

不同水域凤眼莲厌氧发酵产甲烷研究

钱玉婷,叶小梅,常志州*,杜 静,潘君才 (江苏省农业科学院农业资源与环境研究所,江苏省农业废弃物资源化工程技术中心,江苏 南京 210014)

摘要: 采集滇池白山湾、滇池草海、太湖(武进段水域)以及江苏省农科院2号塘生长的凤眼莲,进行了批次厌氧发酵对比试验研究.结果发现,凤眼莲的产气潜力和水体氮磷水平有关系.水体氮磷浓度最高的滇池草海凤眼莲产气量最高,为 390mL/gTS(498mL/gVS);水质最好的滇池白山湾的凤眼莲产气量最低,为 289mL/gTS(334mL/gVS).白山湾凤眼莲的纤维素、半纤维素和粗蛋白等组分的降解率均最低.4个水体凤眼莲产生的有机酸均以乙酸和丙酸为主,草海凤眼莲发酵产生的有机酸浓度最高,可达 2466mg/L,白山湾凤眼莲最低,仅为 915mg/L.研究发现水体氮、磷浓度影响凤眼莲化学组分含量的差异及结构组成(根冠比),可能是影响凤眼莲厌氧生物降解性能及产气量差异的主要因素.

关键词: 凤眼莲; 氮; 磷; 厌氧发酵

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2011)09-1509-07

Methane production characteristics of water hyacinth from different water areas. QIAN Yu-ting, YE Xiao-mei, CHANG Zhi-zhou*, DU Jing, PAN Jun-cai (Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Nanjing 210014, China). *China Environmental Science*, 2011,31(9): 1509~1515

Abstract: To investigate the influences of nitrogen (N) and phosphorus (P) in water on the biogas production digested by water hyacinth, plants from Baishan Bay and Caohai Lake in Dianchi Lake, Wujin Region in Taihu Lake, and Pond Two in Jiangsu Academy of Agricultural Sciences were collected to conduct a mesophilic batch anaerobic digestion experiment. Results showed that the methane productivity from water hyacinth had significant correlation to the concentrations of N and P in waters. The highest biogas production was from water hyacinth in Caohai Lake, with production of 390mL/gTS (499mL/gVS); while the lowest was from the ones in Baishan Bay, with production of 289mL/gTS(334mL/gVS). Cellulose, hemicellulose and crude protein were the major contributors to the biogas production. Their degradation rates were the lowest in water hyacinth from Baishan Bay. Acetate and propionate were the main volatile fatty acids (VFA) during the anaerobic digestion of water hyacinth. Digestion of water hyacinth from Caohai Lake produced the highest VFA (2466mg/L), while VFA produced by the water hyacinth from Baishan Bay was only 915mg/L. It suggested that the concentrations of N and P in waters would contribute to the differences of structure (such as the ratio of root to shoot) and chemical composition of water hyacinth, and consequently influence its biodegradability and biogas productivity during the anaerobic digestion.

Key words: water hyacinth; nitrogen; phosphorous; anaerobic digestion

凤眼莲具有生长繁殖快、修复富营养污染水体能力强等特点,将凤眼莲作为底物进行厌氧发酵产沼气,具有水解酸化速度快,产气量高等优势^[1],因此,将凤眼莲水体修复功能与能源利用相结合,成为近年来研究的热点之一.

何加骏等^[2]调查表明不同文献报道的凤眼莲的产气潜力差异明显.Singhal等^[3]的研究认为,来自有机污染水体的凤眼莲积累了更高的氮、磷,

从而增加了凤眼莲的产气潜力.Verma等^[4]分析铜污染水体与清洁水源凤眼莲产气量差异时,认为前者产气量与甲烷含量高,是由于来自污染水体的凤眼莲吸收了大量有利于产甲烷菌生长的

收稿日期: 2011-01-07

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2009BAC63B02);云南省社会事业发展专项(2009CA034)

* 责任作者, 研究员, chang02@jaas.ac.cn

微量元素,而这些元素有利于产甲烷菌的生长.张志勇等^[5]研究表明,凤眼莲的生物量增长率与富营养化水体初始氮、磷浓度均具有显著的相关关系,其生物量增长随水体氮、磷浓度的增加而递增.但有关水体氮、磷浓度是否对凤眼莲的产气特性有影响,未见文献报道.

