

王安吉, 马文林. 接种比在中温与低温条件下对猪粪产甲烷潜力的影响研究 [J]. 畜牧与兽医, 2024, 56 (4): 34-40.

WANG A J, MA W L. Effect of inoculation ratio on pig manure BMP under mesophilic and low temperature conditions [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2024, 56 (4): 34-40.

## 接种比在中温与低温条件下对猪粪产甲烷潜力的影响研究

王安吉<sup>1,2</sup>, 马文林<sup>1,3\*</sup>

(1. 北京建筑大学环境与能源工程学院, 北京 102616;

2. 北京中认检测技术服务有限公司, 北京 100176;

3. 北京建筑大学北京市应对气候变化研究和人才培养基地, 北京 102616)

**摘要:** 为探究猪粪挥发性固体 (VS) 与接种液 VS 不同接种比 (S/I) 对中温与低温条件下猪粪产甲烷潜力 (BMP) 的影响, 在 (35±0.5)℃ 中温条件和 (23±0.5)℃ 低温条件下, 将初始 VS 浓度控制在 3%, 按照接种比为 0.5、1.0 与 2.0 开展猪粪 BMP 试验, 并进行产甲烷过程的动力学分析。各试验组甲烷产生量均为标准状况 (1 标准大气压, 0℃) 下的体积。结果: 无论中温还是低温条件, 累积甲烷产量和最大日甲烷产生量都与猪粪接种比呈显著正相关性 ( $P<0.05$ ), 但不同接种比例下猪粪 BMP 无显著差异 ( $P>0.05$ ); 以 VS 计, 中温条件下 S/I 为 0.5、1.0 和 2.0 时猪粪的 BMP 分别为 (252.05±5.12) mL/g、(250.07±16.57) mL/g 和 (249.65±13.69) mL/g, 均值为 (250.59±1.28) mL/g; 低温条件下 S/I 为 0.5、1.0 和 2.0 时猪粪的 BMP 分别为 (183.42±9.18) mL/g、(189.02±11.25) mL/g 和 (191.88±3.50) mL/g, 其均值为 (188.11±4.31) mL/g; 动力学研究表明, 修正的 Gompertz 模型较 Logistic 模型更适合猪粪的厌氧消化动力学分析。本研究表明, 初始 VS 水平控制在 3% 时, 在相同温度条件下 (中温或低温), 不同接种比猪粪的 BMP 无显著差异, 从缩短 BMP 测试时间、提高效率的角度考虑, 建议进行猪粪 BMP 测试时选取中温条件下, 将 S/I 设为 0.5。

**关键词:** 厌氧消化; 猪粪; 产甲烷潜力; 中温条件; 低温条件; 接种比

**中图分类号:** X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-5130(2024)04-0034-07

## Effect of inoculation ratio on pig manure BMP under mesophilic and low temperature conditions

WANG Anji<sup>1,2</sup>, MA Wenlin<sup>1,3\*</sup>

(1. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China;

2. CQC Testing Technical Services Co., Ltd., Beijing 100176, China;

3. Beijing Climate Change Response Research and Education Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of different inoculation ratios on biochemical methane potential (BMP) of pig manure under mesophilic (35±0.5)℃ and low (23±0.5)℃ temperature conditions, the initial volatile solid (VS) concentration was controlled at 3% under the low temperature conditions; and pig manure BMP experiments were carried out according to the ratios of pig manure to inoculum of 1:2, 1:1 and 2:1, i. e., the inoculation ratios (S/I) of 0.5, 1.0 and 2.0. The kinetic analysis of methanogenic process was induced. The results showed that cumulative methane production and maximum daily methane production were significantly and positively correlated with the inoculation ratio of pig manure under either mesophilic or hypothermic conditions ( $P<0.05$ ), but there was no significant difference in the BMP of pig manure under different inoculation ratios ( $P>0.05$ ). The BMP (using VS as a basis) of pig manure at S/I of 0.5, 1.0 and 2.0 under mesophilic conditions were (252.05±5.12) mL/g, (250.07±16.57) mL/g, and (249.65±13.69) mL/g, respectively; and their mean BMP was (250.59±1.28) mL/g. The BMP of pig manure at S/I of 0.5, 1.0 and 2.0 under cryogenic conditions were (183.42±9.18) mL/g, (189.02±11.25) mL/g, and (191.88±3.50) mL/g, respectively, and their mean BMP were (188.11±4.31) mL/g. The

收稿日期: 2023-05-14; 修回日期: 2024-01-27

基金项目: 现代农业产业技术体系北京市生态循环与低碳发展创新团队 (BAIC08-2023-SYZ04)

第一作者: 王安吉, 男, 硕士

\* 通信作者: 马文林, 博士, 教授, 主要从事温室气体排放与减排评估技术相关工作, E-mail: mawenlin1130@126.com。

kinetic studies showed that the modified Gompertz model was more suitable than the logistic model for the kinetic analysis of anaerobic digestion of pig feces. The present study showed that there was no significant difference ( $P>0.05$ ) in the BMP of pig manure at different inoculation ratios at medium ( $35\pm 0.5$ ) °C or low ( $23\pm 0.5$ ) °C temperatures when the initial VS level was controlled at 3%, and from the perspective of shortening the BMP testing time and improving efficiency, it is recommended that the S/I for pig manure BMP testing be chosen at 0.5.

