文章编号：1008－8857(2026)02－0081－05 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2026.02.003

污泥复合有机物厌氧消化生产生物天然气技术研究

胡 晶
（中国华电科工集团有限公司，北京 100070）

摘 要：为提高生物天然气的生产质量与效率，开展污泥复合有机物厌氧消化生产生物天然气技术研究。通过探讨厌氧消化的技术原理、工艺流程及关键步骤(如水解、酸化、脱氢、甲烷化等)，分析了微生物种群结构与功能，揭示了不同混合比例、预处理方式及消化温度对厌氧消化效率与产气率的影响机制，并提出了优化方案。结果表明，该方案在显著提升生物天然气产量的同时，有效提高了天然气中甲烷的含量，进一步提升了产品的整体质量。

关键词：污泥复合有机物；pH；混合比例；消化温度；生物天然气；厌氧消化
中图分类号：X705 **文献标志码**：A

Research on anaerobic digestion of sludge composite organic matter for biogas production

HU Jing
(China Huadian Engineering Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: To improve the quality and efficiency of biogas production, this study investigates the technology of biogas production via anaerobic digestion of sludge composite organic matter. The technical principles, process flow, and key steps of anaerobic digestion are examined in depth, including hydrolysis, acidification, dehydrogenation, and methanogenesis. The structure and function of the microbial community are also analyzed. Based on these analyses, the mechanisms by which different mixing ratios, pretreatment methods, and digestion temperatures affect anaerobic digestion efficiency and gas yield are revealed. An optimization scheme is proposed accordingly. The results demonstrate that the proposed scheme significantly increases biogas production while effectively enhancing the methane content of the biogas, thereby further improving the overall product quality.

Keywords: sludge composite organic matter; pH; mixing ratio; digestion temperature; biogas; anaerobic digestion

收稿日期：2025－03－25
基金项目：国家重点研发计划项目(2024YFC3909105)
第一作者：胡 晶(1981—)，女，工程师。研究方向：生物质气化、沼气发酵、生物质高值化综合利用等。
E-mail：jjcoo42@163.com

随着城市化进程加速和污水处理规模扩大，市政污泥产量呈指数级增长。据统计，我国城镇污水处理厂年产湿污泥（含水率即质量分数为80%）已突破 6 000 万 t，且以年均 10% 的速度持续增长[1–2]。现有处置方式如填埋等会产生二次污染，因此亟需开发环境友好型资源化利用技术。在此背景下，污泥复合有机物厌氧消化生产生物天然气技术，因其兼具废弃物减量与能源回收的双重优势，受到学术界和产业界的广泛关注[3–4]。

近年来，关于其他有机固废与污泥共发酵的研究取得了显著进展。餐厨垃圾、畜禽粪便等高含脂类或碳水化合物有机物因富含有机质，成为与污泥共发酵的理想选择[5]。焦玲洁等[6]综述了铁及其化合物控制污泥厌氧消化挥发性有机硫化物（VSCs）机理研究进展。周滢月等[7]研究了底物对厌氧消化系统胞外聚合物（EPS）产生及起泡的影响，在批次实验中引入高碳水、高蛋白和高油脂 3 种厨余垃圾，检测了不同实验组 EPS 的产生特性，以及各类 EPS 和污泥的起泡特性和起泡潜能，并分析了 EPS 特性与污泥特性的相关性。此外，柳珊等[8]分析了水热预处理对猪粪厌氧消化系统中磺胺嘧啶（SDZ）降解的影响，对比研究了水热预处理对厌氧发酵模式下 SDZ 的降解规律与途径及其对猪粪产气性能的影响。结果表明：水热预处理可使中温连续厌氧反应器中 SDZ 的综合去除率显著提升。

