

中温和高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵产气动力学的研究

雷立帆^{1,2}, 陈金阳^{1,2}, 于欣卉^{1,2}, 郭利利^{1,2}, 毕少杰^{1,2}, 王彦杰^{1,2*}

(1. 黑龙江八一农垦大学 生命科学技术学院, 黑龙江省寒区环境微生物与农业废弃物资源化利用重点实验室, 黑龙江 大庆 163319; 2. 黑龙江八一农垦大学 生命科学技术学院, 农业农村部东北平原农业绿色低碳重点实验室, 黑龙江 大庆 163319)

摘要: 研究以餐厨垃圾为原料, 在中温(37 ℃)和高温(55 ℃)条件下开展批次试验。通过测定各项产气指标探究不同温度对餐厨垃圾厌氧发酵产气性能的影响, 并采用 Gompertz 模型和一级动力学模型对中温和高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵累计产甲烷量进行拟合。结果表明, 高温厌氧发酵最大产甲烷潜能为 398.33 mL·g⁻¹VS, 高出中温发酵 32.37%, 高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵累积沼气产量和甲烷产量分别为 665.89 和 399.41 mL·g⁻¹VS, 显著高于中温条件下的累积沼气产量及甲烷产量。餐厨垃圾高温厌氧发酵甲烷生成速率常数 k 为 0.43558 d⁻¹, 高于中温发酵动力学常数(k = 0.31367 d⁻¹), 餐厨垃圾高温厌氧发酵产甲烷速率高于中温发酵。综上所述, 相较于中温条件, 高温条件下餐厨垃圾批次厌氧发酵产气性能更优异。

关键词: 餐厨垃圾; 厌氧发酵; 产气性能; 产甲烷潜能; 动力学常数

中图分类号: S216.4; X705 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2024)02-0031-07

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2024020031

Anaerobic Fermentation Kinetics of Kitchen Waste at Mesophilic and Thermophilic / LEI Lifan^{1,2}, CHEN Jinyang^{1,2}, YU Xinhui^{1,2}, GUO Lili^{1,2}, BI Shaojie^{1,2}, WANG Yanjie^{1,2*} / (1. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Environmental Microbiology and Recycling of Argo-Waste in Cold Region, College of Life Science and Biotechnology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Key Laboratory of Low-carbon Green Agriculture in Northeastern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs P. R. China, College of Life Science and Biotechnology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: The present study aimed to investigate the effects of temperature on the anaerobic digestion (AD) of kitchen waste. Batch experiments were conducted using kitchen waste as the substrate, with mesophilic (37 ℃) and thermophilic (55 ℃) conditions being tested. To measure the gas production indicators, various parameters were monitored. The Gompertz and first-order kinetic models were utilized to fit the cumulative methane production during the AD of kitchen waste. The findings revealed that the maximum methane potential achieved through thermophilic AD was 398.33 mL·g⁻¹VS, which showed a remarkable 32.37% increase compared to mesophilic AD. Moreover, the cumulative biogas and methane production during thermophilic conditions reached 665.89 and 399.41 mL·g⁻¹VS, respectively, indicating a significantly higher output than that observed under mesophilic conditions. Additionally, thermophilic AD's methane production rate constant (k = 0.43558 d⁻¹) was greater than mesophilic AD's (k = 0.31367 d⁻¹), suggesting a faster biogas production rate in the former. In summary, the results demonstrated that thermophilic conditions exhibited superior gas production performance during batch anaerobic fermentation of kitchen waste compared to mesophilic conditions.

Key words: kitchen waste; anaerobic fermentation; gas production performance; methanogenic potential; kinetic constant

我国人口不断增长,产生的生活垃圾量也随之增多^[1],而在诸多生活垃圾之中,餐厨垃圾约占 50%左右^[2-3],占据了极大的比例。餐厨垃圾具体指包括家庭、学校、食堂及餐饮行业等产生的食品加

收稿日期: 2023-08-17 修回日期: 2023-09-17

项目来源: 2021年黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目(YJSCX2021-Y111);黑龙江八一农垦大学学成、引进人才科研启动计划(XYB202022; XDB2015-26);大庆市指导课题(zd-2021-91)。