**Keywords:** anaerobic digestion; pig manure; biochemical methane potential; mesophilic condition; low temperature condition; inoculation ratio

根据粮农组织 (FAO) 统计数据, 2020 年全球因家畜粪便管理引起的甲烷排放占农业活动甲烷排放总量的 6.63%<sup>[1]</sup>。由于家畜粪尿对环境有潜在的负面影响, 因此需要适当的处置策略<sup>[2]</sup>。Li 等<sup>[3]</sup>的研究表明, 1 头猪在其畜牧生命周期内会因粪便管理产生 1.34 kg 甲烷。中国是世界养猪第一大国, 每年猪粪便管理产生的甲烷排放量巨大。

粪便最大产甲烷能力 ( $B_0$ ) 是粪便管理温室气体排放和减排量核算中重要的特征参数, 可用于估算甲烷排放因子, 进而评估单一物料及混合物料的产甲烷潜力 (BMP)<sup>[4-5]</sup>。BMP 常用单位质量挥发性固体 (VS) 的产甲烷量表示, 单位为 mL/g 或  $m^3/kg$ 。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 制定的《国家温室气体清单指南》给出了全球各大洲猪粪便管理  $B_0$  缺省值, 亚洲地区为  $0.29 m^3/kg$ , 该缺省值与我国现阶段的实际生产情况具有一定差异, 只适用于区域清单研究, 对于特定猪场猪粪便管理甲烷排放评价常存在较大不确定性。因此, 使用亚洲水平的缺省值评估我国猪场粪便管理甲烷排放情况, 估算结果将具有较高的不确定性。

尽管可以通过实测方法得到较为准确的  $B_0$  值, 但 BMP 测试具有试验条件相对复杂、测试周期长和成本较高等特点, 对于大部分畜牧企业来说较难完成<sup>[6-7]</sup>。而且, 目前尚未制定统一规范的 BMP 测试方法, 不同实验室在进行猪粪 BMP 测试时, 采用不同的试验条件, 得出的  $B_0$  值存在较大差异<sup>[8-15]</sup>。

本文研究中温与低温条件下不同接种比例对猪粪 BMP 的影响, 并对猪粪产甲烷过程进行动力学分析, 旨在为提出猪粪 BMP 统一测试方法提供科学依据, 以期降低猪粪管理甲烷排放量核算不确定性。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品来源与处理

猪粪样品取自于北京市东郊某猪场的母猪舍。猪场存栏仔猪 380 头、母猪 105 头和育肥生长猪 570 头, 猪舍采用干清粪方式。鲜母猪粪样品从母猪舍漏缝地板采集, 于实验室内置于 35 °C 下进行风干处理, 除杂后研磨过 40 目筛网备用。

接种液取自北京某牛场沼气工程 (两个  $50 m^3$  的发酵罐) 排放的沼液。在实验室内对沼液经过除杂处理, 并于 35 °C 条件下进行为期 1 个月的培养后用于猪粪中温 BMP 试验。在中温试验结束后, 对反应瓶中混合发酵液进行浓缩, 并于 23 °C 条件下培养 1 个月后进行猪粪低温 BMP 试验。

在试验开始前利用质量法分别测定接种液与猪粪的总固体 (TS) 和灰分含量 (以质量计), 计算得到其 VS 值, 样品 TS、VS 与灰分值见表 1。

表 1 接种液与猪粪的 TS、VS 与灰分值

温度条件	指标值	接种液/%	猪粪/%
中温	TS	6.03±0.03	87.99±1.74
	VS	3.23±0.01	64.79±1.96
	灰分	2.81±0.02	23.20±0.26
低温	TS	6.22±0.01	87.99±1.74
	VS	3.17±0.01	64.79±1.96
	灰分	3.05±0.00	23.20±0.26

