

夏 嵩, 付嘉琦, 付尹宣, 等. 三种湿地植物厌氧发酵产甲烷特性及产物稳定性研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 2061–2066.

XIA Song, FU Jia-qi, FU Yin-xuan, et al. Methanogenesis and digestate stability of three wetland plants treated by anaerobic digestion[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 2061–2066.

## 三种湿地植物厌氧发酵产甲烷特性及产物稳定性研究

夏 嵩, 付嘉琦, 付尹宣, 晏 恒, 陈小平, 吴九九

(江西省科学院能源研究所, 南昌 330096)

**摘 要:**为研究湿地植物资源化利用潜力,采用全自动甲烷潜力测试系统对不同温度下三种湿地植物厌氧发酵产甲烷特性进行评价,并对产甲烷过程及发酵产物稳定性进行模拟和分析。结果表明:在30 d发酵周期内,中温(37 ℃)下三种湿地植物巨菌草、狐尾藻和水葫芦累积甲烷产量分别达166.5、159.4、236.9 mL·g<sup>-1</sup> VS,分别比常温(25 ℃)提高了29.6%、18.3%和39.9%(*P*<0.01),且中温发酵产气速度更快,发酵周期更短,挥发性固体(VS)去除率更高;采用热重-示差扫描量热法(TG-DSC)对发酵产物稳定性进行分析, TG曲线呈现三个明显失重过程(100 ℃, 250~350 ℃及400~600 ℃),全发酵周期总失重率逐渐降低, DSC曲线有两个明显的放热峰,低温区(300 ℃)放热强度逐渐降低,高温区(400~550 ℃)狐尾藻峰强度逐渐降低,巨菌草和水葫芦逐渐增加,且峰值右移,表明有机物逐步降解,发酵产物稳定性增加;采用Cheynoweth方程对巨菌草、狐尾藻和水葫芦中温发酵产气过程进行拟合,模型相关系数均大于0.95,产气预测值和实测值差异比分别为1.98%、0.82%和0.32%(*P*>0.05)。研究表明厌氧发酵制甲烷是湿地植物资源化利用的有效途径,有利于解决人工湿地技术二次污染问题。

**关键词:**厌氧发酵;湿地植物;产甲烷;发酵产物稳定性;热重分析

中图分类号:S216.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)09-2061-06 doi:10.11654/jaes.2018-0003

### Methanogenesis and digestate stability of three wetland plants treated by anaerobic digestion

XIA Song, FU Jia-qi, FU Yin-xuan, YAN Heng, CHEN Xiao-ping, WU Jiu-jiu

(Institute of Energy, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China)

**Abstract:** To investigate the potential of wetland plants for energy utilization, the characteristics of methane production by anaerobic digestion of three wetland plants were evaluated using an automatic methane potential test system (AMPTS). The methanogenic process and stability of digestate were further simulated and analyzed. The results showed that cumulative methane production of three wetland plants, *Pennisetum* sp., *Myriophyllum verticillatum*, and *Eichhornia crassipes*, reached 166.5 mL·g<sup>-1</sup> VS, 159.4 mL·g<sup>-1</sup> VS, and 236.9 mL·g<sup>-1</sup> VS under mesophilic conditions, respectively, which were 29.6%, 18.3%, and 39.9% higher than their respective production obtained under room temperature within a 30-day digestion cycle (*P*<0.01). Moreover, a faster methane production rate, a shorter digestion cycle, and a higher volatile solids (VS) removal rate were achieved under mesophilic conditions. The characteristics of mesophilic digestate of the three wetland plants were investigated by thermogravimetry-differential scanning calorimetry (TG-DSC). Three weight losses were observed around 100 ℃, 250~350 ℃, and 400~600 ℃, and the total weight loss rate decreased with digestion time. The DSC profiles for the three wetland plants were characterized by two exothermic peaks (300 ℃ and 400~550 ℃). The peak intensity in the low temperature zone (300 ℃) for the three plants decreased across the entire digestion period. In the high temperature zone (400~550 ℃), the peak intensity of *M. verticillatum* decreased, whereas the intensity of *Pennisetum* sp. and *E. crassipes* increased across the entire digestion period. In addition, a right shift of high temperature exothermic peaks was observed in *Pennisetum* sp. and *E. crassipes*. These changes in profiles of TG-DSC implied a higher conversion of organic matter and a greater stability of digestate across the entire digestion period. The Cheynoweth equation was used to