本试验选取滇池白山湾、滇池草海、太湖(武进段水域)以及江苏农业科学院院内 2 号塘 4 个富营养化程度不同的水体中生长的凤眼莲为原料,对发酵过程中的厌氧消化特征和产气特性进行了比较,以阐明水体氮、磷浓度对凤眼莲产气潜力的影响,同时为不同地区的凤眼莲发酵产沼气工程设计提供数据参考.

1 材料与方法

1.1 发酵底物与接种物

2010 年 6 月初在滇池外海白山湾、滇池草海、太湖竺山湾以及江苏省农业科学院院内“2 号塘”4 个人工控制性种养点放养凤眼莲,同年 8 月底至 9 月初采集,采样时每个点选择 5 个以上不同区域,24h 之内带回江苏省农业科学院水生植物培养室,一周内进行厌氧发酵实验.接种物取自南京市川田乳品有限公司的沼气发酵罐沼渣,其总固体 (TS) 为 9.74%,挥发性固体 (VS) 为 6.80%,含氮 2.16%,磷 1.09%,钾 1.14%.

1.2 实验设计及装置

实验在总容积为 2.5L,有效容积为 1.6L 的有机玻璃罐中进行,发酵罐中部设有液体取样口,顶部设有气体取样口,发酵罐设有水浴夹套以保证发酵温度保持恒定,产气量采用自制气体计量仪测定(装置见图 1).将不同水域的凤眼莲切成 1cm 小段^[6],分别装入反应器中,每个反应器装入同等干物质重量的凤眼莲,按 TS1:1 接种量接种污泥,最后加水调节使各处理的 TS 负荷均为 5%,通入氮气 5min 以除去罐内空气,密封,35℃ 水浴条件下进行厌氧发酵.各处理均设置 3 个重复,并设空白对照(即发酵罐中仅有接种污泥).试验开始后,每天测定产气量和甲烷含量,前 7d 每天取液体样测定 pH 和挥发性有机酸(VFA)含量,7d 后进行不定期取样.

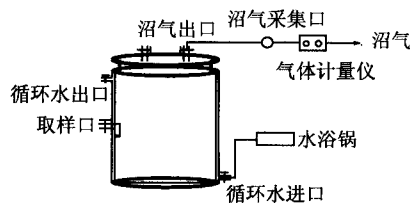


图 1 凤眼莲厌氧发酵装置

Fig.1 The anaerobic digestion equipment of water hyacinth

1.3 测定项目及方法

1.3.1 发酵原料参数的测定 TS 采用 105℃ 烘至恒重差重法测定(DHG-9023A 恒温箱,上海精宏实验设备有限公司); VS 采用 550℃ 灼烧 4h 差量法测定(4-10 马弗炉,上海圣科仪器设备有限公司);总有机碳(TOC)采用 TOC 仪测定(multi N/C3100,德国耶拿分析仪器股份公司);总氮、总磷和总钾的测定参考文献[7]方法;纤维素、半纤维素和木质素采用范氏法^[8](Van Soest)测定(FIWE,意大利 Velp Scientifica 公司);粗脂肪采用粗脂肪测定仪(SZF-06A,上海洪纪仪器有限公司)测定;碳水化合物含量(%)=100-(水分+粗蛋白+粗灰分+粗脂肪)(%),粗蛋白含量=总氮×6.25^[7].

1.3.2 厌氧发酵特性参数的测定 发酵液中的 TN 采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定;TP 采用过硫酸钾消解-钼锑抗比色法测定^[7];SCOD:将样品在 5000r/min 离心 10min,取上清液过 0.45μm 滤膜,采用姜堰市华晨仪器有限公司生产的 HCA-100 标准 COD(Cr)消解器进行消解后测定;pH 值用精密 pH 计测定(pHS-2F,上海雷磁仪器厂);气体组分(CH₄、CO₂、N₂)分析采用气相色谱法(GC9890A/T,公司名称);VFA 采用气相色谱法(GC-2014,日本岛津)测定.

