

# 鲜水葫芦与其汁液厌氧发酵产沼气效率比较

叶小梅, 常志州\*, 钱玉婷, 朱萍, 杜静

(江苏省农业科学院 江苏省农业废弃物资源化工程技术研究中心, 南京 210014)

**摘要:** 为开发高效处理水葫芦的厌氧发酵产沼气技术, 该文在 35℃ 中温条件下, 分别以鲜水葫芦和经固液分离的水葫芦汁为发酵底物, 应用实验室自行设计的 2 套完全混合搅拌反应器 (CSTR) 进行了厌氧发酵比较研究。结果表明, 以水葫芦为底物直接进行厌氧发酵, 最大容积负荷为 2.0 kg/(m<sup>3</sup>·d), 挥发性固体 (VS) 产气率为 267 mL/g, 容积产气率为 0.61 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d), 滞留期为 27 d, 平均甲烷体积分数为 58%, 而以水葫芦汁为底物, COD (化学需氧量) 容积负荷可达 6.0 kg/(m<sup>3</sup>·d), 原料 (COD) 产气率为 231 mL/g, 容积产气率可达 1.4 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d), 平均甲烷体积分数为 66%, 滞留期仅需 2.4 d, COD 平均去除率达 85%, MLVSS (挥发性悬浮物浓度) 平均去除率可达 88%。因此, 对水葫芦进行固液分离, 以水葫芦汁作为厌氧发酵原料可大大提高处理效率, 为水葫芦资源化利用提供了一条新途径。

**关键词:** 沼气, 厌氧发酵, 效率, 水葫芦, 固液分离, 水葫芦汁, 完全搅拌混合式反应器 (CSTR)

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.04.035

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-04-0208-07

叶小梅, 常志州, 钱玉婷, 等. 鲜水葫芦与其汁液厌氧发酵产沼气效率比较[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 208—214.  
Ye Xiaomei, Chang Zhizhou, Qian Yuting, et al. Comparison of biogas production efficiency of anaerobic digestion using water hyacinth and its juice from solid-liquid separation as feedstock[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 208—214. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

水葫芦 (*Eichhornia crassipes*(Martius) Solms Laubach) 又称凤眼莲、水荷花、洋水仙等, 属久雨花科、凤眼莲属, 原产南美洲, 是一种多年生飘浮水生草本植物。相关研究表明, 水葫芦在相对静止且营养丰富的水体中, 年生物量 (干质量) 可达 750 t/hm<sup>2</sup>, 如果合理打捞与管理, 年生物量可达 13 500 t/hm<sup>2</sup>[1]。水葫芦作为水体氮磷生物富集的首选植物得到了共识[2], 近年来, 在云南滇池、江苏省太湖流域进行了水葫芦大规模控制性种养, 仅 2010 年江苏省太湖流域种养规模便达到了 1 667 hm<sup>2</sup>, 水葫芦的资源化利用成了目前急需解决的问题之一。

在化石能源日益紧张的今天, 生物能源的开发利用得到了世界各国的重视, 水葫芦作为能源作物利用已受到越来越多的关注[3]。水葫芦是良好的厌氧发酵原料, 总固体浓度 (total solid, TS) 产气率可达 290~640 mL/g<sup>[4]</sup>。由于水葫芦含水量高, 密度大, 体积小, 易飘浮, 使得厌氧发酵进、出料困难, 且容易堵塞反应器<sup>[4-5]</sup>, 众多研

究者针对水葫芦序批式、两相或多相厌氧发酵开展了大量工作<sup>[6-7]</sup>, 但以上工艺操作繁琐, 酸化时间长, 占地面积大。从工业应用上看, 投资者更喜欢设计简单、投资省, 操作简便的单相消化系统, 目前欧洲运行的处理市政废物的厌氧沼气处理工厂, 90%都是采用连续单相工艺<sup>[8]</sup>。

固液分离是解决水葫芦含水量过高, 实现水葫芦减量化的有效手段<sup>[9]</sup>。相关研究表明, 水葫芦经固液分离后, 可以获得营养丰富水葫芦汁, 化学需氧量 (COD) 产气率可达 312~332 mL/g<sup>[10-11]</sup>, 是良好的厌氧发酵底物, 进行完全搅拌混合式 (continuous stirred tank reactor, CSTR) 厌氧发酵时, 水力滞留时间仅需 2.5 d, 容积产气率可达 1.1 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)<sup>[12]</sup>。CSTR 反应器中的搅拌作用可以加强微生物与物料之间物质的传递, 提高降解有机物和生物产气的效果, 是处理高悬浮固体的主要反应器<sup>[13]</sup>, 目前未见应用 CSTR 工艺单相连续处理水葫芦的相关报道, 无法进行分析与比较以鲜水葫芦为底物和水葫芦固液分离预处理后以水葫芦汁为底物的两种厌氧发酵技术途径的产能效果、技术经济性能。为此, 本文采用 CSTR 工艺, 分别以水葫芦、水葫芦汁为厌氧发酵原料进行连续运行比较研究, 以期选择出水葫芦的高效厌氧发酵利用技术, 从而为水葫芦的规模化利用提供依据和指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

水葫芦: 取自江苏省农科院 2 号塘水葫芦放养区, 收集后的水葫芦经过 MM12 型绞肉机 (广东佛山丰伟五金制品有限公司) 粉碎后, 放入冰箱冷冻保存, 备用。根据水葫芦具有产酸快的特点<sup>[14]</sup>, 进料前在 35℃ 水浴条