收稿日期:2018-01-02 录用日期:2018-02-27

作者简介:夏 嵩(1985—),男,江西南昌人,博士,副研究员,从事生物质能源及微生物技术研究。E-mail: xiasongsummer212@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31700311);江西省重点研发计划项目(20171BBF60025);江西省青年科学基金项目(20161BAB214181);江西省新能源发展专项(赣能综字[2014]248号);江西省科学院重大科技专项(2016-YZD1-03)

**Project supported:** The National Natural Science Foundation of China (31700311); Key Research and Development Program of Jiangxi Province (20171BBF60025); Jiangxi Province Science Foundation for Youths (20161BAB214181); Jiangxi Province New Energy Development Project (2014-248); Key Scientific and Technological Project of Jiangxi Academy of Sciences(2016-YZD1-03)

fit the methanogenic process of *Pennisetum* sp., *M. verticillatum*, and *E. crassipes*. The correlation coefficients of the models proved to be more than 0.95, and the difference ratio was between the predicted and measured values at 1.98%, 0.82%, and 0.32%, respectively ( $P > 0.05$ ). Our results indicated that production of methane by anaerobic digestion is an effective way to utilize wetland plants and is conducive to solving the secondary pollution of constructed wetland plants.

**Keywords:** anaerobic digestion; wetland plants; methanogenesis; digestate stability; thermogravimetric analysis

人工湿地(constructed wetland)是模拟自然湿地系统,将土壤、沙、石等材料按比例组成基质,并和水体、动植物、微生物等共同构建的类似于自然湿地的新型污水净化系统<sup>[1]</sup>。湿地植物是人工湿地系统重要的组成部分,植物可以吸收氮、磷等污染物,输送氧气,促进微生物活动,增强和维持介质的水力传输等;植物还能美化环境,改善区域气候,促进生态环境的良性循环,具有重要的生态及社会效益<sup>[2]</sup>。

大量研究报道了湿地水生植物对污染物的去除效果及作用机制<sup>[3-4]</sup>,然而对植物资源的后续处理及资源化利用报道较少。水生植物生长速度快、生物量高、水分和有机质含量高,如不及时收割,不但影响净化效果,植株腐烂后还会造成二次污染<sup>[5]</sup>。因此,开展湿地植物资源化利用对解决人工湿地技术二次污染问题具有重要意义。有研究表明,湿地植物生物量积累较高,如巨菌草生物量达到250~400 t·hm<sup>-2</sup>,每公顷水葫芦年产量可达75万 t<sup>[2,6]</sup>。湿地植物可利用水体中的营养盐,不需要额外添加营养物,种植成本较低;同时,湿地植物纤维素和半纤维素含量较高,木质素含量较低,适合作为厌氧发酵的原料<sup>[5]</sup>。

湿地植物的有机物含量和稳定性程度是其土地利用的重要指标。通过厌氧发酵处理可增加有机废弃物稳定性,减少植物毒性物、致病菌、重金属和异味等不利影响<sup>[7]</sup>。尽管许多分析手段被用于生物稳定化研究,但有机物生物转化度的量化分析仍十分困难。有研究表明热分析技术可用于评价生物产物的稳定性,如厌氧发酵物和堆肥等<sup>[8]</sup>。因此,本研究选取了三种湿地植物(巨菌草、水葫芦和狐尾藻),采用全自动甲烷潜力测试系统和热重分析-示差扫描量热法(TG-DSC)对其在不同温度下的厌氧发酵产甲烷特性

和产物稳定性进行研究,并通过Cheynoweth方程对发酵产气过程进行动力学模拟,以为湿地植物的资源化利用提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

厌氧消化污泥取自江西万年某猪场废弃物厌氧发酵罐活性污泥。三种湿地植物:巨菌草(*Pennisetum* sp.)、狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)以及水葫芦(*Eichhornia crassipes*),采自该猪场厌氧废水人工湿地处理系统。植物采集后自然风干,粉碎至40目,储存于-20℃冰箱备用。三种植物及接种污泥的基本性质见表1。