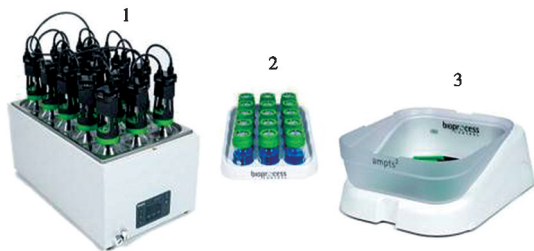
### 1.2 试验装置

利用全自动甲烷潜力测试系统 (AMPTS-II, 碧普) 进行猪粪中温 BMP 试验。试验装置如图 1 表示, 由厌氧消化单元、CO<sub>2</sub> 固定单元与气体体积测定单元 3 部分构成。其中, 样品消化单元由 600 mL 玻璃反应瓶、恒温水浴锅与自动搅拌装置组成; CO<sub>2</sub> 固定单元由 100 mL 玻璃吸收瓶和底座组成, 试验开始前向每个玻璃吸收瓶中装入 80 mL 3 mol/L 的 NaOH 溶液, 以吸收厌氧消化单元排出的 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 等酸性气体; 气体体积测定单元内置温度与压力传感器, 依据内置算法将产气数据自动转换为标准状况 (1 标准大气压, 0 °C) 下的体积。

### 1.3 试验设计

采用制备好的母猪粪样品, 分别进行中温和低温 BMP 试验。固定各试验组初始总 VS 水平 (猪粪 VS+接种液 VS) 为 3%, 在此基础上根据试验设定的各反应瓶的反应体积、物料 VS 含量、猪粪与污泥比例, 计算各反应瓶的物料投入水平, 各组接种比 (猪粪 VS/接种液 VS, S/I) 详见表 2。按照表 2 向各

反应瓶添加猪粪与接种液后,用纯水补充至 400 mL 反应体积。



1. 厌氧消化单元; 2. CO<sub>2</sub>固定单元; 3. 气体体积测定单元。

图 1 BMP 测试系统装置示意

如表 2 所示,中温和低温 BMP 试验均设 1 组空白组(仅含接种液)分别为 MCK 和 LCK 组,3 组猪粪处理组,分别为 M1、M2、M3 和 L1、L2、L3 组,各试验组均设 3 个平行处理。试验期间,样品消化单元的自动搅拌系统实行间歇搅拌,测试系统每日自动记录各反应瓶的甲烷产生量,当甲烷日产量小于累积产气量的 1% 时测试系统自动终止试验。

表 2 不同温度条件下各试验组物料投入情况

组别	S/I	中温条件		组别	S/I	低温条件	
		猪粪/g	接种液/g			猪粪/g	接种液/g
MCK	0	0	371.80	LCK	0	0	378.32
M1	0.5	6.17	47.87	L1	0.5	6.17	252.21
M2	1.0	9.26	185.90	L2	1.0	9.26	189.16
M3	2.0	12.35	123.93	L3	2.0	12.35	126.11

#### 1.4 厌氧消化动力学分析

将所得产甲烷数据利用修正的 Gompertz 模型<sup>[16]</sup>与 Logistic 模型<sup>[17]</sup>进行动力学拟合,模型分别如公式(1)与公式(2)所示。

$$M(t) = BMP \times \exp \left\{ -\exp \left[ \frac{R_{\max} \times e}{BMP} (\lambda - t) + 1 \right] \right\}, \quad (1)$$

$$M(t) = \frac{BMP}{1 + \exp \left[ \frac{4 \times R_{\max}}{BMP} (\lambda - t) + 2 \right]}. \quad (2)$$

式中:  $M(t)$  为  $t$  时刻每克 VS 的累计产甲烷量 (mL);  $BMP$  为每克 VS 的产甲烷潜力 (mL);  $R_{\max}$  为每克 VS 日最大产甲烷速率 (mL);  $e$  为自然常数;  $\lambda$  为延滞期 (d);  $t$  为发酵时间 (d)。

以均方根误差 ( $RMSE$ ), 决定系数 ( $R^2$ ), 赤池信息量准则值 ( $AIC$  值) 与贝叶斯信息量准则值

( $BIC$  值) 作为模型的评估指标。 $RMSE$  常用于评价模型精度,该值越小模型精度越高<sup>[18]</sup>。 $R^2$  用于评价模型拟合优度, $R^2$  越高模型拟合度越好<sup>[19]</sup>。 $AIC$  值与  $BIC$  值可评估模型的拟合程度, $AIC$  值与  $BIC$  值越小,模型的拟合程度越好。 $AIC$  值与  $BIC$  值计算方法见公式(3)和公式(4)。在进行动力学拟合前,将所得猪粪的日甲烷产量与累积甲烷产量数据根据各组物料投入水平换算成每克 VS 的日产甲烷速率  $R$  (mL) 与累积产甲烷量  $M$  (mL)。

$$AIC = \begin{cases} N \times \ln \left( \frac{RSS}{N} \right) + 2K + \frac{2K(K+1)}{N-K-1}, & \text{当 } \frac{N}{K} < 40, \\ N \times \ln \left( \frac{RSS}{N} \right) + 2K, & \text{当 } \frac{N}{K} \geq 40; \end{cases} \quad (3)$$