1.3.3 厌氧生物降解率 采用下式计算 $\eta = B_0 / B_{th}$,式中: η 为厌氧生物降解转化率,%; B_0 为实际产甲烷量,L/gVS; B_{th} 为理论产甲烷量,L/gVS;理论产甲烷量根据有机组分化学转化进行计算^[9]: $B_{th}(L/gVS) = 0.415 \times \text{碳水化合物}\% + 0.496 \times \text{蛋白质}\% + 1.014 \times \text{脂肪}\%$.

1.4 数据处理

所有数据均扣除空白对照样后进行后续的

处理与分析.数据均用 EXCEL(2003 版)、SPSS13.0 软件进行统计分析处理.

2 结果与讨论

2.1 不同水域水环境及凤眼莲基本性状

4 个采样点的水质基本状况表明(表 1),实验水体均受到不同程度的氮磷污染,其中滇池草海水体已接近污水处理厂一级 A 的排放标准,滇池白山湾的污染程度最轻,达到地表水 V 类标准,4 个采样点水体总氮和总磷含量均表现为:滇池草海>2 号塘>太湖>滇池白山湾.

由表 2 可见,水体富营养化程度越高,生长的凤眼莲氮、磷含量相应也高,粗蛋白含量也较高.4 组样品中,白山湾凤眼莲的 C/N 比最高(29.6),草海凤眼莲最低(10.6),太湖水体与 2 号塘水体氮、磷差异较小,其凤眼莲 C/N 也较接近,分别为 11.4、12.2,这说明水体富营养化程度与其生长凤眼莲的 C/N 比有一定的负相关性.凤眼莲的碳水化合物以纤维素物质为主,占总干物质 50%以上,其中滇池白山湾生长的凤眼莲粗纤维含量最高,达 62%,其木质素含量在各样品中也最高.滇池草海与太湖凤眼莲的灰分显著高于其他两个水体的凤眼莲,达到 23%以上,这表明滇池草海与太湖凤眼莲具有较为丰富的无机养分.

由表 3 可以看出,凤眼莲根系长度与水体中氮、磷浓度密切相关,水体氮、磷浓度越低,凤眼莲根系越长,占全株干物重的比例越高,其原因在于较低的氮、磷浓度刺激了凤眼莲根系生长,使其通过增加根表面积来获取更多的营养物质^[10].在 4 组样品中,白山湾凤眼莲的根长是草海凤眼莲的 8 倍,是太湖和 2 号塘凤眼莲的 6 倍,其干物重占全株的比例达到了 44%,而草海凤眼莲根部干物种只占全株 16%.

表 1 不同水体水质状况

Table 1 Basic information on characteristics of four lakes

项目	白山湾	草海	太湖	2 号塘
地区	云南	云南	江苏	江苏
	昆明	昆明	常州	南京
水域种类	湖泊	湖泊	湖泊	池塘
pH 值	9.34	7.84	6.50	7.35
TN(mg/L)	0.92~2.61	11.5~15.1	2.35~2.97	4.99~6.21
TP(mg/L)	0.07~0.12	0.82~1.10	0.09~0.17	0.25~0.36
透明度(m)	0.32~0.67	0.53~0.82	0.29~0.51	0.37~0.88
叶绿素 a (mg/L)	0.019~0.038	0.051~0.099	0.029~0.064	0.038~0.066
COD (mg/L)	1.27~3.36	6.31~11.05	4.52~6.77	5.44~8.95
污染状况	轻度 富营养	重度 富营养	中度 富营养	中度 富营养

注:以上数据为6~8月的水体监测数据,水体的营养状况根据文献 [11]来评判

表 2 不同水体生长的凤眼莲组份(%)

Table 2 Physical and chemical characteristics of water hyacinth from four lakes (%)

组分	白山湾	草海	太湖	2 号塘
TOC	39.6a	34.1c	30.9d	35.4b
TN	1.34d	3.23a	2.72c	2.89b
TP	0.26c	0.56a	0.47b	0.50b
TK	2.40d	4.28a	3.14c	3.35b
粗蛋白	8.38d	20.2a	17.0c	18.1b
粗脂肪	2.12c	2.91a	1.88d	2.61b
粗灰分	13.4d	23.3b	29.2a	19.5c
碳水化合物	76.1a	60.5b	56.8c	59.8b
半纤维素	34.4a	23.7b	23.4b	20.0c
纤维素	27.8a	23.5c	17.7d	25.7b
木质素	13.0a	11.4b	11.6b	11.7b
总固体(TS)	5.95b	4.68c	5.91b	6.28a
挥发性固体(VS)	5.15a	3.64d	4.65c	5.05b
C/N	29.6a	10.6c	11.4b	12.2b