### 1.2 实验设置

发酵实验装置采用瑞典Bioprocess Control公司的全自动甲烷潜力测试系统(Automatic Methane Potential Test System, AMPTS),全自动实时采集整个发酵周期的甲烷产量,内置温度和压力传感器自动校正数据,可精准测量气体流量,避免了不同环境和批次对实验结果的影响。发酵单元容量500 mL,反应体系总量400 g。厌氧罐通过水浴加热,温度设置为中温(37℃)和常温(25℃)。接种按照污泥:植物的挥发性固体(VS)质量比为2:1接入,反应体系总固体浓度(TS)为8%。搅拌过程通过电机自动控制实现,搅拌间隔为5 min。

### 1.3 实验方法

TS和VS含量通过重量法测定,pH采用上海雷磁PHS-3C型pH计测定,总碳(TC)和总氮(TN)通过湖南三德科技公司SDCHN435元素分析仪测定。厌氧发酵物稳定性分析采用发酵产物固液分离后的沼渣

表1 三种湿地植物和接种污泥的基本性质

Table 1 Characteristics of three wetland plants and inoculated sludge

成分	pH	总固体TS/%	挥发性固体VS/%	(VS/TS)/%	总碳TC/%	总氮TN/%	TC/TN
接种污泥	7.84	12.5	7.2	58.0	30.8	2.7	11.4
巨菌草	—	89.8	84.6	94.2	55.5	1.4	40.2
狐尾藻	—	87.1	73.7	84.6	46.1	1.7	27.0
水葫芦	—	91.1	70.3	77.2	43.8	1.8	24.5

进行测试。发酵沼渣在80℃下烘72h,用于热重-示差扫描量热(TG-DSC)分析。TG-DSC分析采用德国耐驰STA449 F3,在合成气(氮气和氧气的混合比为4:1)氛围下,以10℃·min<sup>-1</sup>的速率升温至800℃。

#### 1.4 数据处理分析

所有试验至少3组平行,试验结果为平均值±标准误差。采用Origin 8.5软件进行数据处理及动力学分析。采用SPSS 19.0软件对数据进行差异显著性分析,利用Turkey HSD法进行多重比较, $P<0.05$ 即表明差异显著。

## 2 结果与讨论

### 2.1 发酵产甲烷特性及有机物去除效果

通过BMP测试(Biochemical Methane Potential)对三种湿地植物厌氧发酵产甲烷潜力进行研究。如图1a所示,30d发酵周期内,中温条件下水葫芦的累积甲烷产量最高,为236.9 mL·g<sup>-1</sup> VS,显著高于巨菌草(166.5 mL·g<sup>-1</sup> VS)和狐尾藻(159.4 mL·g<sup>-1</sup> VS)( $P<0.01$ );如图1b所示,当温度降到常温时,水葫芦、巨菌草和狐尾藻的最高累积甲烷产量分别为169.3、128.5、134.7 mL·g<sup>-1</sup> VS,产量均出现明显降低。30d发酵周期内,中温下水葫芦、巨菌草和狐尾藻甲烷产

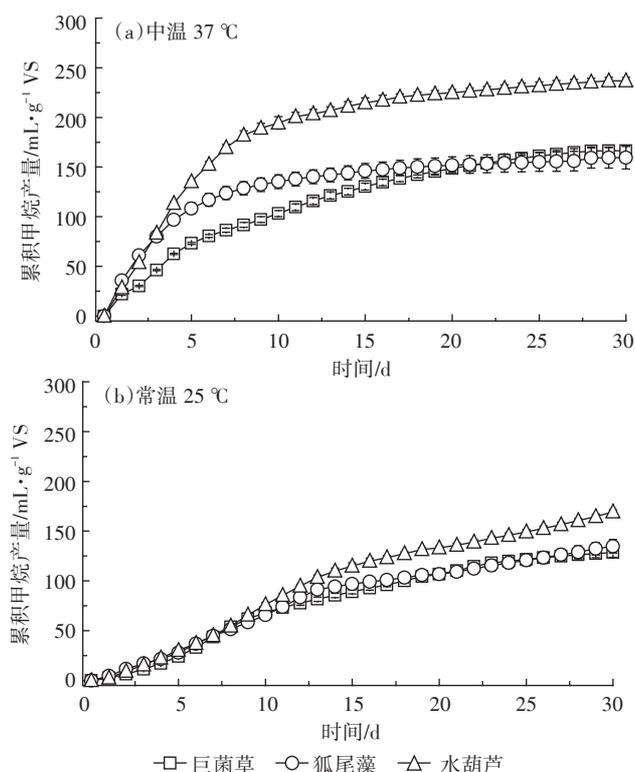


图1 不同温度下三种湿地植物厌氧发酵累积甲烷产量

Figure 1 Cumulative methane production of three wetland plants treated by anaerobic digestion at different temperatures