$$BIC = N \times \ln \left( \frac{RSS}{N} \right) + K \times \ln(N). \quad (4)$$

式中:  $N$  为样本量;  $RSS$  为残差平方和;  $K$  为模型自变量个数。

## 2 结果与分析

### 2.1 BMP 测试

#### 2.1.1 中温 BMP 测试

将各猪粪处理组产甲烷量减去 MCK 组产甲烷量,得到各处理组日甲烷产量与累积甲烷产量变化,如图 2A 和图 2B 所示。

由图 2A 可知,猪粪处理组在整个产甲烷过程中有相似的产甲烷变化规律。M1 组、M2 组和 M3 组 3 个处理组产甲烷的第 1 个峰值出现在第 2 天,第 3 天产气量出现小幅下降,第 4 天开始回升,第 5 天出现第 2 个产气峰值。该峰值是整个产甲烷过程中日产气量最高值,各试验组最大日甲烷产量从大到小依次排序为 M3 组  $[(373.72 \pm 2.33) \text{ mL}] > \text{M2 组} [(290.57 \pm 8.06) \text{ mL}] > \text{M1 组} [(208.40 \pm 10.59) \text{ mL}]$ ,最大日甲烷产量与猪粪接种比例呈显著正相关性 ( $P < 0.05$ )。第 6 天 3 个处理组日产气量骤降,下降幅度强于之前第 1 个峰值后出现的降幅。第 7 天产气量再次回升,但回升能力显著低于第 2 次峰值时的情况,M1 组和 M2 组于第 7 天出现第 3 个产气峰值,M3 组的第 3 个峰值出现在第 8 天,第 3 个峰值的产气量由高到低的顺序与甲烷最大产量从大到小的顺序相同,依次为 M3 组  $> \text{M2 组} > \text{M1 组}$ 。在第 3 个产气峰值出现后各试验组的日产气量均呈现稳定下降趋势,分别于第 15 天、第 16 天和第 18 天结束产气,产甲烷周期与 S/I 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。

由图 2B 可以看出,接种比例越高,总的产气时间越长、累积产气量越大。M1、M2 和 M3 组累积甲

烷产量分别为 1 013.07、1 502.77 和 1 999.17 mL，猪粪累积甲烷产量与其接种比例呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。

计算得出，M1、M2 与 M3 组的 BMP 值分别为

(252.05±5.12)、(250.07±16.57) 和 (249.65±13.69) mL/g，不同接种比例猪粪的 BMP 无显著差异 ( $P > 0.05$ )，猪粪 BMP 平均值为 (250.59±1.28) mL/g。

