

水葫芦厌氧发酵产沼气技术研究进展

何加骏, 严少华, 叶小梅, 常志州

(江苏省农业科学院, 江苏 南京 210014)

摘要: 水葫芦是中国十大入侵生物之一, 但由于它生长繁殖快、水体净化能力强, 如果加以合理利用, 可以变害为宝。本文综述了水葫芦能源化利用的研究进展, 同时, 指明了进一步研究方向与重点。

关键词: 水葫芦; 厌氧发酵; 沼气;

中图分类号: S555⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2008)03-0359-04

Progress in Anaerobic Digestion of Water Hyacinths

HE Jia-jun, YAN Shao-hua, YE Xiao-mei, CHANG Zhi-zhou

(*Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China*)

Abstract: Water hyacinth has been known as one of the most noxious weeds. But it grows fast and has a great ability of phytoremediation for polluted water. If utilized reasonably, water hyacinth can benefit environment and human. The studies in which water hyacinth was used as a resource for the production of biogas with anaerobic digestion were reviewed. Further researches on anaerobic digestion of water hyacinths were also discussed.

Key words: water hyacinth; anaerobic digestion; biogas

水葫芦, 又名凤眼莲, 系雨久花科凤眼莲属, 为多年生漂浮性草本植物。它原产于巴西或南美洲的一些国家, 由于它适应性强, 繁殖快, 极易破坏当地的生态系统, 被世界各国公认为最重要的生物入侵物种之一^[1]。

然而, 又因水葫芦具有极强水体污染修复能力^[2], 且自身养分含量高, 干物质含氮量平均 2.5% 以上, 且 C/N 为 15:1 ~ 25:1, 易于利用, 因此, 如能对水葫芦进行合理利用, 化弊为利, 可使其发挥较好的作用。

归纳水葫芦的利用方式, 主要有饲料化与肥料化利用^[3], 此外, 可将水葫芦作为原料, 用于造纸, 制作木板、手工艺品和家具^[4]; 又因水葫芦的蛋白

质、氨基酸(包括人类生存所需又不能自身制造的 8 种氨基酸)、胡萝卜素、总黄酮和微量元素等^[5] 营养成分十分丰富, 可以将水葫芦用于生产饮料与食品; 此外, 将水葫芦用于生防的制剂与食用菌基质等研究^[6,7] 也见报道。近年来, 随着世界石化能源危机加剧, 价格进一步提高, 替代能源技术, 特别是生物能源技术研究成为世界各国十分重视的热点领域, 因水葫芦生长快、生物量大, 将其能源化利用, 将显现出巨大的市场潜力。

为提高中国水葫芦能源化利用水平, 综述了近二十年来国内外在水葫芦能源化方面研究成果, 并在此基础上提出了今后的研究方向, 以供大家参考与讨论。

1 水葫芦产气潜力

将水葫芦用作厌氧发酵原料产沼气最早可追溯到上世纪的七十年代, 国外 Hanisak^[8] 报道了水葫芦产气潜力, 此后, 又有大量试验结果。由于众多研究

收稿日期: 2008-03-06

基金项目: 江苏省科技厅太湖治理专项(BS2007117)

作者简介: 何加骏(1957-), 女, 江苏南京人, 副研究员, 主要从事农业生态研究。

通讯作者: 常志州, (Tel) 025-84390238; (E-mail) chang02@jaas.ac.cn

是在不同条件下进行,其水葫芦产气潜力相差较大,以水葫芦为唯一底物,获得的产气潜力为 400 ml/g VS(挥发性固体含量),同样以水葫芦为唯一底物,其获得的产气潜力仅为 190 ml/g VS, Chanakya 等^[9]分别用鲜样与风干样水葫芦为底物,采用批次方法,常温下,发酵 300 d,所获得的鲜样、风干样产气潜力分别为 291 ml/g、245 ml/g TS(总固体含量),348 ml/g、292 ml/g VS。