量较常温分别提高了39.9%、29.6%和18.3% ( $P<0.01$ )。结果表明,三种湿地植物均可作为厌氧发酵产甲烷的原料,其中水葫芦累积产甲烷量高于巨菌草和狐尾藻。温度对厌氧发酵效率影响显著,在30d发酵周期下中温比常温更有利于提高物料的累积甲烷产量。

图2表示不同温度下三种湿地植物厌氧发酵日甲烷产量变化。如图2a所示,中温下三种植物日甲烷产量迅速提高,发酵第1d即进入产气高峰期,持续8~10d。其中,巨菌草和狐尾藻的产气峰值均在第1d出现,分别为22.0、35.8 mL·d<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup> VS;水葫芦的产气峰值在第4d出现,为29.9 mL·d<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup> VS。按日产气量小于总产气量的1%即认为产气结束计算,巨菌草、狐尾藻和水葫芦的发酵周期分别为27、16d和18d。如图2b所示,30d常温发酵前期三种湿地植物日产气量逐渐提高,巨菌草、狐尾藻和水葫芦的产气峰值分别在第7、12d和第9d出现,分别为10.9、9.9、11.6 mL·d<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup> VS,均显著低于中温下相应的产气峰值( $P<0.01$ ),30d发酵时间内产气相对平稳,实验结束时产气均未结束。

表2归纳了三种湿地植物厌氧消化产甲烷特性

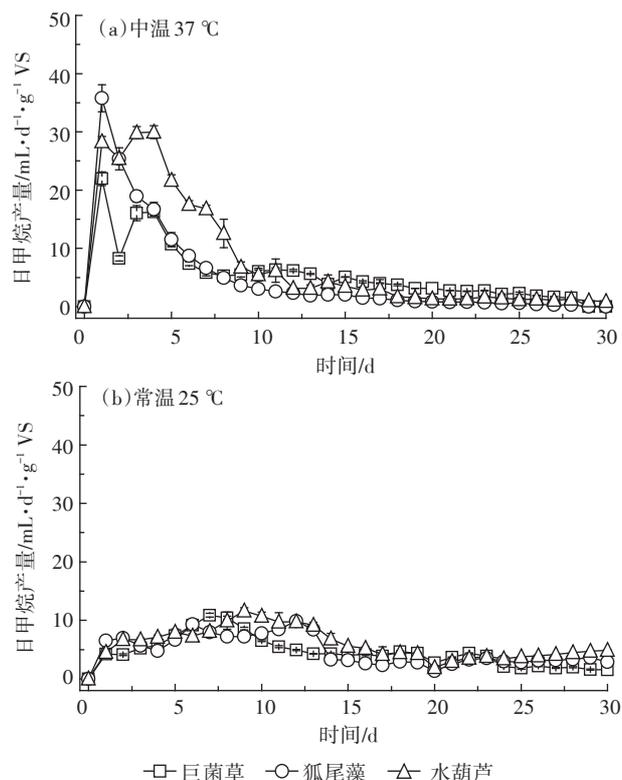


图2 不同温度下三种湿地植物厌氧发酵日甲烷产量

Figure 2 Daily methane production of three wetland plants treated by anaerobic digestion at different temperatures

表2 三种湿地植物厌氧消化产甲烷特征及有机物去除情况

Table 2 Characteristics of methanogenesis and organic degradation of three wetland plants treated by anaerobic digestion

发酵温度	湿地植物	累积甲烷产量/mL·g <sup>-1</sup> VS	最大日甲烷产量/mL·d <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> VS	发酵周期/d	VS去除率/%	终pH值
中温(37℃)	巨菌草	166.5	22.0	27	40.59	7.18
	狐尾藻	159.4	35.8	16	44.68	7.18
	水葫芦	236.9	29.9	18	58.20	7.28
常温(25℃)	巨菌草	128.5	10.9	>30	35.13	7.01
	狐尾藻	134.7	9.9	>30	40.73	7.09
	水葫芦	169.3	11.6	>30	42.35	7.11