厌氧消化技术本质上是通过微生物群落将有机质转化为甲烷的复杂生化过程。与单一底物消化体系相比，污泥复合有机物的共消化体系具有显著的协同效应：一方面，餐厨垃圾、畜禽粪便等可有效补充污泥碳氮比的不足；另一方面，不同底物间的微量元素互补能够优化微生物生长环境。但该技术发展面临三个关键问题。首先是有机质转化效率受限。污泥中微生物细胞壁的肽聚糖结构导致水解速率常数仅为 0.12 ～ 0.20/d，成为限速步骤。近年来，研究者们通过宏基因组学和代谢组学技术，深入解析了厌氧消化过程中微生物群落的功能多样性和代谢互作机制，发现特定微生物菌株或酶制剂的添加可以显著提高有机质的水解效率。例如，某些纤维素酶和半纤维素酶的协同作用，能够更有效地破坏污泥中微生物细胞壁的肽聚糖结构，从而加速有机质的释放和转化。其次是面临系统稳定性挑战。当混合物料中脂类含量超过 30% 时，长链脂肪酸积累会抑制产甲烷菌活性。第三是消化产物品质控制。硫化氢等杂质气体浓度易受硫蛋白降解影响。随着分子生物学技术的发展，宏基因组测序等新技术在厌氧消化微生物群落解析中的应用日益广泛，为揭示不同底物组合下微生物群落的功能多样性和代谢互作机制提供了新的手段。本文将进一步探讨污泥复合有机物厌氧消化生产生物天然气技术的优化方案，以期为该技术的发展提供新的思路和方法。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本文采用的实验材料主要为市政污泥及多种有机废弃物。其中，市政污泥取自某市政污水处理厂，其含水率高达 80%，挥发性固体（VS）质量分数为 35%，是厌氧消化过程中的主要底物之一。在有机废弃物方面，选择餐厨垃圾作为高碳源，其碳氮比（质量比）约为 25，能为厌氧消化过程提供丰富的碳源。畜禽粪便作为高氮源，其碳氮比约为 10，有助于调节混合底物的氮含量[2]。此外，引入麦秆作为碳氮比的调节剂，其碳氮比约为 60，同时麦秆作为农业废弃物的代表，还能改善发酵体系的物理结构。在接种物方面，采用厌氧颗粒污泥或厌氧沼渣与沼液的混合物。这些接种物富含厌氧微生物，能有效启动并加速厌氧消化过程。污泥复合有机物厌氧消化技术原理如图 1 所示。

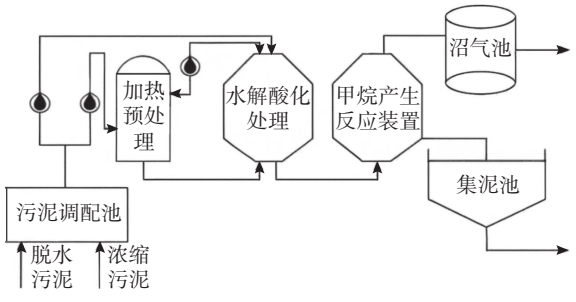

图 1 污泥复合有机物厌氧消化的技术原理

Fig. 1 Principle of anaerobic digestion of sludge composite organic matter

1.2　实验方法

本文采用恒温批式发酵罐作为反应器，模拟实际厌氧消化过程。实验前，对市政污水处理厂提供的脱水污泥及选取的有机废弃物(包括餐厨垃圾、畜禽粪便、麦秆)进行预处理，包括调整含水率、测定 VS 含量等。反应器内初始总固体(TS)质量分数设定为 8.00% ～ 12.07%。搅拌速率保持在 100 r/min，以确保反应过程中体系混合均匀。厌氧消化四阶段物质转化特征如表 1 所示。表中各阶段碳链长度呈梯度递减，末端产物甲烷(CH_4)为单碳化合物，体现出微生物代谢的碳链缩短规律。厌氧消化过程是一个多阶段微生物协同代谢网络，其物质转化与能量流动呈现精细的阶层化特征。

表 1　厌氧消化四阶段物质转化特征

Tab. 1　Characteristics of substance transformation in four stages of anaerobic digestion

