DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2017050602
高文, 伍健东, 周兴求,等.不同形态水葫芦和污泥联合厌氧消化产沼气性能[J].环境化学,2018,37(1):89-95.
GAO Wen, WU Jiandong, ZHOU Xingqiu, et al. Study on biogas production by anaerobic co-digestion of different forms of water hyacinth and sewage sludge[J].Environmental Chemistry,2018,37(1):89-95.

不同形态水葫芦和污泥联合厌氧消化产沼气性能

高 文 伍健东* 周兴求 刘佳伟 钱 旭

(华南理工大学环境与能源学院,工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州, 510006)

摘 要 为探求不同形态水葫芦和污泥联合厌氧消化产沼气性能,在中温 35±1 ℃条件下,设置了 2 个不同的 TS 浓度(TS=6%和 8%),采用不同形态的水葫芦(水葫芦段、水葫芦浆、水葫芦渣、水葫芦粉和水葫芦汁)与污泥进行联合厌氧消化实验.结果表明,水葫芦和污泥联合厌氧消化的累积产甲烷量均高于对照组;添加水葫芦处理的累积产甲烷量从大到小依次为水葫芦渣>水葫芦浆>水葫芦段>水葫芦粉>水葫芦汁,水葫芦渣处理的累积产甲烷量比水葫芦汁提高 62.5%(TS=6%)和 84.5%(TS=8%);系统 TS 浓度为 8%时,各处理的 TS 甲烷产率均高于 TS 浓度为 6%的结果,且水葫芦渣和污泥联合厌氧消化的产甲烷性能最好,表明水葫芦的压滤和粉碎有助于提高厌氧消化的产甲烷潜力.

关键词 污泥, 水葫芦, 厌氧消化, 沼气.

Study on biogas production by anaerobic co-digestion of different forms of water hyacinth and sewage sludge

GAO Wen *WU Jiandong** *ZHOU Xingqiu* *LIU Jiawei* *QIAN Xu*

(Key Lab of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, Ministry of Education, School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou, 510006, China)

Abstract: In order to investigate biogas production performance by anaerobic co-digestion of different forms of water hyacinth and sewage sludge, anaerobic co-digestion experiments of sewage sludge with different forms of water hyacinth (water hyacinth segment, water hyacinth pulp, water hyacinth residue, water hyacinth powder and water hyacinth juice) were conducted under mesophilic condition 35±1 ℃ with TS content of 6% and 8%. The results showed that the cumulative methane production by anaerobic co-digestion of water hyacinth and sludge was higher than that of the control with an order of water hyacinth residue>water hyacinth pulp>water hyacinth segment>water hyacinth powder>water hyacinth juice. The cumulative methane production, with water hyacinth residue addition increased by 62.5% (TS=6%) and 84.5% (TS=8%) by comparison with the production with water hyacinth juice addition. The TS methane production rate of treatments with TS content of 8% was higher than that of 6%. Therefore, when TS content was 8%, water hyacinth residue was the best form for anaerobic digestion, indicating that filter-pressing and crushing of water hyacinth will effectively improve the biochemical methane potential (BMP) of anaerobic digestion.

Keywords: sewage sludge, water hyacinth, anaerobic digestion, biogas.

污泥是污水处理后的产物,含有 N、P 和多种微量元素、有机质、重金属等成分.目前约有 80%的污

2017 年 5 月 6 日收稿(Received: May 6, 2017).

* 通讯联系人, E-mail:jdwu@scut.edu.cn

Corresponding author, E-mail:jdwu@scut.edu.cn

hjhx.rcees.ac.cn

水处理厂只对污泥进行浓缩脱水,并未对其进行稳定化处理,导致污泥中的污染物进一步扩散,对环境造成二次污染[1-5].若采用厌氧消化技术对污泥进行处理,不仅可以实现污泥的稳定化,减少其对环境的影响,而且可以获得生物质能,缓解能源短缺的问题.水葫芦是生物入侵物种,它在水体中的过度生长,已对水生生态系统造成严重的危害,被公认为“世界十大恶性杂草之一”[6],需对其进行有效的处理.刘敬勇等[7]选取脱水污泥和水葫芦进行混燃,污泥与水葫芦混合后,两者存在交互催化作用,改善了污泥和水葫芦的燃烧性能,说明水葫芦的掺入有利于污泥的燃烧.王丽芬等[8]采用高温堆肥的方法,研究水葫芦渣与污泥在混合堆肥过程中各参数的变化,堆制后的肥料对植物基本无毒性,腐熟程度较高.水葫芦具有纤维素含量高、木质素含量低的特点,可作为厌氧消化的底物[9-10].程军等[11]将污泥和水葫芦混合作为发酵底物,研究发酵产氢特性,他们认为水葫芦作为发酵底物时需要切除根部,因为根部富含重金属,会对产氢细菌产生抑制作用.污泥和水葫芦联合处理的研究主要集中在以上几个方面,而关于污泥和水葫芦联合厌氧消化产沼气特性的研究鲜有报道.污泥和水葫芦联合厌氧消化既可实现污泥稳定化,又可减少水葫芦对生态系统的危害以及实现污泥和水葫芦的资源化利用.