及有机物去除情况。结果表明:在30 d实验周期内,中温下3种植物发酵甲烷产量更高、产气速度更快,发酵周期更短,且中温下原料的VS去除率也高于常温条件。发酵结束时,各实验组pH值在7.0~7.3之间,均处于正常范围内。杜婷婷等<sup>[9]</sup>综述了不同生物质废弃物厌氧发酵产气潜力,其中农业秸秆类总沼气产量在138~442 mL·g<sup>-1</sup> TS之间,林业废弃物在54~69 mL·g<sup>-1</sup> TS之间,能源植物在106~936 mL·g<sup>-1</sup> TS之间,畜禽粪便在215~495 mL·g<sup>-1</sup> TS之间。由于原料品种、发酵方式和实验条件不同,文献报道结果之间存在一定差异。总体来看,本文中三种湿地植物都具备较好的产气潜力,可作为厌氧发酵制甲烷的原料。由于不同植物的组成成分如纤维素、半纤维素、木质素、脂肪、蛋白和碳水化合物等含量对厌氧发酵具有显著影响,三种湿地植物的产气特征差异可能与其成分差异有关。李连华等<sup>[10]</sup>对杂交狼尾草和柳枝稷的厌氧发酵产甲烷潜力进行了研究,发现不同品种能源草的甲烷产量为214~288 mL·g<sup>-1</sup> VS。这是由于不同品种能源草的生长阶段和原料特性不同,TS、VS、C/N比和木质素、粗脂肪等含量都有差别,从而导致其产气性能出现差别。温度对厌氧发酵效率具有重要影响。邓怡国等<sup>[11]</sup>对25~40℃温度范围内菠萝叶渣的厌氧发酵产气特性研究发现:35℃试验组产气量明显优于其他3组,且发酵时间也小于其他组。贾丽娟等<sup>[12]</sup>研究发现:不同温度下牛粪厌氧发酵产气效率存在差异,35℃下原料产气量高于30℃和45℃,且各类功能微生物数量与比例最佳。综上认为,中温更有利于厌氧发酵微生物菌群的生长和代谢。

## 2.2 基于TG-DSC的厌氧发酵物稳定性分析

图3为中温下发酵周期内(0~30 d),三种湿地植物厌氧发酵物的TG和DSC变化曲线图。如图3a~图3c的TG变化表明,三种湿地植物均具有三个明显的失重过程:100℃左右的失重,主要是由于样品中残留的水挥发引起;250~350℃的失重,主要是由易降

解物质和半挥发性组分(如碳水化合物、脂肪族结构、羧基等)以及半纤维素、纤维素、微生物细胞壁等物质的燃烧引起;400~600℃的失重,主要是由于高分子量的芳香族和多环类结构,如木质素、腐植酸类物质的燃烧引起<sup>[13]</sup>。从整个发酵周期来看,三种湿地植物的TG曲线变化规律一致,即总失重率随发酵时间逐渐减少。狐尾藻、巨菌草和水葫芦的总失重率分别从第0 d的61.68%、60.21%和59.07%,逐渐降至第30 d的55.78%、55.02%和52.26%。这是由于随着厌氧发酵的进行,植物中的半纤维素、纤维素等物质被微生物分解利用,部分有机物逐渐转化成甲烷和二氧化碳等物质,因此可氧化的有机物量变少,总失重逐渐降低<sup>[14]</sup>。

如图3d~图3f所示,三种植物的DSC曲线在300℃和400~550℃有两个明显的放热峰。低温区(300℃),三种植物的放热峰峰型一致,强度随发酵时间呈降低趋势,这是由于厌氧发酵中易降解物质逐渐被消耗,导致低温区放热峰强度逐渐降低。高温区(400~550℃),狐尾藻的峰强度变化和低温区一致,呈现逐渐下降的趋势;而巨菌草和水葫芦随发酵时间增加,峰值右移,且峰强度具有增加趋势。这可能是由于随发酵进行,部分易降解物质向聚电解质大分子(如腐植酸)转化,分子复杂度和方向共轭度升高,产物稳定性程度增加,从而导致高温区放热增加、热解温度升高<sup>[15]</sup>。同时,研究结果也表明这种转化过程存在一定的物种特异性,可能与不同植物的结构和组成等因素有关。Wu等<sup>[16]</sup>在城市填埋垃圾的研究中发现,随着填埋时间增加,固形物矿化作用加强,挥发性物质释放减少,热解温度升高。

## 2.3 厌氧发酵产甲烷过程模拟分析

生物质厌氧发酵研究表明,其厌氧消化产甲烷过程遵循一级反应<sup>[17-18]</sup>。本文采用Cheynoweth等提出的生物质厌氧产甲烷动力学方程 $V=V_0(1-e^{-kt})$ 对中温下产气周期内三种湿地植物产甲烷过程进行模拟分