作者简介: 雷立帆(1998-),男,汉族,陕西咸阳人,硕士,研究方向为寒区农业废弃物资源化利用。

通信作者: 王彦杰(1927-),男,黑龙江肇庆人,教授,主要从事农业废弃物资源化利用研究等工作。

工时的残留(厨余垃圾)和食用残留(泔水)等^[4],含有丰富的营养物质,有机质、氮磷钾含量极高,易腐烂^[5-6]。同时,其中含有大量病原菌、病原微生物以及有害物质等^[7]。如何妥善处理再利用成为当下的研究热点。目前我国餐厨垃圾主要处理方式卫生填埋或焚烧处理^[8],但餐厨垃圾含水量高的特点使其处理效果并不理想,并在一定程度上造成资源浪费及二次污染。厌氧发酵可以在处理餐厨垃圾的同时获得清洁能源沼气,是合理化利用餐厨垃圾,实现国家环境规划目标^[9]的有力抓手。

然而餐厨垃圾营养丰富,水解产酸速率快^[10],存在产酸速率和产甲烷速率不匹配的问题,容易导致厌氧系统酸化,因此平衡产酸速率和产甲烷速率是实现餐厨垃圾厌氧发酵高效稳定运行的关键。温度是影响厌氧系统稳定性的重要因素之一,随着发酵温度的升高,微生物活性增强,发酵产气效率提高,且在一定温度范围内,产气速度、产气量与温度呈正相关^[11]。裴占江^[12]等研究表明,在相同底物浓度条件下,厌氧发酵效率随着温度的升高逐渐增加;李月中^[13]等研究表明,高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵产气速率高于中温发酵; Vijayalakshmi A^[14]等研究表明,高温发酵甲烷产率高于中温发酵。通过动力学建模来模拟厌氧发酵过程可以获取厌氧过程中产气速率、最大产气潜能等特征参数,从而评估厌氧系统的发酵效率,对于工艺优化具有重要意义^[15-16]。Aakash K^[17]等利用动力学模型拟合的方法探究不同餐厨垃圾与厌氧发酵液混合比例对厌氧发酵效果的影响,研究发现修正过的 *Gompertz* 模型在最大产率预测和最小标准误差探究等方面较一级动力学模型更准确; De Oliveira L R G^[18]等通过修正过的 *Gompertz* 模型的拟合参数 λ 证明了餐厨垃圾与驯化过的接种污泥共发酵时水解率较低,同时通过 R^2 的比较发现修正过的 *Gompertz* 模型相较于一级动力学模型更适合描述厌氧发酵过程。

目前,国内外对于餐厨垃圾厌氧发酵的研究主要集中在中温发酵、中高温过渡区及混合厌氧发酵领域,对餐厨垃圾中温和高温条件下单发酵产气性能及动力学特征直接对比的报道较少。因此本文以餐厨垃圾为研究对象,以长期稳定运行的厌氧发酵液为接种污泥,在不同温度(37 °C 和 55 °C)条件下开展餐厨垃圾厌氧发酵产甲烷动力学试验,考察并对比中高温条件下餐厨垃圾甲烷发酵的产气动力学特征。通过分析求解动力学参数,拟合出相应的

动力学模型,从而提高餐厨垃圾厌氧发酵的产甲烷效率,以及餐厨垃圾厌氧发酵产甲烷的工程化应用提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 发酵底物

本试验所用的发酵原料为餐厨垃圾,分别在早餐、午餐及晚餐时段取自黑龙江八一农垦大学食堂。将其混匀后,从中挑出无法发酵的杂物(塑料袋、骨头、木筷等),再用破壁机(特美仕 TM-765A-1)破碎成浆,而后放入冰箱 4 °C 储存备用,以保证原料的均一性和稳定性^[19-20]。接种物取自实验室连续稳定运行的厌氧发酵反应器中的接种污泥。

部分原料特性如表 1 所示。

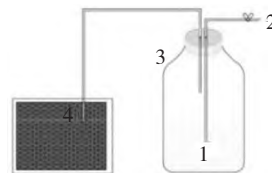
表 1 餐厨垃圾理化性质

项 目	餐厨垃圾	n
TS	25.55% ± 0.01 *	3
VS	24.27% ± 0.01	3
VS/TS	95.00% ± 0.01	3
C	54.40% ± 0.01	3
H	7.38% ± 0.01	3
O	36.00% ± 0.01	3
N	2.21% ± 0.01	3
C/N	24.72 ± 1.37	3

注:TS: Total Solids, 总固体; VS: Volatile Solids, 挥发性固体; *: 数值为平均值 ± 标准偏差; n: 测试样品数量。

1.1.2 试验装置

试验装置为实验室自行设计的简易厌氧发酵装置,主要由发酵瓶、导气管、取样口、集气袋等 4 部分组成如图 1 所示。发酵瓶为 1 L 橡胶塞和塑料封口玻璃瓶,在橡胶塞上打双孔,分别用于发酵液采样和连接集气袋;集气袋为 5 L 铝箔气体采样袋。发酵瓶、集气袋之间以橡胶管和塑料接头连接。