注:同行字母不同表示差异显著(P<0.05),字母相同表示差异不显著(P>0.05),下同

表 3 不同水域凤眼莲株高、根长以及各部位干物质重所占的比例

Table 3 Height, root length, and proportions of different organs in total weight in water hyacinth from four lakes

凤眼莲来源	株高(cm)	根长(cm)	根占总干重比(%)	茎占总干重比(%)	叶占总干重比(%)
白山湾	114±9.64a	79.7±9.57a	44.0±3.78a	40.7±4.97b	15.3±1.20c
草海	83.8±2.61c	9.44±1.12b	16.4±0.88c	53.7±2.78a	29.8±1.90a
太湖	88.6±3.28bc	12.4±1.51b	21.0±2.15b	53.7±4.02a	25.4±1.85b
2 号塘	92.7±1.89b	12.7±1.06b	21.4±1.50b	52.2±2.95a	26.5±1.46b

2.2 不同水域凤眼莲的厌氧发酵产气特性

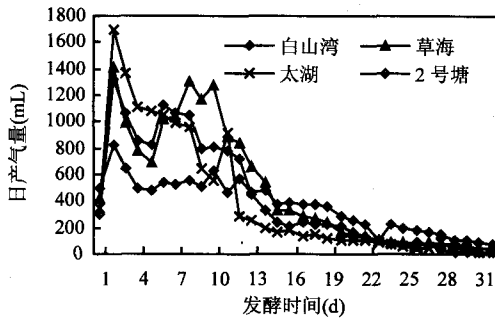


图2 日产气量变化曲线

Fig.2 Daily biogas production during the anaerobic digestion of water hyacinth from four water areas

由图2可见,各组凤眼莲发酵启动均较快,第2d日产气量即达到最大值,其中,太湖凤眼莲发酵启动最快,发酵前6d的日产气量均高于其他处理,这可能是因为太湖含有较丰富的无机养分,有利于厌氧微生物细胞的生长,还可促进酶的合成,从而加快了反应速率^[12-14]。草海凤眼莲在第2d出现产气高峰后,产气量明显下降,出现酸化抑制现象(图5),第6d产气恢复至正常水平,至第10d,累积产气量在所有样点中达到最高(图3),整个发酵过程中,白山湾凤眼莲日产气量最低。至发酵结束,滇池草海凤眼莲获得最高的累积产气量15675mL,滇池白山湾累积产气量最低,为11760mL,2号塘凤眼莲与太湖凤眼莲累积产气量相近,分别为13685mL和13035mL。

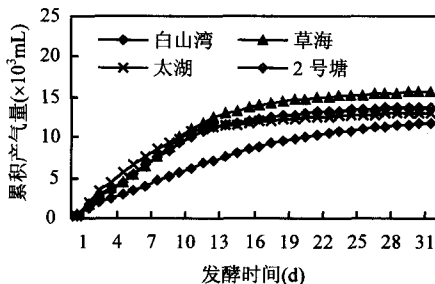


图3 累积产气量变化曲线

Fig.3 Accumulative biogas production during the anaerobic digestion of water hyacinth from four water areas

量升高最快,甲烷含量在第4d便达到了50%,第8d含量最高,达67%,而其他处理均在第6d才达到50%,这表明太湖凤眼莲的产甲烷活性最高。至发酵结束,各处理所获得的累积产甲烷量:滇池草海>2号塘>太湖>滇池白山湾。

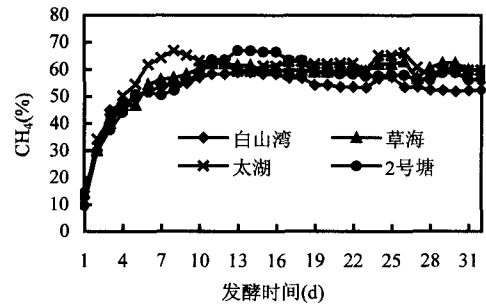


图4 甲烷含量的变化

Fig.4 Dynamics of methane content during the anaerobic digestion of water hyacinth from four water areas