收稿日期: 2011-03-10 修订日期: 2011-12-05

基金项目: 国家支撑计划 (2009BAC63B02); 江苏省农业自主创新项目 (CX1077602); 云南省社会事业发展专项 (2009CA034)

作者简介: 叶小梅 (1976—), 女, 福建长汀人, 副研究员, 博士, 主要从事有机废弃物资源化利用研究。南京市钟灵街 50 号 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 210014, 南京。Email: yexiaomei610@126.com

\*通信作者: 常志州 (1957—), 男, 江苏句容人, 研究员, 主要从事废弃物处理处置与资源化、环境微生物等方面的研究。南京市钟灵街 50 号 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 210014, 南京。

Email: chang02@jaas.ac.cn

件下自然酸化 3 d，试验期共采集了 8 批次样，其基本理化性状见表 1。

水葫芦汁：将水葫芦通过粉碎机（江苏省海门市建兴农牧机械设备厂）粉碎，再经过 SHJ-400 型水葫芦固

液分离器<sup>[15]</sup>进行挤压脱水，水葫芦汁的理化性状见表 2。

接种物：南京江宁川田沼气工程沼渣，悬浮物质量浓度（MLSS）为 9.74 g/L，挥发性悬浮物质量浓度（MLVSS）为 6.80 g/L。

表 1 水葫芦的理化性状  
Table 1 Physic-chemical characteristics of water hyacinth

采样批次	运行期/d	总固体	挥发性固体	总有机碳	总氮	总磷	总钾	纤维素	半纤维素	木质素	%
1	1~16	6.94	5.79	34.52	3.21	0.38	3.56	14.24	27.71	10.16	
2	17~25	4.7	3.76	34.45	3.39	0.60	4.22	17.44	25.05	8.44	
3	26~50	5.15	4.14	33.38	2.34	0.76	2.74	23.95	22.79	7.49	
4	51~60	6.14	4.97	33.87	2.77	0.32	4.31	21.93	26.59	7.80	
5	61~81	6.45	5.37	35.30	2.48	0.57	2.33	20.03	25.40	8.85	
6	82~92	5.77	4.52	33.74	3.20	0.34	3.96	16.45	21.97	17.63	
7	93~113	5.95	4.38	32.52	2.31	0.41	3.84	12.04	24.44	12.11	
8	114~125	6.31	4.10	29.27	2.32	0.86	1.87	14.11	23.61	14.81	

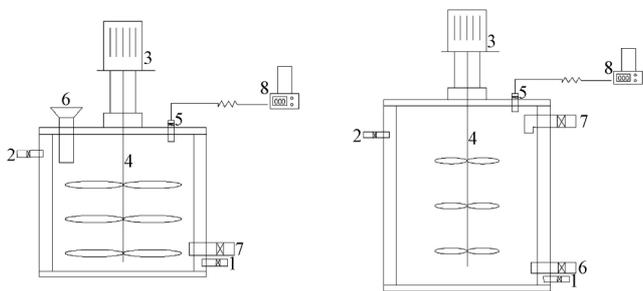
注：各种物质含量以干基质量分数计。

表 2 水葫芦汁的主要性状  
Table 2 Main characteristic of water hyacinth juice

悬浮物质量浓度/g·L <sup>-1</sup>	挥发性悬浮物质量浓度/g·L <sup>-1</sup>	化学需氧量质量浓度/g·L <sup>-1</sup>	总氮质量浓度/g·L <sup>-1</sup>	总磷质量浓度/g·L <sup>-1</sup>	总钾质量浓度/g·L <sup>-1</sup>
14.69~21.18	7.21~12.16	11.9~18.9	0.60~0.65	0.08~0.09	2.38~2.58

## 1.2 试验装置

根据水葫芦易漂浮、水葫芦汁悬浮物浓度高的特性，设计了 2 套完全混合搅拌 CSTR 反应器（图 1）。反应器 R1 用于发酵新鲜水葫芦料，如图 1a 所示，直径为 22 cm，高 30 cm，总体积 11.4 L，工作容积为 8.2 L，有机玻璃材质，双层夹套，用于水浴保温，设有垂直搅拌器，机械密封，搅拌轴连接高频电机与计时开关，由于水葫芦流动性差，进料口设为喇叭状口，进料口直径为 10 cm，采用上部进料下部出料的方式。反应器 R2 用于发酵水葫芦汁，如图 1b 所示，直径为 20.5 cm，高 40 cm，总体积 13.2 L，工作容积为 10.5 L，有机玻璃材质，双层夹套，用于水浴保温，搅拌装置同 R1，水葫芦汁通过蠕动泵在反应器底部进料，上部出料，出水经过 0.5 h 沉淀后，测定各项指标。



a. 水葫芦 R1 反应器  
1. 水浴进口 2. 水浴出口 3. 搅拌电机 4. 搅拌轴 5. 出气口 6. 进料口 7. 出料口 8. 气体计量仪

b. 水葫芦汁 R2 反应器  
图 1 完全搅拌混合式（CSTR）反应器结构图  
Fig.1 Schematic diagram of experimental continuous stirred tank reactor

## 1.3 试验方法

### 1.3.1 水葫芦厌氧发酵的启动与运行

试验开始时加入接种污泥 3 L，再加入 5 L COD 为

5 000 mg/L 的水葫芦汁，用于驯化与活化厌氧污泥。待产气结束后，开始连续进料、出料，每天进出料 1 次，容积负荷以单位反应器每天所投入挥发性固体（VS）的量表示。起初，水葫芦每日容积负荷为 0.5 kg/(m<sup>3</sup>·d)，产气量稳定后，逐步提高进料负荷，最终容积负荷提高至 2.8 kg/(m<sup>3</sup>·d)，反应器通过水浴夹套进行加温，水浴温度保持在 35℃，采用持续搅拌，搅拌频率为 10 r/min。