阶段	功能菌群	底物转化状态	典型产物碳数范围	关键代谢特征
水解阶段	胞外酶系	复杂聚合物→可溶性单体	C12−C6	酶解作用突破细胞壁屏障
发酵产酸阶段	发酵细菌	单体→短链脂肪酸/醇	C6−C3	糖酵解与氨基酸脱氨基途径主导
产氢产乙酸阶段	产乙酸菌	长链脂肪酸→乙酸 + H_2/CO_2	C3−C2	β−氧化与伍德−永达尔途径耦合
产甲烷阶段	产甲烷古菌	乙酸/甲酸/H_2→$CH_4 + CO_2$	C1	甲基辅酶M还原酶催化甲烷生成

在发酵产酸阶段，发酵细菌通过混合酸发酵途径将单体分子转化为挥发性脂肪酸(C2−C5 为主)及醇类，并伴随还原型辅酶Ⅰ(NADH)+H^+的氧化产生分子氢。该阶段微生物种群呈现代谢多样性，包括梭菌属、肠杆菌科等兼性厌氧菌群，其代谢产物的多样性为后续产甲烷阶段提供多电子载体选择。

产氢产乙酸阶段会形成独特的互养代谢网络。产乙酸菌通过伍德−永达尔途径将长链脂肪酸氧化为乙酸，同时将还原当量以 H_2 形式释放。

产甲烷阶段由专性产甲烷古菌主导，通过甲基辅酶 M 还原酶催化完成乙酸脱羧或 H_2/CO_2 还原两种产甲烷途径[8]。该阶段微生物生长缓慢(倍增时间＞4 d)，对 pH(6.8 ～ 7.2)、氧化还原电位(−300 mV)等条件要求严苛，是厌氧系统的限速环节。

2　实验结果与分析

实验中通过调节温度、初始 pH 等模拟不同厌氧消化条件。监测周期为 40 d，每 5 d 取样分析累积产气量、VS 产气率、甲烷产率及甲烷含量等指标，以评估不同实验条件对厌氧消化性能的影响。

2.1　有机废弃物混合比例

为实现对天然气生产技术的优化，污泥复合有机物的混合比例设计如表 2所示[9]。

表 2　混合比例设计

Tab. 2　Mixing ratio design

组别	污泥、餐厨垃圾、畜禽粪便质量比	碳氮质量比
A	7:2:1	18
B	5:3:2	22
C	4:4:2	25
D	3:5:2	30
对照组	纯污泥	10

在此基础上搭建反应器，采用 1.5 L 恒温批式发酵罐，反应中 TS 质量分数为 8%，温度为(35±1)℃，初始 pH 为 7.0±0.2。接种物为厌氧颗粒污泥，搅拌速率为 100 r/min。不同混合比例对厌氧消化性能的影响如表 3 所示。

表 3 中 B 组表现最佳，累积产气量(12 680 mL)较对照组的约提高 87.9%，VS 产气率约达 368.7 mL/g。这是因为碳氮平衡促进了微生物代谢过程。

2.2　预处理方式

保持原材料参数不变，选择不同的预处理方式进行实验[10]。预处理方式的选择如表 4 所示。

表 3 不同混合比例对厌氧消化性能的影响

Tab. 3 Effects of different mixing ratios on anaerobic digestion performance

组别	累积产气量/mL	VS产气率/(mL·g^{-1})	甲烷产率/(mL·g^{-1})	甲烷体积分数/%
A	10 250±290	298.2±8.1	142.5±5.3	47.8±1.2
B	12 680±310	368.7±9.5	178.6±6.1	52.3±1.5
C	11 920±280	346.5±8.7	165.2±5.8	49.5±1.3
D	9 840±260	286.0±7.9	130.8±4.9	45.6±1.1
对照组	6 750±200	196.3±6.2	85.4±3.7	43.5±0.9

表 4 预处理方式的选择

Tab. 4 Selection of preprocessing methods

预处理方式	设计反应条件
物理法	高温蒸汽(120℃，30 min)
化学法	NaOH(60 g/kg干物质)、H_2SO_4(质量分数为3%)
生物法	复合菌剂(质量分数为0.8%)、沼液接种(体积分数为20%)
对照组	未预处理原料