2.3 凤眼莲厌氧发酵过程中发酵液的理化特征

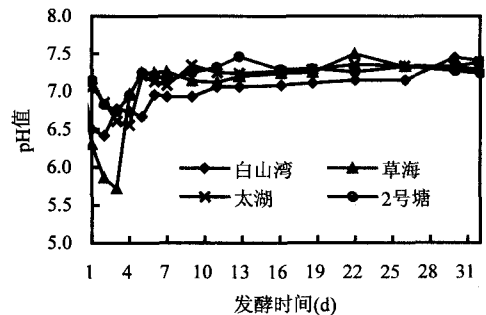


图5 发酵过程中pH值的变化情况

Fig.5 Changes of pH values during the anaerobic digestion of water hyacinth from four water areas

各处理的pH值(图5)均呈现先降后升,最后稳定在7~7.5左右。这与厌氧发酵过程中一系列生化反应相一致的,即刚开始以水解产酸为主,此后有机酸被逐渐消耗转化为甲烷,最终凤眼莲中化合物的水解酸化与有机酸消耗相平衡,使得反应体系中pH值基本稳定^[15-16]。其中草海凤眼莲处理的pH值下降幅度最大,第3d时pH值降至最低点5.72,产甲烷菌活性受到抑制,导致产气量下降(图2),第6d,pH值恢复至7.25,此时,产气也恢复正常。其他处理虽然前期也有一个下降过程,

分析甲烷含量(图4)发现,太湖凤眼莲甲烷含

但 pH 值保持在 6.5 以上,对产甲烷菌活性没有影响,从而产气没有受到影响。

VFA 是有机质经过水解酸化的主要中间产物,主要成分为乙酸、丙酸、丁酸和戊酸等。发酵液中 pH 值的变化,也可从发酵液中 VFA 浓度变化得到验证,由图 6 可以看出,各处理有机酸浓度呈先升后降的趋势。前期,凤眼莲以水解酸化为主,有机酸浓度快速增加,之后,随着产甲烷菌逐渐活跃,有机酸被大量消耗转化为甲烷与二氧化碳,其浓度快速下降。由以上分析可以发现,在凤眼莲厌氧发酵过程中,发酵液中 VFA、pH 值以及日产气量、产甲烷量之间存在明显的相关性,以草海

凤眼莲为例, pH 值与 VFA 之间的相关系数 $R=-0.8406$, $P=0.0068$,表明凤眼莲水解产生的有机酸是造成发酵液中 pH 值下降的最重要原因,同时,也说明反应体系中酸碱缓冲性能不强。对 pH 值和 VFA 含量与产气量、产甲烷量作进一步分析, pH 值的低峰值或 VFA 的高峰值出现在产气量增加的前期,这是由于有机酸的大量积累造成 pH 值降低,影响了产甲烷菌的活性,但与此同时,也为甲烷菌生长繁殖提供了大量的物质来源,随着产甲烷菌活性逐步增加,有机酸底物随后被甲烷菌充分利用后形成了产气高峰,气体中甲烷含量也迅速提高。