### 1.3.2 水葫芦汁厌氧发酵的启动与运行

试验开始时加入接种污泥 3 L，再加入 5 L COD 为 5 000 mg/L 的水葫芦汁，待产气结束后，开始连续进料、出料，水葫芦汁干物质浓度低，容积负荷以每 m<sup>3</sup> 反应器每天所投入的化学需氧量（COD）的量表示。起初，水葫芦汁每日进料 COD 负荷为 0.5 kg/(m<sup>3</sup>·d)，产气量稳定后，逐步提高进料负荷，最终容积负荷提高至 6.0 kg/(m<sup>3</sup>·d) 左右，反应器通过水浴夹套进行加温，水浴温度保持在 35℃，每隔 6 h 搅拌 1 次，搅拌频率为 10 r/min，每次搅拌 3 min。

### 1.4 分析项目与测定方法

总固体浓度、挥发性固体浓度、悬浮物浓度、挥发性悬浮物浓度采用常规分析方法；pH 值采用雷磁 pHS-2F 酸度计测定；甲烷含量采用 GC9890A/T 气相色谱仪测定；COD 测定采用 GB11914-1989 方法，采用姜堰市华晨仪器有限公司生产的 HCA-100 标准 COD（Cr）消解器进行测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 水葫芦与水葫芦汁产气率及容积负荷比较

水葫芦经过 125 d 的运行，VS 负荷逐渐提高至 2.8 kg/(m<sup>3</sup>·d)，其产气量、原料产气率随容积负荷的变化如图 2 所示。运行结果表明，随着容积负荷提高，反应器内可降解的有机物增加，产气量也在逐步增加（图 2a），但运行至负荷 2.8 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时，产气量出现了波动，这可

能是系统对此负荷有一个适应过程,也可能是由于该负荷下运行的 3 个批次进料水葫芦采收期不同,性状有差异(表 1),从而影响了产气量<sup>[16]</sup>。图 2b 表明,随着容积负荷的提高,水葫芦的原料产气率随之下降,这主要是由于进料量增加,水葫芦在反应器的滞留期缩短,水葫芦未得到充分的降解便被排出,从而导致原料产气率下降。在初始 0.5 kg/(m<sup>3</sup>·d)运行负荷下,水葫芦的平均原料(VS)产气率可达 525 mL/g,达到了的水葫芦产气潜

力水平<sup>[14]</sup>,接近于 Yukihiro Matsumura 推算的水葫芦理论产气潜力<sup>[17]</sup>。当运行负荷提高至 1.0 kg/(m<sup>3</sup>·d)时,水葫芦的平均原料产气率为 385 mL/g,而至 2.0 kg/(m<sup>3</sup>·d)负荷时,水葫芦平均原料产气率为 267 mL/g,仅是初始负荷下的原料产气率的 50%,有机负荷至 2.8 kg/(m<sup>3</sup>·d),原料产气率更低,因此,尽管在此运行负荷下未出现酸化抑制现象,但由于原料产气率过低的原因,水葫芦厌氧发酵的 VS 负荷不应大于 2.0 kg/(m<sup>3</sup>·d)。

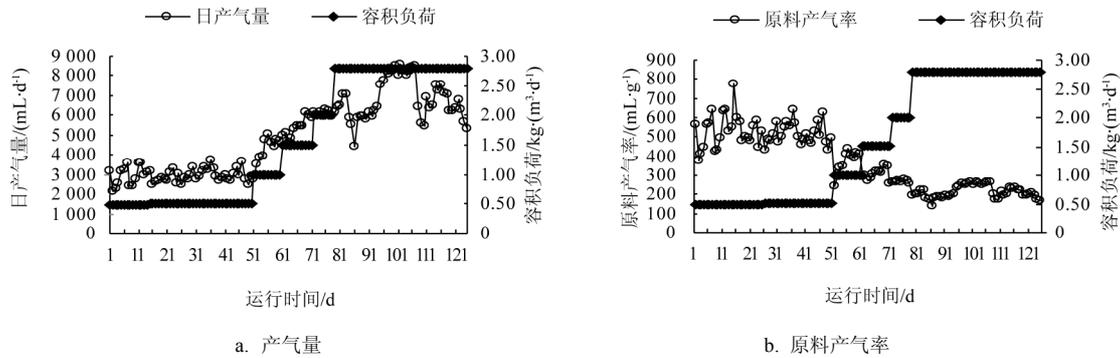


图 2 水葫芦产气量和原料产气率随容积负荷的变化

Fig.2 Variation of daily biogas production and biogas production rate of water hyacinth with change of organic loading rate

以水葫芦汁为原料,经过 80 d 的运行,其产气量、原料产气率随容积负荷的变化如图 3 所示。水葫芦汁的运行结果表明,随着容积负荷的提高,反应器的产气量也稳定增加,系统在 50 d 内便将 COD 负荷由 1.0 kg/(m<sup>3</sup>·d)稳定提高至 6.0 kg/(m<sup>3</sup>·d),在整个运行过程中,系统产气稳定(图 3a)。图 3b 表明,随着容积负荷的提高,水葫芦汁的原料产气量也有所下降,但下降幅度小于以水葫芦为底物的反