中国四川成都食品公司水葫芦科研组^[10],于 1979~1980 年进行了水葫芦与秸秆产气潜力对比研究,认为水葫芦产气潜力高于秸秆,可达 400 ml/g TS,查国君等^[11]报道水葫芦在 25℃ 恒温条件下,其 TS 产气潜力为 634 ml/g, VS 产气潜力为 834 ml/g,新鲜原料产气潜力为 33.36 ml/g。

Yukihiko^[12]在水葫芦化学元素分析基础上,推算出水葫芦化学结构为 $C_6H_{1206.8}$,依据水葫芦成份,进一步推算出在厌氧条件下,水葫芦厌氧发酵产甲烷与二氧化碳量分别为 14.8%、40.5%(质量比),换算成质量体积比分别为 207.2 ml/g、206.2 ml/g,理论产气(沼气)潜力为 413.4 ml/g,其中甲烷含量为 50.1%。

2 水葫芦的预处理技术

Chanakya 等^[9]研究发现,水葫芦虽然含有较高的可发酵物质,具有较高的产气潜力,但因较高木质素含量,影响了水葫芦的实际生物产气量。此外,由于水葫芦比重轻,含水量高,不仅使反应器中有机负荷量调节困难,也由于它飘浮的特性,使反应器进出料增加难度且易堵塞,即是将水葫芦切碎在传统的批次反应器中仍然存在困难^[13],因此,水葫芦的预处理技术尤为重要。

水葫芦切碎处理,可增加微生物接触底物(水葫芦)的比表面积,有利于提高产气^[14], Moorhead 等^[15]在中温条件下,研究了不同接种量以及氮水平条件下,不同切碎长度对水葫芦产气的影响,当接种量最大(4.7:10.0,质量体积比)与 C/N 比最小(C/N 为 15:1)条件下,水葫芦切碎长度为 6.1 mm 时,分别较 1.6 mm 与 12.7 mm 长度的获得更高的产气量。

兰吉武等^[16]比较了简单切分与粉碎对水葫芦产气率的影响,结果发现简单切分比粉碎可以获得更高的产气量与产气率,分析其原因认为:水葫芦酸

化反应与甲烷化反应间存在一个平衡点,水葫芦粉碎后粒度小,酸化速度过快,不利于酸化反应与产甲烷反应之间的平衡;水葫芦简单切分后酸化速率较慢,酸化反应与产甲烷反应达到了平衡,有利于反应进行。另一方面,水葫芦简单切分后孔隙率高,产气更易溢出,在一定程度上促进了厌氧发酵反应的进行。

Patel 等^[17]采用热化学方法,在 pH 11、121℃ 条件下处理 1 h,以减轻木质素对纤维素与半纤维素生物降解的影响,结果处理组产气效率与产气量较对照提高了 60%; Ali 等^[18]应用真菌或化学方法对水葫芦进行预处理,也增加了水葫芦产气量。

在以水葫芦为底物的厌氧发酵试验中,一些金属元素的添加,如: Fe^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 和 Cu^{2+} ,不仅有利产气,提高产气量,还可以提高气体中甲烷含量与系统运行的稳定性^[19]。用来自电镀厂铜污染水体中生长的水葫芦进行发酵试验,与未污染水体中生长的水葫芦相比,可以获得更好的产气量与甲烷含量^[20];用基于修复纸浆废水的水葫芦作产气试验,其产气量也大于来自清洁水源的水葫芦^[21]; Geeta 等^[22]报道在水葫芦厌氧发酵过程中添加 Ni,同样可以增加水葫芦或水葫芦与奶牛粪便混合的产气量;添加不同形态的硼化合物也起到促进水葫芦中有机物降解,提高产气量的作用^[23]。Patel 等^[24]还试验了不同吸附材料对水葫芦产气效率的影响,结果表明在厌氧反应器中添加一定量的活性炭、硅胶及铝粉等,均不同程度地提高了产气率,同时还减少了出水中 COD(化学需氧量)、BOD(生物需氧量)的量。