1. 发酵瓶; 2. 取样口; 3. 导气管; 4. 集气袋

图 1 厌氧发酵试验装置组成示意图

1.2 方法

1.2.1 试验方法

采用批次试验,探究不同温度条件(37 °C 和

55 ℃)下餐厨垃圾厌氧发酵产甲烷潜能及动力学。接种污泥来源于实验室驯化污泥,为了获得适宜的餐厨垃圾厌氧发酵的接种污泥,确保批次实验测试结果的准确可靠性,批次实验在开展之前在实验室进行污泥驯化以适应餐厨垃圾厌氧发酵。

试验采用有效体积为 800 mL 的发酵瓶进行,将 240 mL 接种污泥和 3 g-VS 原料加入发酵瓶中,添加 560 mL 表 2 营养液,在发酵瓶液面以上通入氮气,形成厌氧环境并用硅胶塞进行密封,分别在(37 ℃和 55 ℃)的温度条件下进行厌氧发酵,每组设置 3 个平行,试验过程中每两天测定沼气产量和甲烷含量。试验流程如图 2 所示。

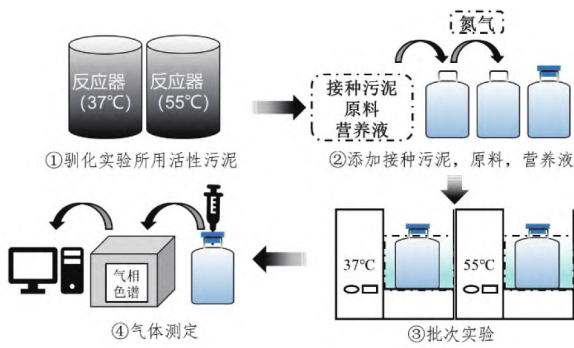


图 2 批次试验流程示意图

营养液成分及浓度如表 2 所示^[21]。

表 2 营养液成分及浓度

大量元素溶液	元素浓度 (g·L ⁻¹)	微量元素溶液	元素浓度 (mg·L ⁻¹)
NH ₄ Cl	1.25	EDTA	5.00
MgCl ₂ ·6H ₂ O	1.00	FeCl ₂ ·4H ₂ O	2.00
CaCl ₂	0.38	CoCl ₂ ·H ₂ O	0.17
K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	2.20	ZnCl ₂	0.07
KH ₂ PO ₄	1.70	H ₃ BO ₃	0.06
NaHCO ₃	2.50	MnCl ₂ ·2H ₂ O	0.50
—	—	NiCl ₂ ·6H ₂ O	0.04
—	—	CuCl ₂ ·2H ₂ O	0.027
—	—	NaMoO ₄ ·2H ₂ O	0.025

1.2.2 分析方法

料液中的 TS、VS 采用烘干称重法测定^[22];使用气体转子流量计(LZB-WB)来测定沼气日产气量,气体组分使用气相色谱仪(GC-7890)测定,柱温、进样口和检测器温度分别设置为 100 ℃、100 ℃和 50 ℃,载气为氢气。采用修正的 Gompertz 模型和一级动力学模型对不同温度条件餐厨垃圾厌氧发酵

的产气动力学特征进行分析^[22, 23]。

修正后的 Gompertz 模型公式如下:

$$P = P_0 \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_{max} e}{P_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\}$$

式中: P 为扣除空白的 t 时刻的积累气体产量, mL·g⁻¹ VS; P_0 为最大甲烷产能潜能, mL·g⁻¹ VS; R_{max} 为最大产甲烷速率, mL·g⁻¹ d⁻¹ VS; λ 为迟滞期, d; t 为实验持续的时间, d; e 为自然常数, $e \approx 2.7183$ 。

甲烷发酵的一级动力学模型如下所示:

$$\ln \left(\frac{C_{s0}}{C_s} \right) = kt$$

甲烷发酵的产气速率模型如下所示:

$$r = k \times C_s$$

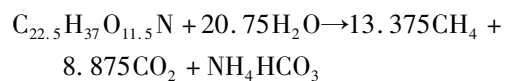
式中: C_{s0} 为最大产气量, mL·g⁻¹ VS; C_s 为最大产气量减去 t 时刻的累积产气量, mL·g⁻¹ VS; k 为速率常数, d⁻¹; t 是产气时间, d; r 为产气速率, mL·g⁻¹ d⁻¹ VS。