应器。初始 COD 负荷 0.5 kg/(m<sup>3</sup>·d)运行下,水葫芦汁的平均原料(COD)产气率为 327 mL/g,该产气率与胡晓明等<sup>[11]</sup>测得的水葫芦压榨汁产气潜力相当。当反应器运行负荷达到 5 kg/(m<sup>3</sup>·d)时,原料产气率仍可达 260 mL/g,是初始负荷的 80%,运行负荷达到 6.0 kg/(m<sup>3</sup>·d)时,原料产气率为 231 mL/g,是初始负荷的 70%,表明,在 COD 负荷为 6.0 kg/(m<sup>3</sup>·d)下,水葫芦汁仍能取得较好的产气效率。

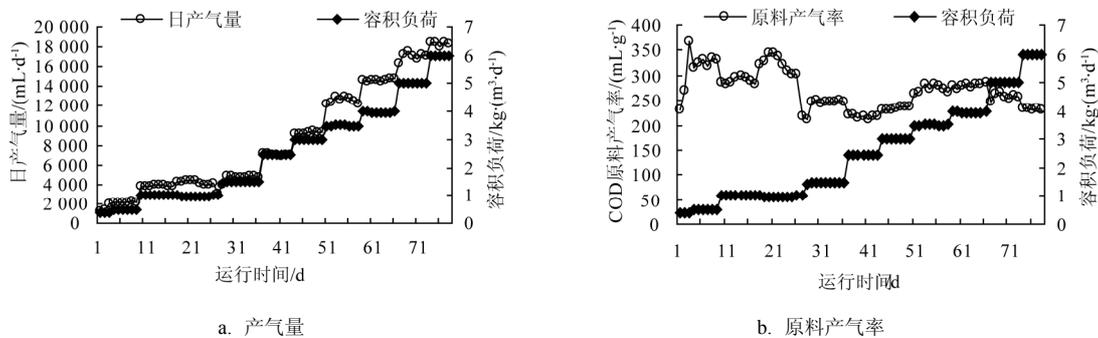


图 3 水葫芦汁产气量和原料产气率随容积负荷的变化

Fig.3 Variation of daily biogas production and biogas production rate of water hyacinth juice with change of organic loading rate

## 2.2 水葫芦与水葫芦汁滞留期及容积产气率比较

在 CSTR 反应器内,由于搅拌作用,水力滞留时间(HRT)与固物滞留时间(SRT)相等。图 4 显示了水葫芦、水葫芦汁在 CSTR 反应器的滞留时间与容积产气率的变化。结果表明,随着进料量的增加,滞留时间的缩短,反应器可用于降解的有机物增多,容积产气率随之增加。以水葫芦为底物进行厌氧发酵(图 4a),VS 负荷从 0.5 kg/(m<sup>3</sup>·d)提高至 2.0 kg/(m<sup>3</sup>·d),平均容积产气率从 0.29 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)提高至 0.61 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d),HRT 从 114 d 下降至 27 d,当水葫芦进料负荷提高至 2.8 kg/(m<sup>3</sup>·d)时,HRT 缩短为 15 d,此时容积产气率发生了波动,这主要是因为水葫芦含 40%以上的粗纤维,分解速率慢,过短的滞

留期使得水葫芦在反应器内无法得到充分的水解酸化,产气效率从而受到影响。由于水葫芦干物质含量较低,无法在保证足够滞留时间的同时进一步提高负荷,因此,HRT 影响了水葫芦容积负荷的进一步提高。

以水葫芦汁为底物进行厌氧发酵(图 4b),当 COD 运行负荷达到最高负荷 6.0 kg/(m<sup>3</sup>·d)时,容积产气率由初始的 0.2 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)提高至 1.4 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d),HRT 由初始的 25 d 降至 1.6~2.4 d,平均每天的进料量可达 420~620 L/(m<sup>3</sup>·d),这主要是由于水葫芦经固液分离后,难降解的纤维素类大分子物质主要残留在固体里,那些微小的易分解的固形物则保留在水葫芦汁内,这些有机养分能快速降解利用转化为甲烷,从而大大缩短了发酵周期。

查国君等采用二级和五级连续发酵工艺对水葫芦汁液进行发酵产沼气的试验，HRT 为 20 d<sup>[18]</sup>，而本试验仅需

2.4 d，这可能是因为 CSTR 反应器的污泥活性更高，能够适应较高的容积负荷并运行稳定<sup>[19]</sup>。

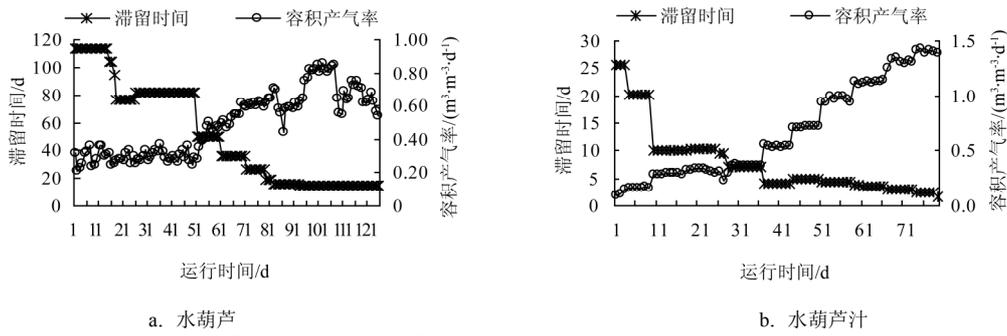


Fig.4 Variation of capacity biogas production rate of water hyacinth and its juice with change of hydraulic retention time (HRT)

