伟, 王永成, 等. 载体对 26 °C 条件下牛粪厌氧处

- 理性能的影响[J]. 东北农业大学学报, 2009:79-82.
- LI J, XU H W, WANG Y C, et al. Influence of carrier on the performance of cattle manure anaerobic treatment at 26 °C[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2009:79-82.
- [130] GARCIA M L, LAPA K R, FORESTI E, et al. Effects of bed materials on the performance of an anaerobic sequencing batch biofilm reactor treating domestic sewage [J]. Journal of Environmental Management, 2008,88(4): 1471-1477.
- [131] 陈晓晔, 支秋霞, 朱建良. 碱性树脂对秸秆厌氧发酵产沼气的影晌[J]. 江苏农业科学, 2013,41(1): 377-380.
- CHEN X Y, ZHI Q X, ZHU J L. Influence of alkaline resin on biogas production from straw anaerobic fermentation[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(1): 377-380.
- [132] 徐俊, 朱雯喆, 谢丽. 生物强化技术对厌氧消化特性影响研究进展[J]. 化工进展, 2019,38(9): 4227-4237.
- XU J, ZHU W Z, XIE L. Research progress on the influence of bioaugmentation technology on anaerobic digestion characteristics [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38 (9): 4227-4237.
- [133] ZHANG Q, FAN D, PANG X, et al. Effects of polyethylene microplastics on the fate of antibiotic resistance genes and microbial communities in anaerobic digestion of dairy wastes[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,292: 125909.
- [134] ZHANG J, ZHAO M, LI C, et al. Evaluation the impact of polystyrene micro and nanoplastics on the methane generation by anaerobic digestion [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020,205: 111095.