采用 Microsoft Excel 对公式及图表进行制作,采用 SPSS、OriginPro 等分析软件对数据进行图表分析和数据分析处理。

2 结果与分析

2.1 餐厨垃圾原料特性分析

根据表 1 中餐厨垃圾的元素组成可以将其表达成 C_{22.5}H₃₇O_{11.5}N 的化学式形式,相对分子量为 505。根据 Buswell 发酵方程建立餐厨垃圾甲烷发酵的化学计量学^[24],方程如下所示:

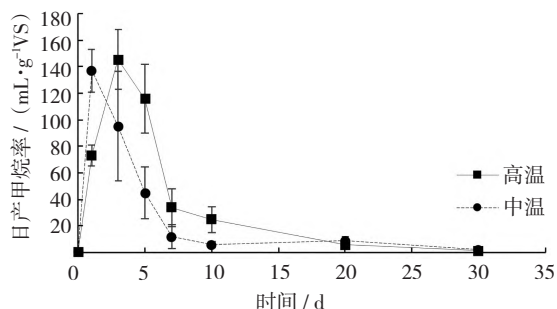


根据上述方程,本研究餐厨垃圾厌氧发酵完全降解后,沼气理论产量为 2.961 L·mol⁻¹,甲烷理论产量为 1.780 L·mol⁻¹,理论产甲烷潜能为 593.27 mL·g⁻¹ VS,甲烷理论浓度为 60% 左右,这与 Jaman K^[25]等的研究结果相近,甲烷含量较姜萌萌^[26]等的研究及苏敏^[23]等的研究略高 2% ~ 5%。

2.2 中温和高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵产气性能

日产甲烷率、pH 值变化、甲烷含量变化以及最大产甲烷潜能等是厌氧发酵过程中重要的监测指标^[27],可以形象直观地反映出不同温度条件下餐厨垃圾的产甲烷性能。本研究中不同温度条件下餐厨垃圾厌氧发酵的产气性能如下图所示。图 3 显示,日产甲烷率总体呈先上升后下降趋势,中温条件下

餐厨垃圾厌氧发酵日产甲烷率峰值出现时间较高温条件下提前 2 d, 高温条件下日产甲烷率峰值高于中温条件, 这是由于微生物增殖反应中, 在一定温度范围内, 温度越高反应速率越快^[28-29]。图 4 显示, 各组甲烷含量在启动时均呈上升趋势, 3 d 后趋于稳定且甲烷含量与理论值相近。图 5 显示, 各组 pH 值呈先下降后上升趋势, 这可能是由于在厌氧发酵过程中发酵底物经过水解酸化转化为乙酸、丙酸、丁酸等挥发性有机酸后被厌氧微生物利用, 从而造成 pH 值的先下降后上升^[30]。图 6 显示, 在不同温度条件中, 高温及中温条件下餐厨垃圾厌氧发酵最大产甲烷潜能分别为 398.33 和 300.92 mL·g⁻¹VS, 低于理论产甲烷潜能 593.27 mL·g⁻¹VS, 其中高温条件下最大产甲烷潜能高于中温条件, 这可能是高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵时微生物对有机质的利用率较高^[31]。