2.3 水葫芦与水葫芦汁厌氧发酵过程中甲烷含量、pH 值比较

在整个运行周期，随着进料负荷的提高，反应器没有额外进行 pH 调节。图 5 列出了水葫芦、水葫芦汁厌氧发酵过程中甲烷体积分数、pH 值的变化。结果显示，以水葫芦为底物进行厌氧发酵，反应器 R1 内 pH 值稳定在 7.2~7.6 之间，以水葫芦汁为原料，反应

器 R2 内 pH 值稳定在 7.0~7.3 之间，说明随着容积负荷的提高，两个反应器并未出现酸化抑制。以水葫芦为底物进行厌氧发酵，甲烷体积分数在 53%~66%，平均为 58%，而以水葫芦汁为原料进行厌氧发酵，甲烷体积分数在 62%~73%，平均为 66%。这说明以水葫芦汁为原料进行厌氧发酵，其产生的沼气品质要好于水葫芦的厌氧发酵。

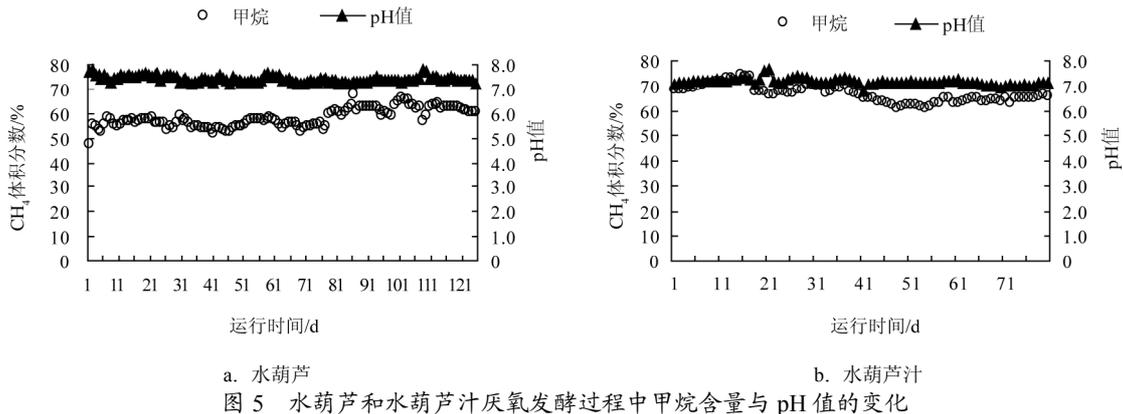


Fig.5 Variation of methane content and pH value during anaerobic digestion of water hyacinth and its juice

2.4 水葫芦、水葫芦汁厌氧发酵有机物消减比较

图 6、7 分别显示了水葫芦 VS 降解率、水葫芦汁进出料 COD、挥发性悬浮物浓度 (MLVSS) 的变化以及降解率。

以水葫芦为底物进行厌氧发酵，其 VS 降解率波动较大 (图 6)，这主要是因为水葫芦物料流动性差，出料困难，使得出料物性状差异较大，从而影响了 VS 降解率的计算。但从总体趋势可以看出，随着容积负荷的提高，VS 降解率也随之下落，在 2.0 kg/(m³·d) 容积负荷下，平均 VS 降解率为 54%，而当 VS 负荷为 2.8 kg/(m³·d) 时，平均 VS 降解率下降为 29%。

图 7 表明，随着进料负荷的提高，水葫芦汁的出料 COD、MLVSS 略有升高。当进料负荷在 1.0 kg/(m³·d) 以下时，出料 COD 低于 1 000 mg/L，COD 去除率达到 94%，MLVSS 降解率达到 90%；当进料负荷提高至 1.5 kg/(m³·d) 时，出料 COD 有所升高，达到了 2 000 mg/L，MLVSS 高于 1.0 g/L；但之后，随着系统对负荷的适应，出料 COD

保持稳定，运行负荷达到 5.0 kg/(m³·d) 时，系统的出料 COD 稳定在 2 300~2 600 mg/L，MLVSS 稳定在 1.2~1.6 g/L，COD 平均去除率为 87%，MLVSS 去除率达 89%，至 6.0 kg/(m³·d) 运行负荷，COD 平均去除率仍可达到 85%，MLVSS 平均去除率达 88%，说明反应运行稳定，耐负荷冲击能力强。

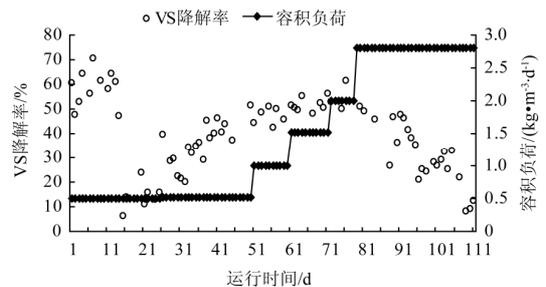


图 6 水葫芦挥发性固体 (VS) 降解率随有机负荷的变化  
Fig.6 Variation of volatile solid (VS) degradation rate of water hyacinth with change of organic loading rate