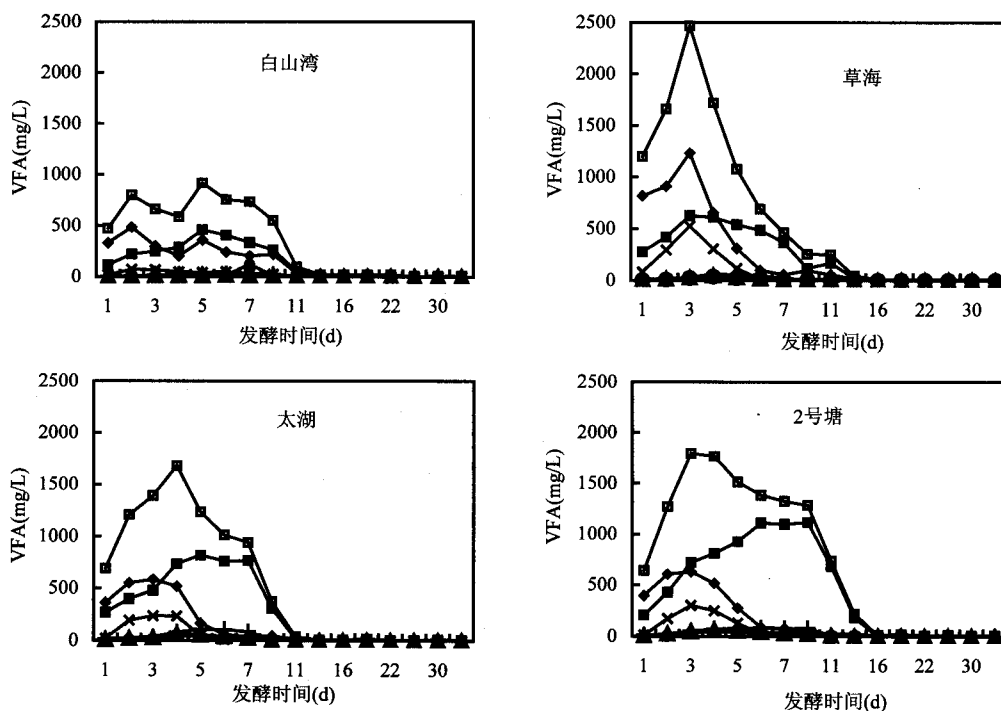


图 6 凤眼莲厌氧发酵过程中 VFA 含量变化情况

Fig.6 Dynamics of VFA contents during the anaerobic digestion of water hyacinth from four water areas

—◆— 乙酸 —■— 丙酸 —▲— 丁酸 —×— 异丁酸 —+— 戊酸 —○— 异戊酸 —□— 总 VFA

分析各处理发酵液中挥发性有机酸组分表明,各处理有机酸均由乙酸和丙酸组成,这与凤眼莲有机化合物以纤维素物质为主有关^[17]。由于乙酸可以直接为产甲烷菌利用,乙酸降解速度最快,丙酸降解较为缓慢,发酵第 16d 时,各处理已检测不出乙酸、丙酸含量,表明乙酸、丙酸得到了有

效的降解利用。不同水体凤眼莲发酵液中 VFA 变化趋势并不完全相同,草海凤眼莲处理水解产酸速率最快,产酸量最大,第 3d 有机酸浓度便达到最高峰,含量高达 2466mg/L,而白山湾凤眼莲处理产生的有机酸浓度最低,在第 5d 达到最高值,含量只有 915mg/L,太湖和 2 号塘凤眼莲处理的

最高 VFA 含量分别为 1680mg/L 和 1765mg/L。从有机酸组成看,草海凤眼莲产生的乙酸浓度最高,最高(1233mg/L),而 2 号塘凤眼莲在后期产生丙酸浓度最高(1111mg/L),丙酸积累被认为是厌氧发酵系统失败的一个重要指标,但该浓度未表现出对产气有抑制作用。

2.4 不同水体凤眼莲相关组分的降解率

表 4 厌氧发酵后样品各物质的降解率(%)

Table 4 Degradation rates of water hyacinth from four water areas after the anaerobic digestion (%)

指标	白山湾	草海	太湖	2 号塘
TS	21.6±1.03c	27.2±0.86a	25.6±0.68b	25.3±0.40b
VS	38.2±1.07b	47.0±1.36a	46.2±0.19a	45.2±0.69a
半纤维素	33.6±1.02c	40.0±1.11a	40.7±1.37a	36.9±1.40b
纤维素	37.1±1.12d	49.3±2.85b	43.9±2.62c	53.8±2.21a
木质素	-1.15±1.71a	0.42±2.96a	1.20±1.34a	3.70±2.11a
总 氮	3.80±0.55c	39.2±0.95a	36.2±1.49ab	34.0±2.89b