3 中温和高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵日产甲烷率变化

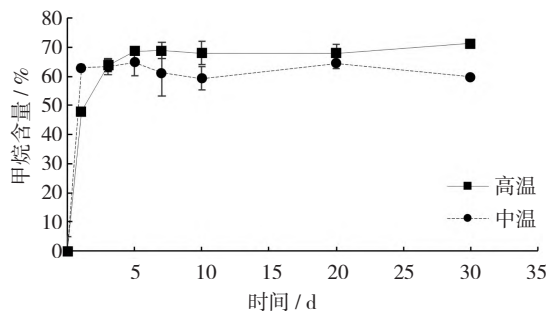


图 4 中温和高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵甲烷含量变化

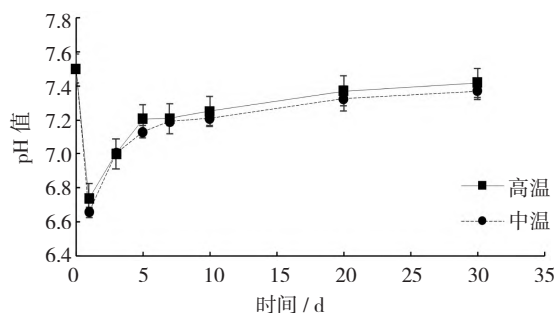


图 5 中温和高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵 pH 值变化

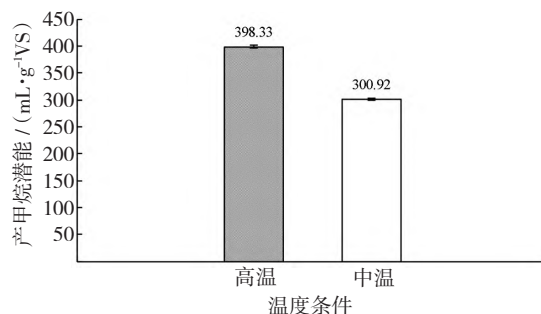


图 6 中温和高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵产甲烷潜能

2.3 中温和高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵产气特性

本研究展开批次实验测试餐厨垃圾在不同温度条件下的产气潜能, 并采用修正的 *Gompertz* 模型预测厌氧发酵产气特性, 结果见图 7 ~ 图 10 和表 3。图 7 和图 8 分别为高温条件和中温条件下 *Gompertz* 模型模拟餐厨垃圾产气曲线。图 7 显示, 高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵累积沼气产量和甲烷产量分别为 665.89 和 399.41 mL·g⁻¹VS; 图 8 显示, 中温条件下累积沼气产量和甲烷产量分别为 453.22 和 305.00 mL·g⁻¹VS, 高温条件下累积沼气及甲烷产量高于中温条件。图 9、图 10 为中温和高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵的产气速率变化, 从图 9 中可以看出中温发酵在 1 d 时出现最大产沼气速率 107.62 mL·g⁻¹d⁻¹TS 和最大产甲烷速率 60.26 mL·g⁻¹d⁻¹TS, 随后呈下降趋势直至 13 d 左右逐渐趋于 0, 从图 10 中可以看出高温发酵分别在 1.7 d, 2.1 d 出现最大产沼气速率 124.40 mL·g⁻¹d⁻¹TS 和最大产甲烷速率 79.31 mL·g⁻¹d⁻¹TS, 随后呈下降趋势直至 15 d 左右逐渐趋于 0, 中高温发酵均在 20 d 内逐渐停止产气, 相较于中温发酵, 高温发酵具有较高最大产沼气速率及最大产甲烷速率, 并且产气时间持续较长。