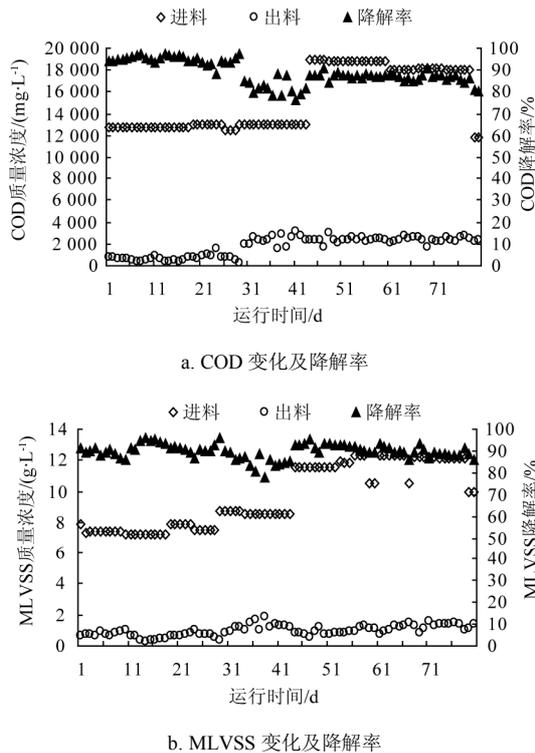


图 7 水葫芦汁进出料化学需氧量 (COD) 和挥发性悬浮物浓度 (MLVSS) 的变化及降解率  
 Fig.7 Variation of chemical oxygen demand (COD) and mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS) of influent and effluent and degradation rate of water hyacinth juice

2.5 水葫芦与水葫芦汁两种厌氧发酵技术途径分析比较

表 3 对以新鲜水葫芦为底物直接进行厌氧发酵和对水葫芦进行固液分离后以水葫芦汁为底物进行厌氧发酵两种技术工艺进行了分析比较。以水葫芦汁为原料与水

表 3 水葫芦与水葫芦汁两种厌氧发酵工艺技术分析比较

Table3 Technology comparison of anaerobic digestion with water hyacinth and its juice

发酵工艺	滞留时间/d	反应器处理能力/(kg·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	日产沼气/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	甲烷体积分数/%	预处理能耗	残余物处理
以新鲜水葫芦为底物	27	37	0.6	58	粉碎粒度<1 cm, 能耗约为 8 kW·t <sup>-1</sup>	处理困难, 需进行固液分离
以水葫芦汁为底物	2.4	415 (520 kg 新鲜水葫芦固液分离所得)	1.4	66	粉碎粒度≤5 cm, 粉碎能耗 6.0 kW·t <sup>-1</sup> , 固液分离能耗约为 2.08 kW·t <sup>-1</sup>	处理容易, 沼液可直接进行管道输送, 水葫芦挤压渣可直接进行堆肥处理

3 结论

以水葫芦为底物直接进行完全搅拌混合式 (CSTR) 厌氧发酵, 适宜挥发性固体 (VS) 负荷为 2.0 kg/(m<sup>3</sup>·d), VS 产气率为 267 mL/g, 容积产气率为 0.61 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d), 滞留时间 (HRT) 为 27 d, 平均甲烷体积分数为 58%, 而以水葫芦汁为底物, 化学需氧量 (COD) 负荷可达 6.0 kg/(m<sup>3</sup>·d), 原料 (COD) 产气率为 231 mL/g, 容积产气率可达 1.4 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d), 平均甲烷体积分数为 66%, HRT 仅需 2.4 d, COD 平均去除率达 85%, 挥发性悬浮物浓度 (MLVSS) 平均去除率可达 88%。与水葫芦直接厌氧发酵工艺相比, 水葫芦汁发酵工艺简单, 有效避免了水葫芦直接厌氧发酵可能引起的进出料困难、管道堵塞问

题, 且水力滞留时间短, 容积负荷高, 所需的建设反应器容积小, 投资低, 且容积产气率高, 同时, 对水葫芦进行固液分离预处理, 还可以达到水葫芦减量化的目的, 因此, 水葫芦汁厌氧发酵, 在技术上是可行的, 经济上更高效, 以上研究为水葫芦的产业化利用提供了一条新途径。

葫芦为底物相比, HRT 缩短了 11 倍以上, 也就意味着每天反应器的进料体积可以提高 11 倍以上, 容积产气率提高了 2 倍, 反应器的处理效率大大提高。以每天处理 1 t 水葫芦汁, 每 t 水葫芦可以得到汁约 800 kg, 挤压渣约 200 kg [20], 如果直接以水葫芦为原料进行厌氧发酵, 则需要 27 m<sup>3</sup> 以上的厌氧反应器, 而以水葫芦汁为原料, 则仅需 2.4 m<sup>3</sup> 的反应器, 反应器的投资可大大减少。关正军等研究了固液分离对牛粪厌氧发酵的影响, 也发现采用分离汁发酵与未分离的原牛粪相比可以提高甲烷的产气率, 缩短水力停留时间, 从而提高了设备利用率 [21]。

从运行能耗来看, 水葫芦汁需要进行固液分离预处理, 而直接以水葫芦为原料进行厌氧发酵, 在后续的发酵残余物处理中仍需进行固液分离处理, 因此, 两种处理方式所需的固液分离成本差异不大。此外, 以新鲜水葫芦为底物进行厌氧发酵, 为防止堵塞反应器, 粉碎粒径小, 所需的粉碎能耗高于固液分离处理。同时, 在运行过程中, 直接以水葫芦为原料, 由于水葫芦易漂浮, 物料黏滞, 需要进行持续搅拌, 反应器的运行能耗高于水葫芦汁运行所需的能耗。毛菁菁以蔬菜废物为底物在 15 L 的反应器进行厌氧发酵, 结果表明蔬菜废物的最优有机负荷为 2.75 kg/(m<sup>3</sup>·d), 但系统平均每日耗能高于产能 1 728.71 kJ [22]。因此, 以水葫芦汁为原料进行厌氧发酵, 既有效避免了水葫芦易漂浮堵塞反应器的问题, 还可大大减少反应器的投资及能耗, 且容积产气率高, 经济效益高。