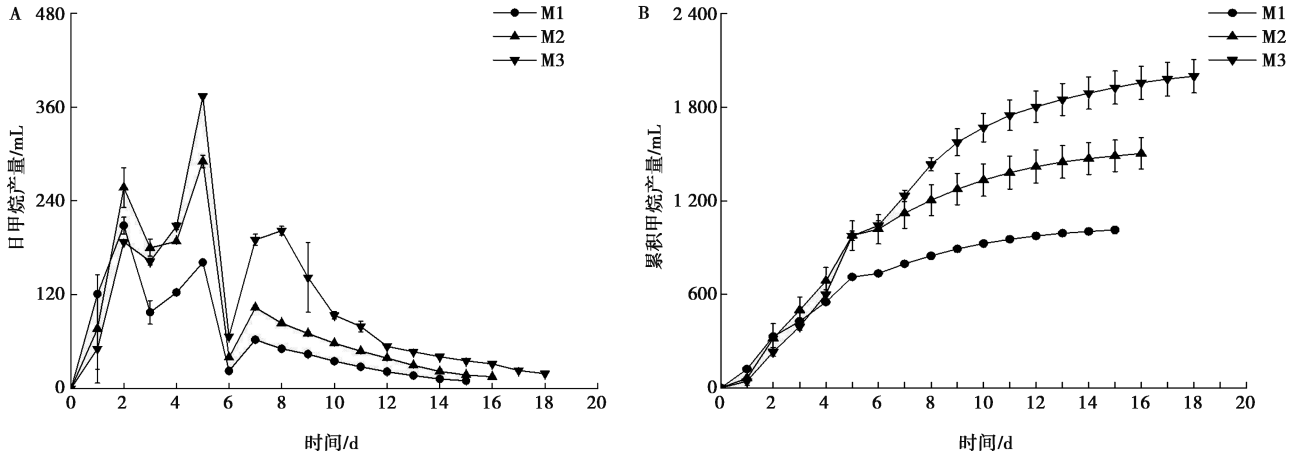


图2 中温条件下不同处理组日甲烷产量 (A) 和累积甲烷产量 (B) 的变化

### 2.1.2 低温 BMP 测试

低温条件下 LCK 组未产气，各处理组日产甲烷量与累积甲烷产量变化如图 3A 和图 3B 所示。

由图 3A 可知，3 个猪粪处理组在整个产甲烷过程中均出现日甲烷产量峰值，但出现时间不同，分别为第 8 天、第 10 天和第 16 天，猪粪日产甲烷最高峰出现时间与接种比例呈显著正相关性 ( $P < 0.05$ )。各猪粪处理组日甲烷最大产量从大到小依次为 L3 组 [(76.95±2.12) mL] > L2 组 [(68.25±0.64) mL] > L1 组 [(54.65±6.15) mL]，表明猪粪接种比例越高，日产甲烷最大峰值越高，最大日甲烷产率与猪粪接种比例呈正相关性 ( $P < 0.05$ )。在日产甲烷最高峰

出现后，3 个猪粪处理组日产甲烷量逐渐下降。L1 组第 8 天出现第 2 个产气峰值，但随后再次逐渐下降，直到第 20 天出现第 3 个日产甲烷量峰值，第 2 与第 3 个日产甲烷量峰值较前 1 d 差异约为 3 mL。L2 组日产甲烷量第 2 与第 3 个峰值分别出现在第 15 与第 19 天，L3 组日产甲烷量第 2 与第 3 个峰值分别出现在第 27 与第 31 天。L1、L2 和 L3 组分别于第 28 天、第 34 天和第 41 天结束产气。产甲烷周期与 S/I 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。由图 3B 可以看出，接种比例越高，总的产气时间越长、累积产气量越大。经检验得出，猪粪累积甲烷产量与 S/I 显著正相关 ( $P < 0.05$ )。