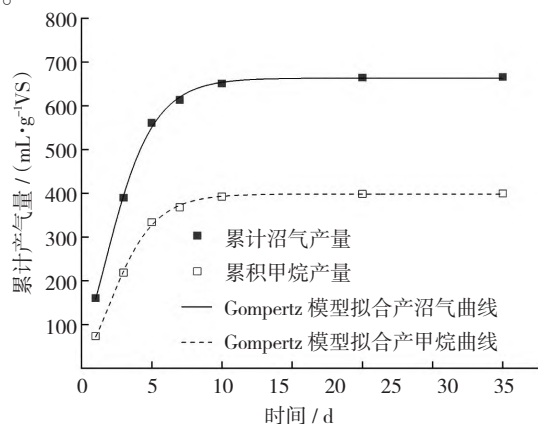


图 7 高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵产气特性

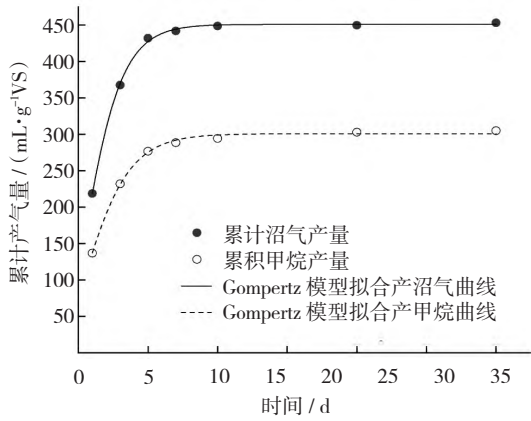


图8 中温条件下餐厨垃圾厌氧发酵产气特性

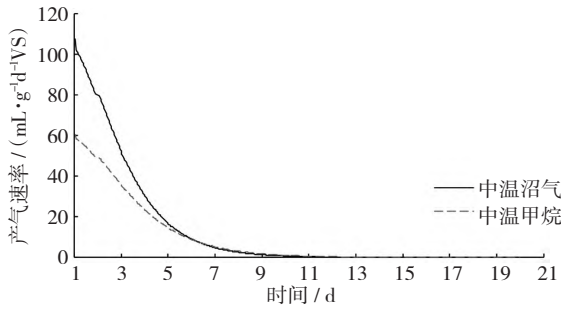


图9 中温条件下餐厨垃圾厌氧发酵产气速率变化曲线

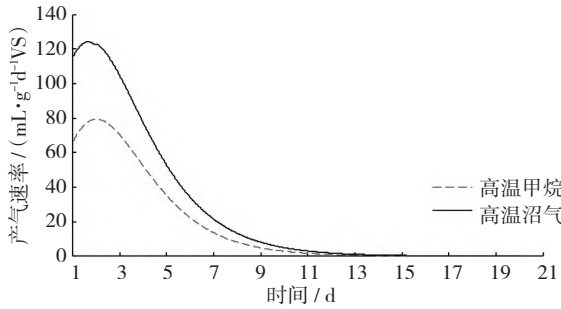


图10 高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵产气速率变化曲线

表3为中温和高温条件下 Gompertz 模型参数。由表可知,经 Gompertz 模型计算获得高温条件下产沼气潜能及产甲烷潜能分别为 663.44 和 398.33 mL·g⁻¹VS,中温条件下产沼气潜能及产甲烷潜能分别为 451.12 和 300.92 mL·g⁻¹VS,高温条件下产沼气潜能及产甲烷潜能高于中温条件。由表3可知, Gompertz 模型拟合系数 R² 依次为 0.99906、0.99606、0.99903、0.99899,拟合结果与实际值吻合,批次试验中餐厨垃圾在中温和高温条件下厌氧发酵存在差异,高温发酵优于中温发酵。

2.4 中温和高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵产气动力学特征

甲烷发酵产气过程中的动力学特性通常使用一

表3 中温和高温条件下 Gompertz 模型参数

参数	高温(55℃)		中温(37℃)	
	沼气	甲烷	沼气	甲烷
P ₀ / (mL·g ⁻¹ TS)	663.44	398.33	451.12	300.92
R _{max} / (mL·g ⁻¹ d ⁻¹ TS)	124.40	79.31	107.62	60.26
λ/d	-1.03602	-1.28332	-0.25478	0.15223
R ²	0.99906	0.99606	0.99903	0.99899

级动力学模型进行表征^[32],产气动力学是研究微生物生长、产物合成与底物消耗之间动态定量关系,定量描述微生物的生长和产物形成的过程。而图11、图12及表4为一级动力学模拟结果,从图表中可知高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵的动力学常数 k 为 0.43558 d⁻¹,略高于中温条件下的动力学常数 0.31367 d⁻¹,这表明餐厨垃圾在高温条件下进行厌氧发酵具有较高最大产甲烷速率,高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵的水解速率高于中温发酵,中温和高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵的一级动力学模型拟合系数 R² 分别为 0.99248、0.94666,表明拟合结果与实际值吻合。

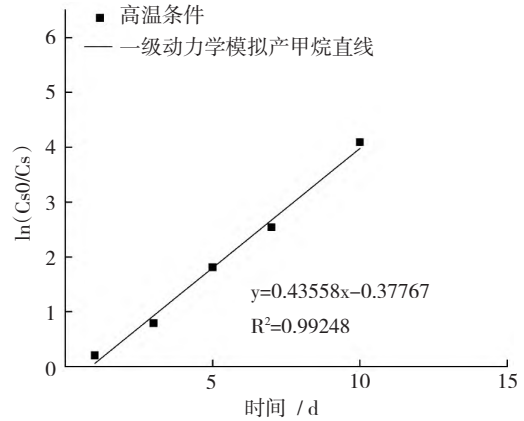


图11 高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵一级动力学模拟

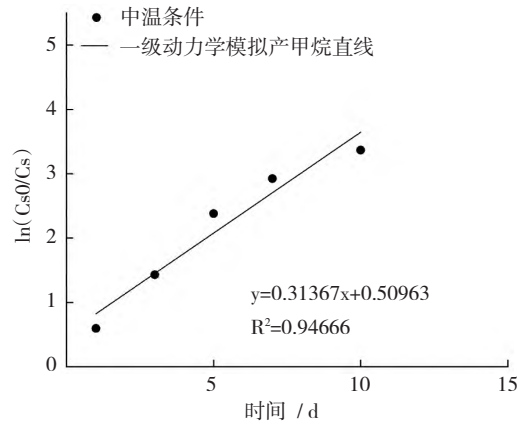


图12 中温条件下餐厨垃圾厌氧发酵一级动力学模拟

表4 一级动力学模型参数

温度条件	高温(55 ℃)	中温(37 ℃)
k	0.43558 ± 0.02189	0.31367 ± 0.04299
R ²	0.99248	0.94666

3 讨论与结论

餐厨垃圾是我国城市生活垃圾的重要组成部分,富含营养的特点使得其在厌氧发酵时往往存在产酸速率过快导致系统稳定性不足的问题,据学者研究,高温条件下厌氧发酵反应速率要大于中温反应速率^[33],因此控制厌氧发酵温度,使系统反应速率达到最佳水平,是实现厌氧发酵可持续应用的关键。Shuang Z^[34]等通过控制反应温度,发现在高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵产气量及甲烷浓度较高。万松峰^[35]等研究表明,当厌氧发酵温度为50 ℃时,餐厨垃圾降解速度较快。Junfeng J^[36]等的研究证明,有机物含量丰富的发酵底物更适合高温条件下进行厌氧发酵,并且甲烷产率更高。在Montecchio D^[37]等的研究中,温度的升高可以提高餐厨垃圾厌氧发酵反应的速率,与本文研究结果一致。