此外, 对水葫芦进行固液分离预处理, 不仅有利于水葫芦汁的厌氧发酵, 且获得的水葫芦挤压渣含水量降低, 干物质浓度提高, 有利于进行饲料化 [23]、肥料化利用 [24] 或是进行干式厌氧发酵 [25] 等其它资源化利用方式, 为水葫芦的多元化综合利用开辟了一条新途径。

[参 考 文 献]

[1] 何加俊, 严少华, 叶小梅, 等. 水葫芦厌氧发酵产沼气技术研究进展[J]. 江苏农业学报, 2008, 24(3): 359-362.  
 He Jiajun, Yan Shaohua, Ye Xiaomei, et al. Progress in anaerobic digestion of water hyacinths[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2008, 24(3): 359-362. (in Chinese with English abstract)

- [2] 郑建初, 常志州, 陈留根. 水葫芦治理太湖流域水体氮磷污染的可行性研究[J]. 江苏农业科学, 2008, (3): 247—250.  
Zheng Jianchu, Chang Zhizhou, Chen Liugen. Feasibility study on water hyacinth control nitrogen and phosphorus pollution in Taihu lake basin water[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2008, (3): 247—250. (in Chinese with English abstract)
- [3] Cheng Jun, Xie Binfei, Zhou Junhu, et al. Cogeneration of  $H_2$  and  $CH_4$  from water hyacinth by two-step anaerobic fermentation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(7): 3029—3035.
- [4] Malik A. Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth[J]. Environment International, 2007, 33(1): 122—138.
- [5] Gunnarsson C C, Petersen C M. Water hyacinths as a resource in agriculture and energy production: A literature review[J]. Waste Management, 2007, 27(1): 117—129.
- [6] 陈彬, 赵由才, 曹伟华, 等. 水葫芦厌氧发酵工程化应用研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(6): 455—458.  
Chen Bin, Zhao Youcai, Cao Weihua, et al. Research and application of anaerobic fermentation of water hyacinth[J]. Environmental Pollution and Control, 2007, 29(6): 455—458. (in Chinese with English abstract)
- [7] Sankar G P, Ramasamy E V, Gajalakshmi S A. et al. Extraction of volatile fatty acids (VFAs) from water hyacinth using inexpensive contraptions, and the use of the VFAs as feed supplement in conventional biogas digesters with concomitant final disposal of water hyacinth as vermicompost[J]. Biochemical Engineering, 2005, 27(1): 17—23.
- [8] Bonallagui H, Touhami Y, Ben Cheikh R, et al. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes[J]. Process biochemistry, 2005, 40(3/4): 989—995.
- [9] 徐大勇, 徐祖信, 金伟, 等. 水葫芦压榨液厌氧发酵及其发酵液对青菜种子发芽和生长的影响[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(5): 40—43.  
Xu Dayong, Xu Zuxin, Jin Wei, et al. Anaerobic digestion of water hyacinth press juices and the effect of fermentation liquid on brassica chinensis germination[J]. Environmental Pollution and Control, 2009, 31(5): 40—43. (in Chinese with English abstract)
- [10] 查国君, 张无敌, 尹芳, 等. 滇池水葫芦固液分离后的沼气发酵研究[J]. 中国野生植物资源, 2008, 27(1): 36—38.  
Zha Guojun, Zhang Wudi, Yin Fang, et al. Separating solid and liquid of dianchi's Eichhornia crassipes for biogas generation[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2008, 27(1): 36—38. (in Chinese with English abstract)
- [11] 胡晓明, 查国君, 张无敌, 等. 水葫芦汁中温沼气发酵的实验研究[J]. 能源工程, 2008, 2: 36—38.  
Hu Xiaoming, Zha guojun, Zhang Wudi, et al. Experimental study on mesophilic biogas fermentation with juice of Eichhornia crassipes[J]. Energy Engineering, 2008, (2): 36—38. (in Chinese with English abstract)
- [12] 叶小梅, 周立祥, 严少华, 等. 厌氧 CSTR 反应器处理水葫芦汁研究[J]. 福建农业学报, 2010, 25(1): 100—103.  
Ye Xiaomei, Zhou Lixiang, Yan Shaohua, et al. Anaerobic digestion of water hyacinth Juice in CSTR reactor[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2010, 25(1): 100—103. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李荣平, 李秀金, Shulin Chen. 用于牛粪液厌氧消化的推流式和完全混合式反应器性能研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 186—190.  
Li Rongping, Li Xiujin, Shulin Chen. Performance evaluation of anaerobic digestion of dairy manure in plug flow reactor and continuous stirred tank reactor[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 186—190. (in Chinese with English abstract)
- [14] 叶小梅, 周立祥, 严少华, 等. 水葫芦厌氧发酵特性研究[J]. 江苏农业学报, 2009, 4(25): 787—790.  
Ye Xiaomei, Zhou Lixiang, Yan Shaohua, et al. Studies on the anaerobic digestion of water hyacinth[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2009, 4(25): 787—790. (in Chinese with English abstract)
- [15] 朱德文, 陈永生, 杜静, 等. SHJ-400 型水葫芦固液分离机设计与性能试验[J]. 农机化研究, 2011, (4): 79—84.  
Zhu Dewen, Chen Yongsheng, Du Jing, et al. Design and experiment of SHJ-400 liquid-solid splitter for hyacinth[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, (4): 79—84. (in Chinese with English abstract)
- [16] 陈广银, 郑正, 常志州, 等. 不同生长期互花米草的理化特性及厌氧发酵特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 260—265.  
Chen Guangyin, Zheng Zheng, Chang Zhizhou, et al. Characteristics of anaerobic digestion and physico-chemical properties of Spartina alterniflora at different growth stages[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 260—265. (in Chinese with English abstract)
- [17] Yukihiro M. Evaluation of supercritical water gasification and biomethanation for wet biomass utilization in Japan[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(9/10/11/12): 1301—1310.
- [18] 查国君, 刘波, 张无敌. 水葫芦固液分离后汁液连续发酵的研究[J]. 可再生能源, 2009, 27(6): 54—57.  
Zha Guojun, Liu Bo, Zhang Wudi. Study on continuous fermentation of separated liquid from Eichhornia crassipes for biogas[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(6): 54—57. (in Chinese with English abstract)
- [19] 罗钢, 谢丽, 周琪, 等. 高温厌氧 CSTR 反应器处理木薯酒精废水[J]. 中国给水排水, 2008, 24(9): 13—16.  
Luo Gang, Xie Li, Zhou Qi, et al. Study on treatment of cassava ethanol wastewater in thermophilic anaerobic CSTR[J]. China Water and Wastewater, 2008, 24(9): 13—16. (in Chinese with English abstract)
- [20] 杜静, 常志州, 黄红英, 等. 水葫芦脱水工艺参数优化研究[J]. 江苏农业科学, 2010, (2): 267—269.  
Du Jing, Chang Zhizhou, Huang Hongying, et al. Optimization of process parameters on dehydrated water hyacinth[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2010, (2): 267—269. (in Chinese with English abstract)