不同预处理方式对生物天然气生产性能的影响如表 5 所示。由表可知， NaOH 化学法处理时累积产气量、TS/VS 产气率及甲烷体积分数均显著高于其他方法，且系统稳定性高。在实际工程中，可结合成本与环保要求，优先选用 NaOH 化学法预处理，或采用“NaOH +高温蒸汽”联合处理以进一步优化效果。

表 5 不同预处理方式对生物天然气生产性能的影响

Tab. 5 Effects of different pretreatment methods on biogas production performance

预处理方法(反应条件)	累积产气量/mL	TS产气率/(mL/g)	VS产气率/(mL/g)	甲烷体积分数/%
高温蒸汽	10 850±320	298.5±8.2	324.1±9.1	42.3±1.5
NaOH	12 620±290	306.8±7.6	332.8±8.3	46.8±1.8
H_2SO_4	9 760±280	268.7±7.8	291.9±8.5	38.6±1.2
复合菌剂	11 056±310	293.1±8.1	318.2±8.9	41.3±1.4
沼液接种	10 520±300	287.3±7.9	312.0±8.7	39.8±1.3
CK(未处理)	8 520±250	207.1±6.5	224.9±7.2	33.6±1.0

2.3 消化温度

在前文基础上，将污泥与餐厨垃圾按挥发性固体质量比最佳比例 5:3 混合。接种物为厌氧沼渣(1 200 mL) + 沼液(200 mL)，TS 质量分数为 12.07%。对照组中仅含接种物，不添加底物。

实验中设置中温组(38±1)℃、高温组(55±1)℃。每组设 3 个平行组，发酵周期为 40 d。不同温度下的厌氧消化性能如表 6 所示。

表 6 不同温度下的厌氧消化性能

Tab. 6 Anaerobic digestion performance at different temperatures

温度条件	产气峰值时间/d	峰值产气量/(mL·d^{-1})	累积产气量/mL	甲烷体积分数/%	VFA峰值/(mg·L^{-1})
中温	5	4 500±210	26 690±850	52.1±1.3	2 150±95
高温	3	6 810±290	31 430±920	48.7±1.1	3 200±135
对照组			<100		

由表 6 可知，高温条件(55 ℃)适用于需快速降解高蛋白底物(如餐厨垃圾)的情况。高温下产气量提升显著，周期缩短 20%。

3 应用实例分析

3.1 生物天然气产量检验

由上述分析可知，厌氧消化生产的最优技术配置为：污泥与复合有机物按质量比 5:3 混合，采用 NaOH 化学法预处理，在高温(55±1 ℃)下消化。将最优技术配置下的技术方案设为实验组，以某试点单位生物天然气生产技术方案作为对照组，进行单位时间内生物天然气产量的检验，结果如图 2 所示。从图可知，利用本文所提方法进行生物天然气生产可以提高生物天然气的产气量。

3.2 生物天然气质量检验

按照上述方法对实验组与对照组生产的生物天然气质量进行检验。在此过程中应明确，甲烷是生物天然气的主要成分，其含量直接决定了生物天然气的热值和品质。通常情况下，高质量的生物天然气中甲烷含量较高，能够提供更多的能量。因此，在实验中将甲烷含量作为检验生物天然气质量的关键指标。生物天然气质量检验结果如图 3 所示。