动力学模型拟合是优化餐厨垃圾厌氧发酵产气性能的常用手段,施宇森^[15]等通过利用 Transference 模型、修正后的 Gompertz 模型和修正后的 Logistic 模型模拟产沼过程发现,修正后的 Gompertz 模型具有更高的拟合度。唐天明^[38]等通过 Transference 模型拟合获得的参数对餐厨垃圾在 NaHCO₃ 缓冲体系下的厌氧发酵进行了优化,发现在餐厨垃圾厌氧发酵中最佳物料比(接种物干重:底物干重)为1:1.5。

上述研究大都对动力学模型的拟合度进行了讨论,对不同温度下餐厨垃圾动力学特征参数的比较较少,本研究使用修正过的 Gompertz 模型及一级动力学模型分别比较了中温和高温条件下餐厨垃圾单独厌氧发酵的产期潜能及动力学参数,得到了以下结论:1)餐厨垃圾高温发酵在最大产气潜能方面优于中温发酵,高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵最大产甲烷潜能为 398.33 mL·g⁻¹ VS,高出中温发酵 32.37%。2)采用修正的 Gompertz 模型预测餐厨垃圾厌氧发酵产气特性,发现高温发酵累积沼气及甲烷产量分别为 665.89 和 399.41 mL·g⁻¹ VS,高于中温条件,厌氧发酵效果较突出。3)餐厨垃圾高温发酵动力学常数 k 为 0.43558 d⁻¹,高于中温发酵(k =

0.31367 d⁻¹),中温和高温发酵均在 20 d 内停止产气。综上所述,在本次试验中高温条件下餐厨垃圾厌氧发酵在最大产气潜能、气体累计产量及产气速率等方面均优于中温条件,发酵批次厌氧发酵方式下餐厨垃圾更适合高温条件,若要投入工程化应用还需进一步探究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [2] 薛鲜丽, 刘子睦, 李娜, 等. 高盐高油餐厨垃圾高效降解微生物的筛选与应用[J]. 食品与发酵工业, 2022; 1-9.
- [3] 赵振振, 张红亮, 殷俊, 等. 对我国城市生活垃圾分类的分析及思考[J]. 资源节约与环保, 2021(08): 128-131.
- [4] 李杰伟, 高仁富, 罗宇. 餐厨垃圾高效厌氧发酵稳定产气研究[J]. 节能与环保, 2021(2): 79-81.
- [5] 赵明星, 黄月, 缪恒锋, 等. 餐厨垃圾与剩余污泥协同厌氧连续处置研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(19): 92-98.
- [6] WU S, SONG X, LIU G. Solid-state fermentation of waste food to produce feeding-protein by mixed fungal strains[J]. Food and Fermentation Industries, 2004, 15(5): 63-68.
- [7] 任丽娟, 林敏, 董仁杰, 等. 厌氧发酵灭活畜禽粪污中病原菌的研究进展[J]. 中国沼气, 2021, 39(6): 22-31.
- [8] 袁彧, 陆新生. 垃圾分类政策实施后国内厨余垃圾性质及处置现状研究[J]. 可持续发展, 2021, 11(3): 7-7.
- [9] 中国共产党中央委员会. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. [2021-03-13]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [10] OCTAVIO G, J M L, ISRAEL D, et al. Two-stage anaerobic digestion of food waste: enhanced bioenergy production rate by steering lactate-type fermentation during hydrolysis-acidogenesis. [J]. Bioresource technology, 2022, 358: 127358-127358.
- [11] 岩井重久, 申丘澈, 名取真. 污水污泥处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
- [12] 裴占江, 刘娣, 史风梅, 等. 不同浓度和温度下猪场粪水厌氧发酵产气特性及能效分析[J]. 中国沼气, 2021, 39(3): 59-65.
- [13] 李月中, 宫亚斌, 谭婧, 等. 提升中温和高温过渡区厌氧发酵效率的试验研究和工程验证[J]. 中国沼气, 2021, 39(2): 51-56.
- [14] VIJAYALAKSHMI A, KUMAR M N, SAMEENA B, et