表 4 可知,厌氧发酵 32d 后,各处理的 TS、VS 均有不同程度的降低,草海 TS、VS 降解明显高于其他处理,滇池白山湾处理最低,太湖和 2 号塘处理的 TS、VS 降解率差异不显著。各处理 TS、VS 降解率不同主要体现在木质纤维素和总氮降解有差异,凤眼莲厌氧发酵后,主要降解了纤维素与半纤维素,而木质素几乎未降解,尽管滇池白山湾半纤维素、纤维素含量最高,但其半纤维素、纤维素的降解率最低,这可能是因为白山湾凤眼莲含有较高的木质素含量的缘故^[18];此外,草海、太湖、2 号塘的氮素损失高达 30% 以上;而白山湾仅损失

3.8%;这主要是因为草海、太湖、2 号塘的风眼莲蛋白质含量远高于白山湾凤眼莲(表 2),而蛋白质在厌氧发酵过程中被降解转化为甲烷和氨。

2.5 各处理 TS、VS 产气量及生物转化率

草海凤眼莲干物质产甲烷量比白山湾高出 38.9%,比太湖和 2 号塘凤眼莲产气率分别高出 14.4%、13.1%。根据 Buswell 公式,求得各处理凤眼莲的理论产气量,白山湾碳水化合物含量最高,因此求得的理论产气量最高,但实际产气量最低,因此表现为厌氧生物转化率最低(45.4%),而草海凤眼莲表现出最高的厌氧生物转化率(69.8%),太湖凤眼莲由于理论产气量低于 2 号塘凤眼莲,因此,生物转化率高于 2 号塘凤眼莲。

来自不同水体凤眼莲的厌氧发酵实验表明,凤眼莲产气速度快,甲烷含量高,且产气潜力高,除白山湾水体的凤眼莲产气潜力低于 300mL/gTS 外,其他试验水域的凤眼莲均达到了 330mL/gTS 以上,而鲜猪粪的产气潜力在 250~450mL/gTS,鲜牛粪的产气潜力在 180~300mL/gTS^[19],因此,凤眼莲是理想的厌氧发酵底物。

4 组水体凤眼莲的产气量差异显著,富营养化程度最高的草海凤眼莲产气量最高,而富营养化程度最低的白山湾凤眼莲的产气量最低,对水体的氮、磷含量和凤眼莲的产气量相关性分析表明,水体氮含量和其凤眼莲干物质产气量以及磷含量和凤眼莲干物质产气量的相关性系数 R 分别为 0.9302 和 0.8949,因此,水体氮磷养分浓度和其凤眼莲产气潜力有明显的相关性。

表 5 不同水体凤眼莲的产气量及厌氧生物降解转化率

Table 5 Biogas productions and anaerobic biotransformation rates of water hyacinth from four water areas

指标	白山湾	草海	太湖	2 号塘
TS 产气量(mL/g)	289±8.33d	391±5.25a	334±5.11c	356±9.99b
VS 产气量(mL/g)	334±9.62d	499±6.70a	424±6.49c	457±9.83b
TS 产甲烷量(mL/g)	149±5.38c	207±3.17a	181±2.45b	183±6.24b
VS 产甲烷量(mL/g)	172±6.22c	264±4.05a	229±3.11b	235±8.02b
理论产甲烷潜力(mL/gVS)	379±3.87a	378±2.64c	339±8.15d	367±2.55b
厌氧生物降解转化率(%)	45.4±0.75d	69.8±1.07a	67.6±2.43b	65.7±1.21c

研究发现,采集四个不同水体凤眼莲的根冠比相差显著(表 3),水体中氮磷浓度越高,凤眼莲

根冠比越小,凤眼莲的产气量、产甲烷量以及厌氧发酵生物转化效率越高,反之亦然。本试验各样

品中,白山湾根系发达,平均长 80cm 左右,有的甚至超过 1m,根占凤眼莲总干重的 44.03%,产气量最低,这与陈广银^[20]、Cheng 等^[21]试验结果表明根的产甲烷潜力最低的结论相一致,而草海凤眼莲其根系最不发达,仅占整株干重的 16.44%,产气量最高;太湖和 2 号塘处理与草海凤眼莲的基本性状相似,但其根占干物质比重(分别为 20.96% 和 21.36%)高于草海处理,其产气稍逊。不同水体生长的凤眼莲不同器官比重不同,与产气量差异关联的原因,还有待进一步分析研究。