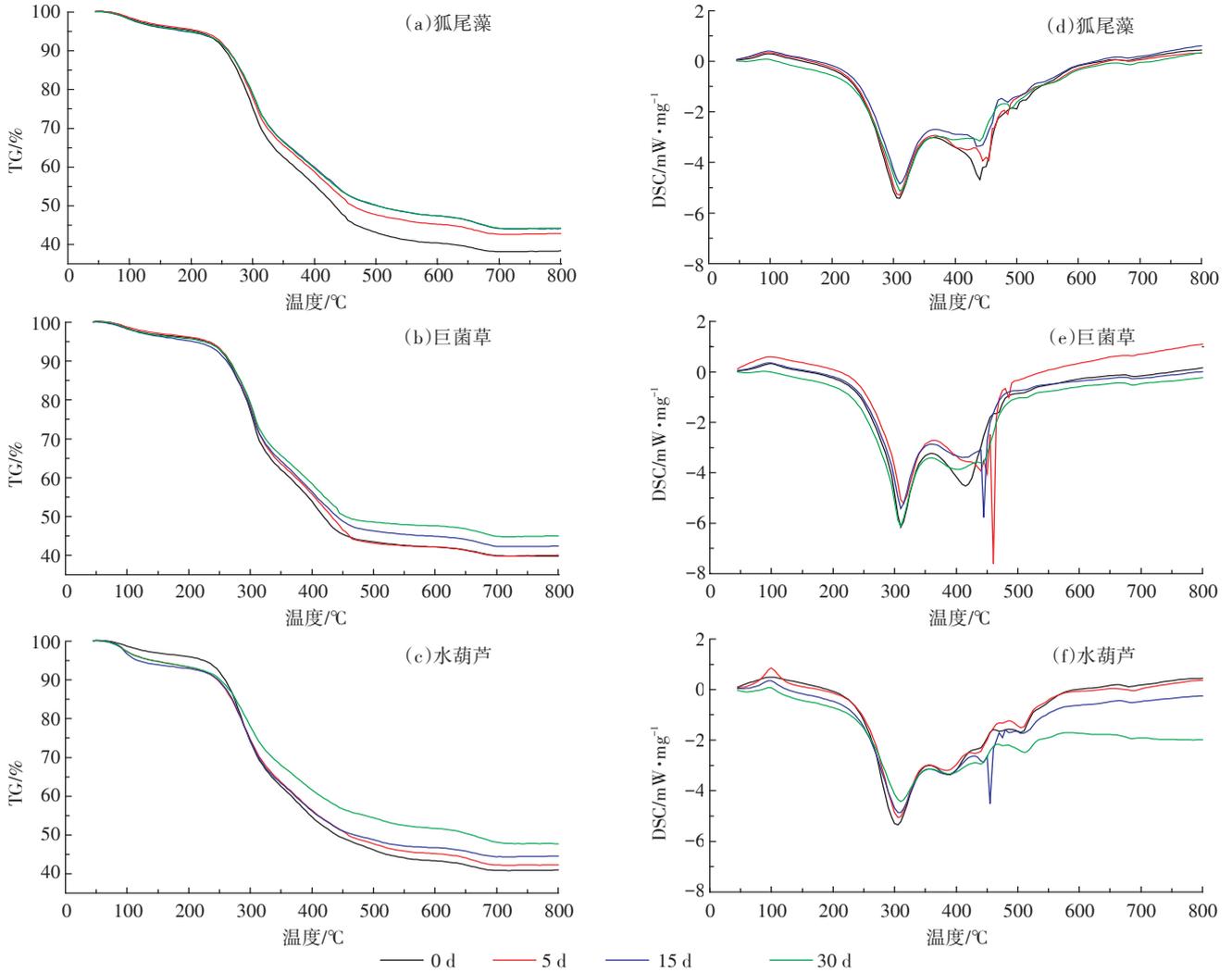


图3 中温发酵下三种湿地植物TG(a~c)和DSC(d~f)曲线变化

Figure 3 TG(a~c) and DSC(d~f) profiles obtained from mesophilic anaerobic digestion of three wetland plants