将水葫芦与其它畜禽粪便或人粪尿混合发酵,因粪便可以为水葫芦发酵提供更多微生物数量,更丰富的生物多样性以及更多的养分,可增加水葫芦的产气量与产气效率^[25,26]。

3 厌氧发酵工艺

为了克服水葫芦易飘浮、易堵塞进出料管道以及进料困难、产气效率低的缺点,许多研究者进行了不同发酵工艺试验, Annachhatre 等^[27]用碱对水葫芦进行预处理,结合细胞固定化技术,采用两相法,即:酸化相与产甲烷相,获得了比批次工艺高得多的产气效率。

研究者开展了直接从水葫芦酸化过程中提取挥

发性脂肪酸(VFA),然后采用液体进料方式进行连续发酵产沼气研究工作^[28,29]。Abbasi等^[28]将水葫芦放在一个可连续搅拌的酸化反应器中,用部分畜禽粪便作为接种物,让水葫芦进行发酵,将发酵产生的挥发性有机酸引入UAF(上流式厌氧滤池)反应器中,用经驯化过的污泥作接种物,进行厌氧发酵,产气量(VAF)为 $0.38\text{ m}^3/(\text{kg}\cdot\text{d})$,甲烷含量60%。Kivaisi等^[30]通过对有机负荷、水力滞留时间以及对酸化反应器中稀释度进行优化,酸化采用瘤胃式反应器,厌氧反应采用UASB(升流式厌氧污泥床)工艺,结果水葫芦酸化过程中产生的有机酸100%地转化为沼气。

Chanakya等^[31]报道了一种酸化液部分回流到酸化反应器中的方法,酸化相水葫芦按每周1次半连续添加,酸化处理后水葫芦残体由酸化反应器底部排出,排出的残渣应用高效蚯蚓反应器进行处理,以此提高产气效率与水葫芦的利用率。针对农村水压式沼气池畜禽粪便来源短缺的问题,Sankar等^[32]设计了一种简便的水葫芦产酸反应器,把从酸化相中产生的VFA(挥发性有机酸)导入沼气池,该方法与以畜禽粪便为唯一底物的对照池相比,产气量提高了20%。Sharma等^[33]设计了一种批次式三相厌氧发酵工艺,即碱预处理反应器、酸化反应器与厌氧消化反应器; Ganesh等^[34]认为:在小型厌氧发酵装置上,可以采用一种更经济、更简便的方法,构建成水葫芦两相发酵反应器,并指出可以用塑料桶、带有龙头的塑料袋以及皮管等作为获取水葫芦产酸解液的反应器。

周岳溪等^[35]研究了厌氧固体产酸相-上流式折板生物膜产甲烷相组成的两相厌氧工艺处理鲜水葫芦的运行特点及机理,试验结果表明,该工艺运行稳定,平均产气量为 100 ml/g (鲜水葫芦),气体中甲烷含量高达73.3%~83.4%。

陈彬等^[36]采用两相反应装置,在接种率1:1条件下,比较了中温(35℃)与高温(55℃)两种温度对水葫芦发酵的影响,55℃条件下,水葫芦酸化阶段长、速度慢、产气低缓,且在11~15d有一个产气停滞过程;但进入甲烷化后,pH值上升速度快,产气速率大,产气集中且总量大,55℃总产气量比35℃高,但增长不明显,仅为2.2%。

4 今后的研究方向与重点

大量的试验表明,水葫芦在相对静止且营养丰

富的水体中,年生物量(干重)可达 750 t/hm^2 ,如果合理打捞与管理,年生物量(干重)可达 $13\ 500\text{ t/hm}^2$,如将水葫芦进行厌氧发酵产沼气,可获得理论沼气体积为 $372\ 060\text{ m}^3/\text{hm}^2$,折能量为 $1.6\times 10^9\text{ cal}$,折标准煤225t,相当于种植 150 hm^2 油菜所获得的生物柴油热值,可见,开发利用水葫芦作为能源作物,潜力巨大。