从图 3 可知，利用优化后的技术进行生物天

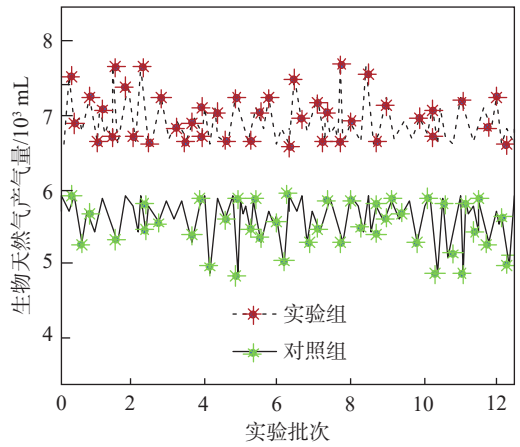

图 2　生物天然气产量检验结果

Fig. 2　Biogas production inspection results

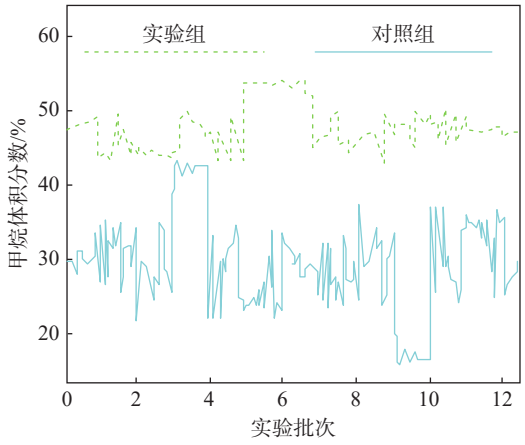

图 3　生物天然气质量检验结果

Fig. 3　Biogas quality inspection results

然气生产得到的天然气中甲烷含量相对较高，说明天然气质量较高。

4　结论

通过系统分析不同有机物配比对消化效能的影响，提出了基于微生物群落调控的工艺优化策略。结果表明，污泥复合有机物厌氧消化生产生物天然气技术在提升能源回收效率与环境保护方面展现出巨大潜力。采用优化有机物配伍和微生物群落调控策略显著提高了生物天然气的产量和甲烷体积分数。但该技术的广泛应用仍面临原料收集体系不健全、预处理能耗高及沼渣处置标准不统一等挑战，需要进一步完善相关产业链和标准体系。未来研究将进一步深化对厌氧消化过程中微生物相互作用机制的理解，优化有机废弃物配伍方案，以期实现更高效、更环保的生物天然气生产，为污水处理厂的能源化转型及可持续发展提供有力支持。

参考文献：

[1] 岳文慧, 隋倩雯, 魏源送, 等. 一体式 PN/A 工艺处理污泥热水解厌氧消化液性能研究及微生物解析 [J]. 环境科学学报, 2024, 44(6)：1 − 10.

[2] 张新杰, 孙永明, 闫淼, 等. 低温产甲烷菌群对玉米秸秆低温厌氧消化的生物强化作用 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(6)：186 − 193.

[3] 华飞虎, 韩芸, 卓杨, 等. 温度及有机负荷对高温高含固污泥厌氧消化启动期产甲烷特性影响研究 [J]. 环境科学研究, 2024, 37(9)：2020 − 2029.

[4] 田梦佳, 刘锋, 李祥, 等. K_2FeO_4-$FeCl_3$ 联合强化剩余污泥厌氧消化产酸 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(8)：4089 − 4098.

[5] 闵晓燕, 纪涛涛. 2019—2022 年某院骨科创伤患者创面厌氧菌感染病原菌及其耐药性 [J]. 中华医院感染学杂志, 2024, 34(19)：2974 − 2977.

[6] 焦玲洁, 李咏梅, 魏海娟, 等. 铁及其化合物控制污泥厌氧消化 VSCs 机理研究进展 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(7)：3454 − 3463.

[7] 周滢月, 张智, 李蕾, 等. 底物对厌氧消化系统 EPS 产生及起泡的影响 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(8)：4046 − 4056.

[8] 柳珊, 郭春春, 马艳芳, 等. 水热预处理对猪粪厌氧消化系统中磺胺嘧啶降解的影响 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(22)：188 − 198.

[9] 高丽娟, 彭俊, 王怡, 等. 典型 BNR 工艺污泥中温和高温厌氧消化特征对比 [J]. 中国给水排水, 2024, 40(3)：107 − 112.

[10] 宋晓雅, 张建新, 张荣兵, 等. 北京高安屯餐厨协同污泥厌氧消化生产性试验 [J]. 中国给水排水, 2024, 40(4)：99 − 106.