析(其中: $V$ 为甲烷产量, $V_0$ 为甲烷最终产量, $k$ 为反应速率常数, $t$ 为时间)。如图4a所示,巨菌草、狐尾藻和水葫芦产甲烷过程Cheynoweth方程拟合决定系数 $R^2$ 分别为0.956 4、0.977 0和0.991 1,均具有较好的相

关性,说明该方程能很好地反映发酵周期内三种湿地植物产甲烷的规律。将实验测定的三种湿地植物产甲烷数据代入Cheynoweth方程,获得实测数据和拟合预测数据的产甲烷曲线(图4b)。模型拟合结果与实

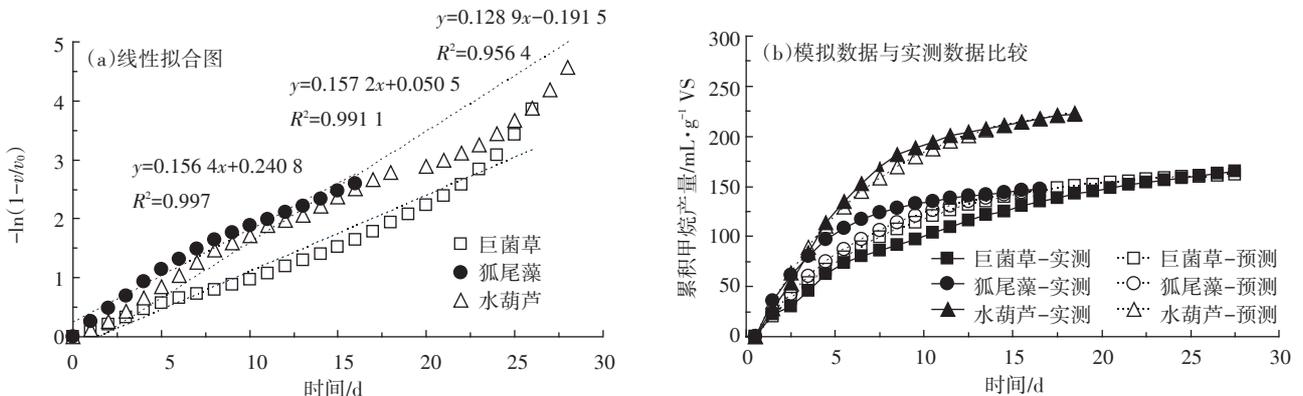


图4 Cheynoweth方程产甲烷动力学分析

Figure 4 Methanogenesis kinetic analysis fit by Cheynoweth equation

验数据比较接近,产气积累规律也较为一致。三种湿地植物巨菌草、狐尾藻和水葫芦最终产气预测值和实测值差异比分别为1.98%、0.82%和0.32%,进一步表明Cheynoweth方程可用于生物质厌氧发酵产甲烷过程的拟合。

### 3 结论

(1)厌氧发酵产甲烷是湿地植物资源化利用的有效途径,中温比常温更有利于提高发酵效率。30 d发酵周期内,巨菌草、狐尾藻和水葫芦中温发酵甲烷产量分别达166.5、159.4、236.9 mL·g<sup>-1</sup> VS,显著高于常温发酵;同时,中温(37℃)下三种湿地植物发酵周期(16~27 d)、产气峰值(22.0~35.8 mL·d<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup> VS)及其出现时间(1~4 d)、VS去除率(40.59%~58.20%)都优于常温(25℃)发酵。