基于水葫芦物理与化学特性,综合国内外已有的研究成果,作者认为应在以下几方面重点突破,一是预处理技术,研究适当的脱水方法,以增加有机负荷与沼液沼渣中养分含量;探索物理、化学以及生物相结合的预处理技术,改善水葫芦的物理性状与可生化性,提高水葫芦的产气性能。二是厌氧发酵工艺,应以两相法工艺为重点,集成已有的UASB(升流式厌氧污泥床)、ABR(厌氧折流板反应器)、CSTR(连续流搅拌槽式反应器)等工艺,进一步优化工艺参数,获得更为高效的工艺技术,同时结合工艺要求,研制配套的设备,以降低成本,提高投资效率。三是共发酵技术,即研究以水葫芦为主要底物与畜禽粪便、人粪尿、生活污水、农产品加工废弃物或能源作物等共发酵技术。四是“二步法”产能技术,即研究将水葫芦产氢与产甲烷相结合的新型工艺技术,充分挖掘水葫芦作为能源植物的产能潜力。五是水葫芦沼液沼渣利用技术,研究沼液沼渣养分特征、农田安全使用定额与技术,研究沼液沼渣使用中减少氮损失技术与途径。六是水葫芦厌氧发酵生物过程及控制技术,采用现代分子生物学手段,从基因水平上研究厌氧发酵的微生物生态,全面认识水葫芦两相法厌氧发酵微生物的群落结构、适应机制和演替规律,从整体上解析厌氧发酵微生物的代谢能力;以高通量筛选技术和“序列引导分离”技术为手段,研究可培养和未培养功能微生物的生理学特征、生长限速因子、营养需求及配伍适应性,为进一步的技术攻关提供理论基础。

参考文献:

- [1] ANUSHREE M. Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth[J]. *Environment International*, 2007, 33:122-138.
- [2] TCHOBANOGLIOUS G, MAITSKI F K, THOMSON K, et al. Evolution and performance of city of San Diego pilot scale aquatic wastewater treatment system using water hyacinth[J]. *J WPCF*, 1989, 61:11-12.