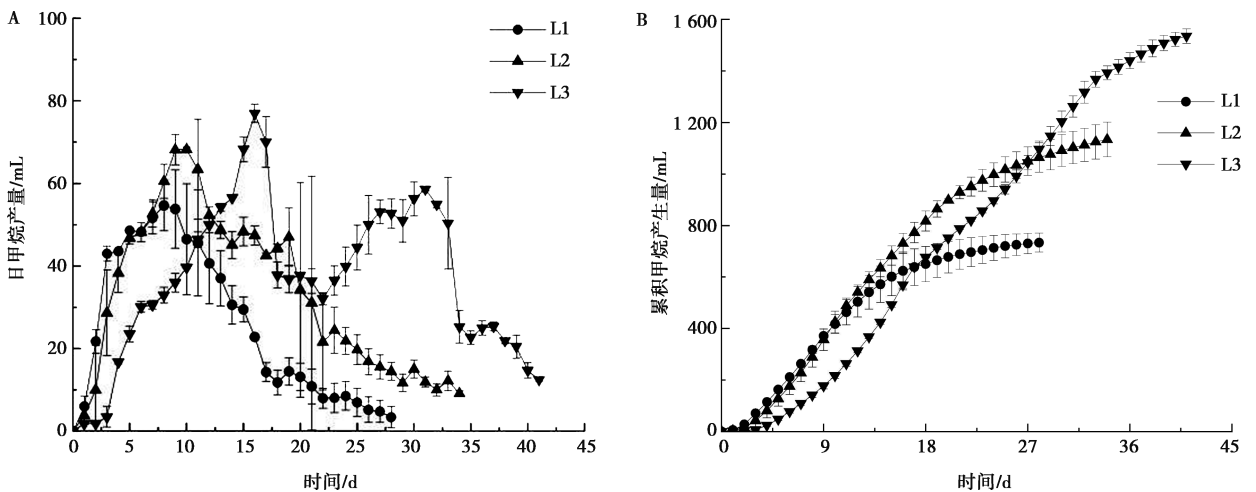


图3 低温条件下不同处理组日甲烷量 (A) 和累积甲烷产量 (B) 的变化

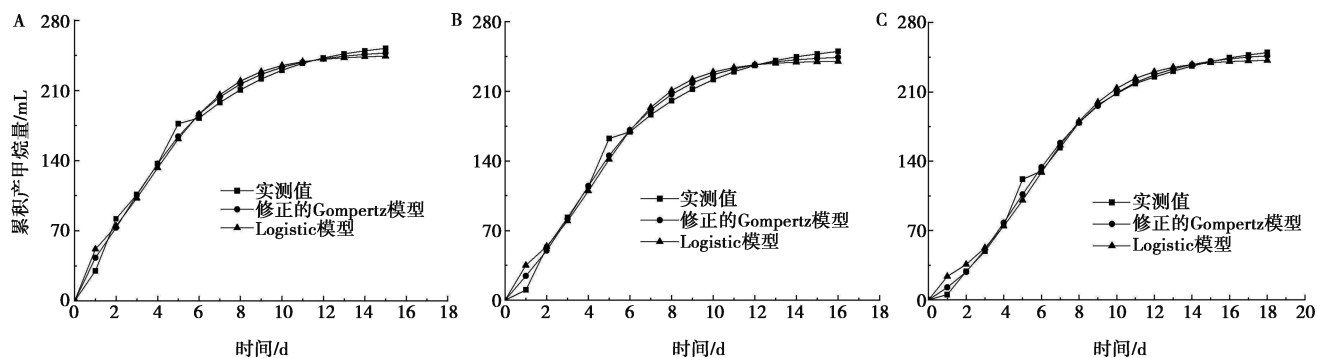
当初始 VS 水平相同时, 不同猪粪接种比例的产甲烷潜力无显著差异 ( $P>0.05$ ), 各猪粪处理组所得猪粪 BMP 分别为 (183.42±9.18)、(189.02±11.25) 和 (191.88±3.50) mL/g, 其均值 BMP 为 (188.11±4.31) mL/g, 低于中温条件下的 (250.59±1.28) mL/g。

## 2.2 厌氧消化动力学分析

### 2.2.1 中温猪粪产甲烷动力学模型

由图 4 与表 3 可知, 在中温条件下修正的 Gompertz 模型的  $R^2$  保持在 0.991~0.997 之间, 均大于 0.99, 拟合程度良好。模型  $RMSE$  保持在 4.67~6.97 之间, AIC 与 BIC 值保持在 64.43~71.61 和

64.62~71.07 范围内。Gompertz 模型的预测结果分别为 247.40 mL/g ( $S/I=0.5$ ), 244.10 mL/g ( $S/I=1.0$ ) 和 246.39 mL/g ( $S/I=2.0$ )。对于 Logistic 模型来说, 其回归系数  $R^2$  保持在 0.981~0.991 之间, 均大于 0.98, 拟合程度良好。Logistic 模型的预测结果分别为 244.19 mL/g ( $S/I=0.5$ ), 240.19 mL/g ( $S/I=1.0$ ) 和 241.74 mL/g ( $S/I=2.0$ )。模型  $RMSE$  保持在 7.70~10.12 之间, AIC 与 BIC 值保持在 75.46~83.56 和 74.40~83.01 范围内。通过对比 2 种模型的  $RMSE$ 、AIC 值与 BIC 值可知, 修正的 Gompertz 模型较 Logistic 模型能更好对中温条件下不同接种比例猪粪的 BMP 值进行预测。



A.  $S/I=0.5$ ; B.  $S/I=1.0$ ; C.  $S/I=2.0$ 。

图 4 中温条件下 2 种模型拟合的累积产甲烷曲线

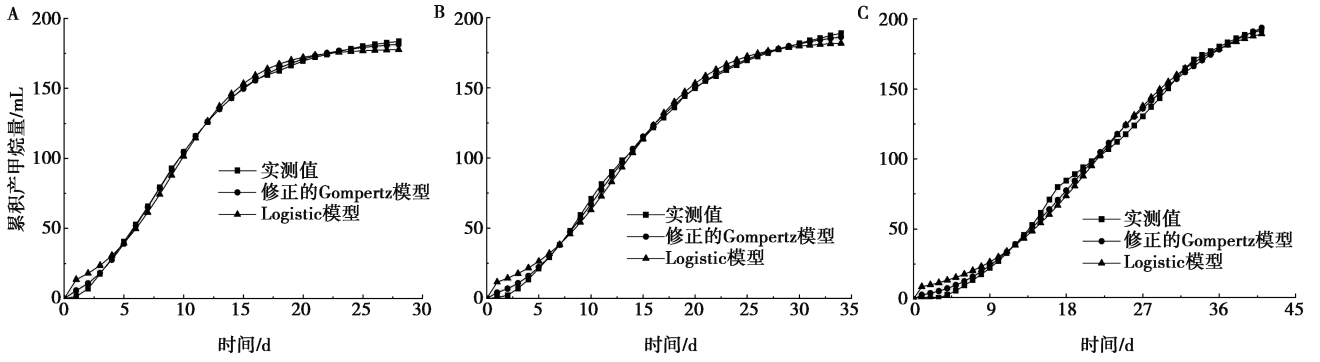
表 3 中温条件下 2 种模型 BMP 拟合结果

模型	指标	$S/I=0.5$	$S/I=1.0$	$S/I=2.0$
Gompertz	BMP 值/( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )	247.40	244.10	246.39
	$R^2$	0.991	0.992	0.997
	$RMSE$	6.45	6.97	4.67
	AIC 值	65.78	71.61	64.43
	BIC 值	64.62	71.07	64.91
Logistic	BMP 值/( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )	244.19	240.19	241.74
	$R^2$	0.983	0.981	0.991
	$RMSE$	8.91	10.12	7.70
	AIC 值	75.46	83.56	82.44
	BIC 值	74.40	83.01	82.93