(2)Cheynoweth方程可以反映三种湿地植物厌氧发酵产甲烷规律,所建模型与实际产甲烷过程较为接近, $R^2$ 均大于0.95。

(3)TG-DSC技术可用于厌氧发酵物的稳定性分析。三种湿地植物全发酵周期TG-DSC分析反映了厌氧过程中有机物的降解和发酵物稳定化过程。

#### 参考文献:

- [1] Vymazal J. Constructed wetlands for wastewater treatment[J]. *Water*, 2010, 2(3):530-549.
- [2] 敖子强,付嘉琦,桂双林,等.处理养猪废水的人工湿地植物筛选综述[J].*家畜生态学报*, 2016, 7(7):87-90.  
AO Zi-qiang, FU Jia-qi, GUI Shuang-lin, et al. Review of plants selection for artificial wetlands processing piggery wastewater[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2016, 7(7):87-90.
- [3] 李龙山,倪细炉,李志刚,等.5种湿地植物生理生长特性变化及其对污水净化效果的研究[J].*农业环境科学学报*, 2013, 32(8):1625-1632.  
LI Long-shan, NI Xi-lu, LI Zhi-gang, et al. Growth characteristics and sewage cleaning effect of five wetland plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8):1625-1632.
- [4] 谢静,吕锡武,李洁.6种湿地植物吸收污水中氮和磷的动力学[J].*环境工程学报*, 2016, 8(10):4067-4072.  
XIE Jing, LÜ Xi-wu, LI Jie. Uptake dynamics of N and P in polluted water by 6 different wetland plants[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 8(10):4067-4072.
- [5] 何明雄,胡启春,罗安靖,等.人工湿地植物生物质资源资源化利用潜力评估[J].*应用与环境生物学报*, 2011, 17(4):527-531.  
HE Ming-xiong, HU Qi-chun, LUO An-jing, et al. Assessment of constructed wetland plant biomass for energy utilization[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2011, 17(4):527-531.
- [6] Mishima D, Kuniki M, Sei K, et al. Ethanol production from candidate energy crops: Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and water lettuce (*Pistia stratiotes* L.)[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(7):2495-2500.
- [7] Sanchez-Monedero M A, Mondini C, de Nobili M, et al. Land application of biosolids. Soil response to different stabilization degree of the treated organic matter[J]. *Waste Management*, 2004, 24(4):325-332.
- [8] Molinuevo-Salces B, Gomez X, Moran A, et al. Anaerobic co-digestion of livestock and vegetable processing wastes: Fibre degradation and digestate stability[J]. *Waste Management*, 2013, 33(6):1332-1338.
- [9] 杜婷婷,云斯宁,朱江,等.生物质废弃物厌氧发酵的研究进展[J].*中国沼气*, 2016, 34(2):46-52.  
DU Ting-ting, YUN Si-ning, ZHU Jiang, et al. Research progress of anaerobic fermentation of different biomass waste[J]. *China Biogas*, 2016, 34(2):46-52.
- [10] 李连华,孙永明,袁振宏,等.能源草单独厌氧发酵产气性能研究[J].*中国沼气*, 2014, 32(1):18-22.  
LI Lian-hua, SUN Yong-ming, YUAN Zhen-hong, et al. Mono-digestion of different energy grass and biogas production[J]. *China Biogas*, 2014, 32(1):18-22.
- [11] 邓怡国,王金丽,孙伟生,等.温度对菠萝叶渣厌氧发酵产气特性的影响[J].*广东农业科学*, 2010, 37(12):107-109, 129.  
DENG Yi-guo, WANG Jin-li, SUN Wei-sheng, et al. Effect of temperature on anaerobic fermentation for biogas production in pineapple leaf residues[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010, 37(12):107-109, 129.
- [12] 贾丽娟,俞芳,宁平,等.温度底物浓度和微量元素对牛粪厌氧发酵产沼气的的影响[J].*农业工程学报*, 2014, 30(22):260-266.  
JIA Li-juan, YU Fang, NING Ping, et al. Influence of temperature, concentration of substrate and trace elements on anaerobic fermentation with dairy manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(22):260-266.
- [13] Liang Y, Cheng B, Si Y, et al. Thermal decomposition kinetics and characteristics of *Spartina alterniflora* via thermogravimetric analysis[J]. *Renewable Energy*, 2014, 68(7):111-117.
- [14] Otero M, Lobato A, Cuetos M J, et al. Digestion of cattle manure: Thermogravimetric kinetic analysis for the evaluation of organic matter conversion[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3):3404-3410.
- [15] Gomez X, Cuetos M J, Garcia A I, et al. An evaluation of stability by the thermogravimetric analysis of digestate obtained from different bio-wastes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 149(1):97-105.
- [16] Wu H, Zhao Y, Long Y, et al. Evaluation of the biological stability of waste during landfill stabilization by thermogravimetric analysis and fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(20):9403-9408.
- [17] Richards B K, Cummings R J, White T E, et al. Methods for kinetic analysis of methane fermentation in high solids biomass digesters[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1991, 1(2):65-73.
- [18] 王寿权,严群,阮文权.蓝藻猪粪共发酵产沼气及动力学研究[J].*食品与生物技术学报*, 2008, 27(5):108-112.  
WANG Shou-quan, YAN Qun, RUAN Wen-quan. Study on the production and dynamics of methane production by co-fermentation of blue-green algae and pig manure[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2008, 27(5):108-112.