- [21] 关正军, 李文哲, 郑国香, 等. 固液分离对牛粪利用效果的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 259—263.  
Guan Zhengjun, Li Wenzhe, Zheng Guoxiang, et al. Effect of solid-liquid separation on utilization of dairy manure[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 259—263. (in Chinese with English abstract)
- [22] 毛菁菁. 蔬菜废物中温单相厌氧性能研究[D]. 北京化工大学, 2010: 39—40.  
Mao Jingjing. Vegetable Waster Performances of One-phase Anaerobic Digestion[D]. Beijing University of Chemical Technology, 2010: 39—40. (in Chinese with English abstract)
- [23] 白云峰, 周卫星, 严少华, 等. 水葫芦青贮饲喂羊肥育效果[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(5): 1108—1110.  
Bai Yunfeng, Zhou Weixing, Yan Shaohua, et al. Effects of feeding water hyacinth silage on lanbs fattening[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2010, 26(5): 1108—1110. (in Chinese with English abstract)
- [24] 于建光, 常志州, 李瑞鹏. 水葫芦渣粪便混合物蚯蚓堆制后微生物活性及物理化学性质的变化[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(5): 970—975.  
Yu Jianguang, Chang Zhizhou, Li Ruipeng. Microbial and physicochemical properties of the mixture of water hyacinth residue and excrement through vermicomposting[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2010, 26(5): 970—975. (in Chinese with English abstract)
- [25] 查国君, 刘波, 张无敌. 水葫芦固液分离后残渣连续干发酵的研究[J]. 可再生能源, 2009, 28(5): 84—87.  
Zha Guojun, Liu Bo, Zhang Wudi. Study on continuous dry-fermentation of separated solid of Eichhornia crassipes for biogas[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 28(5): 84—87. (in Chinese with English abstract)

## Comparison of biogas production efficiency of anaerobic digestion using water hyacinth and its juice from solid-liquid separation as feedstock

Ye Xiaomei, Chang Zhizhou<sup>\*</sup>, Qian Yuting, Zhu Ping, Du Jing

(Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing, 210014, China)

**Abstract:** To exploit efficient technology of anaerobic digestion with water hyacinth, a laboratory experiment was carried out to assess the performance of water hyacinth and its juice from solid-liquid separation as feedstock in two continuous stirred-tank reactors (CSTR) at 35°C. Results showed that when using water hyacinth as feedstock for anaerobic digestion, the suitable organic loading rate (OLR) were 2.0 kg/(m<sup>3</sup>·d) with 27 d hydraulic retention time (HRT), and the relevant biogas production rate of volatile solid and the volume biogas yield were achieved at 267 mL/g and 0.61 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d) with 58% average methane content, respectively. Comparatively, using the juice of water hyacinth as feedstock for anaerobic digestion, the biogas production rate of chemical oxygen demand (COD) and OLR were 6 kg/(m<sup>3</sup>·d) and 1.4 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d), respectively, in which average methane content was 66%. Meanwhile, its HRT was reduced to 2.4 d. The reduction of COD and mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS) were over 85% and 88%, respectively. Therefore, the juice of water hyacinth as feedstock for anaerobic digestion had higher utilization efficiency compared with water hyacinth itself, and consequently a new method for utilization of water hyacinth with less investment could be exploited.

**Key words:** biogas, anaerobic digestion, efficiency, water hyacinth, solid-liquid separation, juice of water hyacinth, continuous stirred - tank reactors(CSTR)