### 2.2.2 低温猪粪产甲烷动力学模型

由图 5 与表 4 可知, 在低温条件下修正的

Gompertz 模型的  $R^2$  保持在 0.996~0.999 之间, 均大于 0.99, 拟合程度良好。模型  $RMSE$  保持在 1.85~3.86 之间, AIC 值与 BIC 值保持在 28.57~116.64 和 32.16~123.49 范围内。修正的 Gompertz 模型的预测结果分别为 181.41 mL/g ( $S/I=0.5$ ), 186.24 mL/g ( $S/I=1.0$ ) 和 193.50 mL/g ( $S/I=2.0$ )。对于 Logistic 模型来说, 其  $R^2$  保持在 0.991~0.994 之间, 均大于 0.99, 拟合程度良好。Logistic 模型的预测结果分别为 177.58 mL/g ( $S/I=0.5$ ), 181.88 mL/g ( $S/I=1.0$ ) 和 189.18 mL/g ( $S/I=2.0$ )。模型  $RMSE$  保持在 4.42~5.97 之间, AIC 与 BIC 值保持在 90.92~152.43 和 94.51~159.28 范围内。通过对比 2 种模型的  $RMSE$ 、AIC 值与 BIC 值可知, 修正的 Gompertz 模型较 Logistic 模型能更好地对低温条件下不同接种比例猪粪的 BMP 值进行预测。



A. S/I=0.5; B. S/I=1.0; C. S/I=2.0。

图5 低温条件下2种模型拟合的累积产甲烷曲线

表4 低温条件下2种模型的BMP拟合结果

模型	指标	S/I=0.5	S/I=1.0	S/I=2.0
Gompertz	BMP 值/(mL · g <sup>-1</sup> )	181.41	186.24	193.50
	R <sup>2</sup>	0.999	0.999	0.996
	RMSE	1.85	1.95	3.86
	AIC 值	28.57	52.60	116.64
	BIC 值	32.16	57.32	123.49
Logistic	BMP 值/(mL · g <sup>-1</sup> )	177.58	181.88	189.18
	R <sup>2</sup>	0.994	0.993	0.991
	RMSE	4.42	5.09	5.97
	AIC 值	90.92	117.95	152.43
	BIC 值	94.51	122.68	159.28

### 3 讨论

本研究中得出中温条件下猪粪的 BMP 值为 (250.59±1.28) mL/g, 不同接种比例猪粪的 BMP 无显著差异, 这与其他文献报道不同。Lu 等<sup>[20]</sup> 在初始 TS 浓度 8% 的条件下按照猪粪与接种液 3 : 1 (以 VS 计) 的比例进行中温厌氧消化, 得出以 VS 计的猪粪 BMP 值为 227.2 mL/g; Santos 等<sup>[21-22]</sup> 以市政污水处理厂污泥为接种液, 在 8% 的初始总固体量 (TS) 水平下采用 0.65 与 1 两种水平的接种比, 测得葡萄牙中部地区养殖场猪粪的 BMP 值分别为 0.329 m<sup>3</sup>/kg 与 0.568 m<sup>3</sup>/kg, 其依据 TS 水平确定接种比例, 得出不同接种比对猪粪 BMP 有较大影响; Liu 等<sup>[23]</sup> 以污水处理厂的污泥为接种液, 按猪粪与污泥比例为 1 : 2 (以 VS 计) 进行试验, 未控制初始 VS 水平, 发现不同接种比下测试结果有较大差异; Hu 等<sup>[24]</sup> 以培养的微藻混合菌群为接种液, 取初始 VS 水平 5 g/L 和猪粪与接种液比例 1 : 2 (以 VS 计), 于中温条件下得出猪粪 BMP 值为 547 mL/g。本研究测试结果与其他

研究者所得结果不同的原因可能是本文接种比例以 VS 计, 且接种物与猪粪来源与上述研究均有所不同; 此外, 本研究中猪粪的 BMP 值以标准状况 (1 标准大气压, 0 ℃) 体积给出, 而上述其他研究未说明是否将数据转化为标准状况体积。从数据可比性角度考虑, 试验条件与数据记录方式的不同将造成试验结果的差异, 建议今后不同研究人员对 BMP 值应说明是标准状况下的修正体积还是试验环境条件下的实际体积。