3 结论

3.1 不同水体凤眼莲中,富营养化程度最高的云南滇池草海凤眼莲的产甲烷量最高,为 264mL CH₄/gVS,水质最好的滇池白山湾生长的凤眼莲产甲烷量最低,为 172mL CH₄/gVS,太湖、2 号塘水体氮磷浓度较相近,其生长的凤眼莲产甲烷量也较接近,分别为 229 和 235mL CH₄/gVS,表明水体的氮磷浓度影响凤眼莲的有机物组分含量以及可生物降解性,从而影响其产气量。

3.2 凤眼莲厌氧发酵主要降解了纤维素和半纤维素及粗蛋白,无论是哪种组分,白山湾凤眼莲的降解率均最低。在厌氧发酵过程中,四种水体凤眼莲产生的有机酸均以乙酸和丙酸为主,与产气量一致,草海凤眼莲发酵产生的有机酸浓度最高,可达 2466mg/L,白山湾凤眼莲最低,仅为 915mg/L。

参考文献:

- [1] Gunnarsson C G, Stuckey D C. Anaerobic digestion, principles and practice for biogas systems [M]. Integrated Resource Recovery Series 5, National Oceanic and Atmospheric Administration, World Bank, Washington D C 20433, USA, 1986.
- [2] 何加骏,严少华,叶小梅,等.凤眼莲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.
- [3] Singhal V, Rai J P N. Biogas production from water hyacinth and channel grass used for phytoremediation of industrial effluents[J]. Bioresource Technology, 2003,86:221-225.
- [4] Verma V K, Singh Y P. Biogas production from plant biomass used for phytoremediation of industrial wastes [J]. Bioresource Technology, 2007, 98:1664-1669.
- [5] 张志勇,刘海琴,严少华,等.凤眼莲去除不同富营养化水体中氮、磷能力的比较 [J]. 江苏农业学报, 2009,25(5):1039-1046.
- [6] 兰吉武,陈彬,曹伟华,等.凤眼莲厌氧发酵产期规律 [J]. 黑龙江科技学院学报, 2004,14(1):18-21.
- [7] 鲍士旦.土壤农化分析 [M]. 北京:中国农业出版社, 2000:264-271.
- [8] Van soest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition [J]. Journal Dairy Science, 1991,73: 3583-3598.
- [9] Angelidaki I, Sanders W. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2004,3(2):117-129.
- [10] 方云英,杨肖娥,濮培民,等.利用水生植物原位修复污染水体 [J]. 应用生态学报, 2008,19 (2):407-412.
- [11] 王明翠,刘雪芹,张建辉.湖泊富营养化评价方法及分级标准 [J]. 中国环境监测, 2002,18(5):47-49.
- [12] Li Y X, Speece R E. Stimulation effect of trace metals on anaerobic digestion of high sodium content substrate [J]. Water Treatment, 1995,10(2):145-154.
- [13] 朱先栋.微量元素对厌氧消化甲烷菌的激活作用 [J]. 太原理工大学学报, 2009,31(5):585-586.
- [14] 叶小梅,周立祥,常志州,等.温度、接种量及微量元素对凤眼莲产甲烷的影响 [J]. 中国沼气, 2010,28(2):34-37.
- [15] Siegart I, Bank S C. The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors [J]. Process Biochemistry, 2005,40(11):3412-3418.
- [16] 周德庆.微生物学教程 [M]. 北京:高等教育出版社, 2002: 275-276.
- [17] 任南琪,王爱杰.厌氧生物技术原理与应用 [M]. 北京:化学工业出版社, 2004:28-29.
- [18] Patel V, Desai M, Madamwar D. Thermochemical pretreatment of water hyacinth for improved biomethanation [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 1993,42:67-74.
- [19] 周孟津,张榕林,蔺金印.沼气实用技术 [M]. 北京:化学工业出版社, 2003:56.
- [20] 陈广银,郑正,邹星星,等.凤眼莲不同部位的厌氧消化特性 [J]. 环境化学, 2009,28(1):16-20.
- [21] Cheng Jun, Xie Binfei, Zhou Junhu, et al. Cogeneration of H₂ and CH₄ from water hyacinth by two-step anaerobic fermentation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010,35(7):3029-3035.

作者简介: 钱玉婷(1984-),女,江苏南通人,硕士,主要从事有机废弃物能源化利用研究。