- [3] 洪春来,魏幼璋,贾彦博,等.水葫芦防治及综合利用的研究进展[J].科技通报,2005,21(4):491-496.
- [4] 彭青林.水葫芦的开发利用[J].资源开发与市场,2003,19(1):32-33.
- [5] 汪禄祥,刘家富,束继红,等.有害杂草的微量元素分析[J].广东微量元素科学,2002,9(6):68-71.
- [6] 孙小燕,丁洪.水葫芦的综合利用与防治技术[J].农业环境与发展,2004,21(5):35-36.
- [7] 张祖堂,林革,方金辉,等.废物利用新途径——水葫芦生料栽培平菇[J].福建农业,2005,(4):35.
- [8] HANISAK M D, WILLIAM L D, RYTHER J H. Recycling the nutrients in residues from methane digesters of aquatic macrophytes for new biomass production[J]. Resource Recovery and Conservation, 1980, 4:313-323.
- [9] CHANAKYA H N, BORGAONKAR S, MEENA G, et al. Solid-phase biogas production with garbage or water hyacinth [J]. Bioresour Technol, 1993, 46:227-231.
- [10] 焦彬.中国绿肥[M].北京:北京农业出版社,1986:599.
- [11] 查国君,曾国揆,张无敌,等.水葫芦发酵产气潜力的实验研究[J].能源工程,2006,6:49-51.
- [12] YUKIHIKO M. Evaluation of supercritical water gasification and biomethanation for wet biomass utilization in Japan [J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43:1301-1310.
- [13] ABBASI S A, NIPANEY P C, RAMASAMY E V. Use of aquatic weed salvinia as full partial feed in commercial digesters[J]. Indian J Technol, 1992, 30:451-457.
- [14] HAUNG R T. The practical handbook of compost engineering [M]. USA: Lewis Publishers, 1993.
- [15] MOORHEAD K K, NORDSTEDT R A. Batch anaerobic digestion of water hyacinth: effects of particle size, plant nitrogen content and inoculum volume[J]. Bioresour Technol, 1993, 44:71-76.
- [16] 兰吉武,陈彬.水葫芦厌氧发酵产气规律[J].黑龙江科技学院学报,2004,14(1):18-21.
- [17] PATEL, V, DESAI M, MADAMWAR D. Thermochemical pretreatment of water hyacinth for improved biomethanation[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 1993, 42:67-74.
- [18] ALI N, CHAUDHARY B L, KHANDELWAL S K. Better use of water hyacinth for fuel, manure and pollution free environment [J]. Indian J Environ Prot, 2004, 24:297-303.
- [19] PATEL V B, PATEL A R, PATEL M C, et al. Effect of metals on anaerobic digestion of water hyacinth-cattle dung [J]. Appl Biochem Biotechnol, 1993, 43:45-50.
- [20] VERMA V K, SINGH Y P. Raibogas production from plant biomass used for phytoremediation of industrial wastes [J]. Biore-source Technology, 2007, 98:1664-1669.
- [21] 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.
- [22] GEETA G S, JAGADEESH K S, REDDY T K R. Nickel as an accelerator of biogas production in water hyacinth (*Eichornia crassipes* Solms.) [J]. Biomass, 1990, 21:157-161.
- [23] SINGH S K, SINGH A, PANDEY G N. Methanogenesis of water hyacinth in the presence of boron compounds [J]. Renewalbe Energ, 1993, 3(1):45-47.
- [24] PATEL V B, PATEL A R, MADAMWAR D B. Effect of adsorbents on anaerobic digestion of water-hyacinth-cattle dung [J]. Bioresour Technol, 1992, 40:179-181.
- [25] EL-SHINNAWI M M, ALAA EL-DIN M N, EL-SHIMI S A, et al. Biogas production from crop residues and aquatic weeds [J]. Resources Conservation and Recycling, 1989, 3(1):33-45.
- [26] KUMAR S. Studies on efficiencies of bio gas production in anaerobic digesters using water hyacinth and night-soil alone as well as in combination [J]. Asian J Chem, 2005, 17:934-938.
- [27] ANNACHHATRE A P, KHANNA P. Methane recovery from water hyacinth through whole-cell immobilization technology [J]. Biotechnol Bioeng, 1987, 29:805-818.
- [28] ABBASI S A, RAMASAMY E V. Utilization of biowaste solids by extracting volatile fatty acids with subsequent conversion to methane and manure: proceedings of the Twelfth International Conference on Solid Waste Technology and Management [C]. Philadelphia, 1996.
- [29] ABBASI SA, RAMASAMY EV. Anaerobic digestion of high solid waste: proceedings of Eight National Symposium on Environment IGCAR [C]. Kalpakkam, 1999.
- [30] KIVAIISI A K, MTLA M. Chemical composition and *in vitro* degradability of whole plants and shoots of the water hyacinth (*Eichornia crassipes*) by rumen micro-organisms [J]. Tanzan Vet J, 1995, 15:121-129.
- [31] CHANAKYA H N, SUSHAMA B, RAJAN M G C, et al. Two-phase anaerobic digestion of water hyacinth or urban garbage [J]. Bioresource Technology, 1992, 42:123-131.
- [32] SANKAR G P, RAMASAMY E V, GAJALAKSHMI S S A. Abbasi 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, 27:17-23.
- [33] SHARMA A, UNNI B G, SINGH H D. A novel fed-batch digestion system for biomethanation of plant biomasses [J]. Biosci Bioeng, 1999, 87:678-682.
- [34] GANESH P S, RAMASAMY E V, GAJALAKSHMI S, 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, 27:17-23.
- [35] 周岳溪,孔欣,郝丽芳,等.水葫芦两相厌氧生物处理技术研究 [J]. 中国沼气, 1996, 14(3):8-12.
- [36] 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.