### 4 结论

累积甲烷产量和最大日甲烷产量均与猪粪 S/I 呈显著正相关; 中温或低温条件下, 初始 VS 为 3% 时, 不同 S/I 猪粪的 BMP 值无显著差异; 修正的 Gompertz 模型较 Logistic 模型更适合对猪粪的 BMP 值进行预测; 接种比不是猪粪 BMP 测试的限制因素, 从节省物料与测试时间的角度考虑, 建议将猪粪 BMP 值测试的 S/I 设为 0.5。

### 参考文献:

- [1] FAO. FAOSTAT [DB/OL]. [2023-06-13]. <https://www.fao.org/faostat/zh/#data/GT>.
- [2] KHALID A, ARSHAD M, ANJUM M, et al. The anaerobic digestion of solid organic waste [J]. Waste Management, 2011, 31 (8): 1737-1744.
- [3] LI Q, GAO M, LI J. Carbon emissions inventory of farm size pig husbandry combining Manure-DNDC model and IPCC coefficient methodology [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 320: 128854.
- [4] RINCÓN B, BANKS C J, HEAVEN S. Biochemical methane potential of winter wheat (*Triticum aestivum* L.): Influence of growth stage and storage practice [J]. Bioresource Technology, 2010, 101 (21): 8179-8184.
- [5] 成喜雨, 李超, 李兵, 等. 物料产甲烷潜力分析技术及设备评述

- [J]. 可再生能源, 2013, 31 (5): 72-79.
- [6] ANGELIDAKI I, ALVES M, BOLZONELLA D, et al. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays [J]. *Water Science and Technology*, 2009, 59 (5): 927-934.
- [7] KAFLE G K, KIM S H, SUNG K I. Ensiling of fish industry waste for biogas production: a lab scale evaluation of biochemical methane potential (BMP) and kinetics [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 127: 326-336.
- [8] MUTUNGWAZI A, AWOSUSI A, MATAMBO T S. Comparative functional microbiome profiling of various animal manures during their anaerobic digestion in biogas production processes [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2023, 170: 106728.
- [9] 徐文倩, 董红敏, 尚斌, 等. 典型畜禽粪便厌氧发酵产甲烷潜力试验与计算 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37 (14): 228-234.
- [10] 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.
- [11] 马文林, 刘翌晨, 李向辉, 等. 猪粪常温厌氧消化处理的有机物迁移转化特征研究 [J]. *畜牧与兽医*, 2020, 52 (7): 39-46.
- [12] NAKAMURA Y, ISHIBASHI M, KAMITANI Y, et al. Microbial community analysis of digested liquids exhibiting different methane production potential in methane fermentation of swine feces [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2020, 191 (3): 1140-1154.
- [13] SU J, LV W, REN L, et al. Effect of water regime on the dynamics of free ammonia during high solid anaerobic digestion of pig manure [J]. *Chemosphere*, 2023, 312: 137328.
- [14] 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: 122552.
- [15] XU S, DUAN Y, ZOU S, et al. Evaluations of biochar amendment on anaerobic co-digestion of pig manure and sewage sludge: waste-to-methane conversion, microbial community, and antibiotic resistance genes [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 346: 126400.
- [16] NGUYEN D D, CHANG S W, JEONG S Y, et al. Dry thermophilic semi-continuous anaerobic digestion of food waste: performance evaluation, modified Gompertz model analysis, and energy balance [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 128: 203-210.
- [17] ŞENOL H. Anaerobic digestion of hazelnut (*Corylus colurna*) husks after alkaline pretreatment and determination of new important points in Logistic model curves [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 300: 122660.
- [18] 路冰洁, 杜晨秋, 郭芯竹, 等. 温湿度对建筑室内典型霉菌生长影响及其动力学模型 [J]. *中国环境科学*, 2023, 43 (3): 1368-1377.
- [19] 李光辉, 王哲旭, 徐汇, 等. 基于探地雷达和深度学习的果树根径预测方法 [J]. *农业机械学报*, 2022, 53 (11): 306-313.
- [20] LU T, ZHANG J, SU T, et al. Coupled mechanism of enhanced and inhibitory effects of nanoscale zero-valent iron on methane production and antibiotic resistance genes in anaerobic digestion of swine manure [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 360: 127635.
- [21] SANTOS A D, SILVA J R, CASTRO L M, et al. Kinetic prediction of biochemical methane potential of pig slurry [J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 159-165.
- [22] SANTOS A D, SILVA J R, CASTRO L M, et al. A biochemical methane potential of pig slurry [J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 153-158.
- [23] LIU X, LEE C, KIM J Y. Thermal hydrolysis pre-treatment combined with anaerobic digestion for energy recovery from organic wastes [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2020, 22 (5): 1370-1381.
- [24] HU Y, KUMAR M, WANG Z, et al. Filamentous microalgae as an advantageous co-substrate for enhanced methane production and digestate dewaterability in anaerobic co-digestion of pig manure [J]. *Waste Management*, 2021, 119: 399-407.