- al. Solid state anaerobic digestion of food waste and sewage sludge: Impact of mixing ratios and temperature on microbial diversity, reactor stability and methane yield [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 793: 148586 – 148586.
- [15] 施宇森, 应李广, 黄顺寅, 等. 餐厨垃圾中高温厌氧发酵的产沼动力学模拟及比较研究[J]. *安徽农学通报*, 2020, 26(13): 155 – 158.
- [16] RAPOSO F, BORJA R, MARTIN M A, et al. Influence of inoculum-substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 149(1): 70 – 77.
- [17] AAKASH K, ANMOL P, SHEILA D, et al. Effect of the substrate to inoculum ratios on the kinetics of biogas production during the mesophilic anaerobic digestion of food waste[J]. *Energies*, 2022, 15(3): 834 – 834.
- [18] DE OLIVEIRA L R G, FILHO D A D S, FRAGA T J M, et al. Kinetics assessment and modeling of biogas production by anaerobic digestion of food wastes and acclimated sewage sludge[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2021 (prepublish): 1646 – 1656.
- [19] 白岩, 刘金力, 徐华宇, 等. 不同预处理条件对于尾菜厌氧发酵产气效果的影响[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2021, 33(1): 52 – 59.
- [20] MARTINEZ L R M, GONZALEZ R G, ALVAREZ J E B, et al. Semi-continuous anaerobic co-digestion of vegetable waste and cow manure: a study of process stabilization [J]. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 2020, 19(3): 1117 – 1134.
- [21] 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.
- [22] 崔维栋. 混合物料协同厌氧发酵产甲烷性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
- [23] 苏敏, 乔玮, DALAL A, 等. 餐厨垃圾与污泥厌氧发酵产气动力学特性研究[J]. *新能源进展*, 2016, 4(1): 1 – 9.
- [24] BUSWELL A M, MUELLER H F. Mechanism of Methane Fermentation [J]. *J american Chem soc*, 1948, 70(3): 550 – 552.
- [25] KHAIRINA J, NURJANNAH A, ALI M M, et al. Anaerobic Digestion, Codigestion of Food Waste, and Chicken Dung: Correlation of Kinetic Parameters with Digester Performance and On-Farm Electrical Energy Generation Potential [J]. *Fermentation*, 2022, 8(1): 28 – 28.
- [26] 姜萌萌, 林敏, 郑晓宇, 等. 高温厌氧膜生物反应器处理餐厨废水的启动[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(12): 5318 – 5324.
- [27] 张成明, 董保成, 李砚飞, 等. 中性纤维素酶促进牛粪厌氧发酵性能的研究[J]. *中国沼气*, 2022, 40(1): 33 – 37.
- [28] 野池达野. 甲烷发酵[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [29] CAO L, KEENER H, HUANG Z, et al. Effects of temperature and inoculation ratio on methane production and nutrient solubility of swine manure anaerobic digestion [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 299(C): 122552 – 122552.
- [30] H G M. *The Microbiology of Anaerobic Digesters* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2003.
- [31] CHEN H, CHANG S. Dissecting methanogenesis for temperature-phased anaerobic digestion: Impact of temperature on community structure, correlation, and fate of methanogens [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 306 (prepublish): 123104 – 123104.
- [32] SPEECE R E. Anaerobic biotechnology and odor/corrosion control for municipalities and industries [M]. *Anaerobic biotechnology and odor/corrosion control for municipalities and industries*, 2008.
- [33] 胡纪萃. 废水厌氧生物处理理论与技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [34] SHUANG Z, XINXIN M, HAISHU S, et al. Response of semi-continuous anaerobic digestion of food waste to progressively increasing temperature: Methanogen community, correlation analysis, and energy balance [J]. *Industrial Crops Products*, 2023, 192: 116066 – 116066.
- [35] 万松峰, 张意康. 餐厨垃圾高效好氧发酵处理工艺优化[J]. *节能与环保*, 2023, 342(1): 66 – 68.
- [36] JIANG J, LI L, CUI M, et al. Anaerobic digestion of kitchen waste: The effects of source, concentration, and temperature [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2018, 135: 91 – 97.
- [37] D M, A G, A G, et al. Biomethane potential of food waste: modeling the effects of mild thermal pretreatment and digestion temperature [J]. *Environmental technology*, 2017, 38(11): 1452 – 1464.
- [38] 唐天明, 高树梅, 陶雨蒙, 等. 缓冲体系下餐厨垃圾厌氧发酵产沼动力学解析[J]. *嘉兴学院学报*, 2017, 29(6): 41 – 46.