物料的不同形态会影响厌氧消化产气性能.物理预处理可以增大物料与微生物接触的比表面积,加快分解速度[12].南艳艳等[13]将秸秆粉碎和简单切分后进行厌氧消化,增加了发酵原料与细菌的接触面,促进了反应的进行.物料粉碎处理后,改变了物料的物理性质,能够在更大的 C/N 比范围内达到较好的产气效果[14].杨姝等[15]采用简单切分和压榨处理水葫芦,压榨处理的容积产气率比简单切分高 251%,可有效解决反应器有机负荷调节困难和物料上层结块等问题.目前,关于不同形态水葫芦和污泥联合厌氧消化产沼气性能研究的报道较少.

本研究以水葫芦和污泥为厌氧消化底物,在中温 35±1 ℃条件下进行批式实验,研究在 2 种不同的系统 TS 浓度条件下,水葫芦不同形态对污泥和水葫芦联合厌氧消化的影响.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 材料

污泥为广州市沥窖污水处理厂的脱水污泥,新鲜污泥取回后置于 4 ℃冰箱保存备用,污泥的 C/N 为 5.2:1.水葫芦取自广州大学城外环水域,将水葫芦冲去表面泥土,擦去水分,去掉水葫芦的根部后备用,其 C/N 为 19.45:1.接种污泥为本实验室经 2 个月厌氧消化驯化后的污泥.

1.2 水葫芦的预处理

采用不同形态的水葫芦(水葫芦段、水葫芦浆、水葫芦渣、水葫芦粉、水葫芦汁)与污泥进行联合厌氧消化,对水葫芦的预处理为:将水葫芦切分为长 1.5 cm 的小段,得原料 1 水葫芦段;用 CLF-04 新型密封式粉碎机粉碎水葫芦,粉碎时间 6 min,得原料 2 水葫芦浆;将粉碎后的水葫芦浆放入纱布袋内,用两块有机玻璃板挤压,直至汁液不流出,将滤渣和滤液分别收集,得原料 3 水葫芦渣和原料 4 水葫芦汁;将水葫芦切分为长 2 cm 左右的小段,在 DHG-9623A 数显恒温鼓风干燥箱中 40—50 ℃条件下干燥至恒重,时间为 30 h 左右,用粉碎机粉碎成粉末,得原料 5 水葫芦粉.各物料的基本理化性质如表 1 所示.

表 1 物料的基本理化性质

Table 1 Basic physico-chemiced properties of the materials

	接种污泥 Inoculated sludge	脱水污泥 Dewatered sludge	水葫芦段 Water hyacinth segment	水葫芦浆 Water hyacinth pulp	水葫芦渣 Water hyacinth residue	水葫芦粉 Water hyacinth powder
总固体(TS)/%	3.2	20.24	9.81	10.53	20.27	94.61
挥发性固体(VS)/%	49.35	57.31	85.3	84.01	88.95	84.69

1.3 实验方法

以 600 mL 试剂瓶作为批式实验反应瓶,采用一次进料连续发酵方式,消化系统的 TS 浓度为 6%和 8%,各 TS 浓度下设 6 个处理,编号分别为 CK、T1、T2、T3、T4、T5,CK 为空白对照,各处理系统总质量为 414.88 g,投加的水葫芦样品和脱水污泥的 TS 比为 1:5,水葫芦汁的投加量为总质量的 11%,各处理的物

http://cees.ac.cn

料添加量见表 2.将各处理物料混合均匀后装入反应瓶内,分别在第 3 天(TS=6%)和第 1 天(TS=8%)加入 2 g $NaHCO_3$作为缓冲剂,通入氮气 5 min 赶走瓶内氧气,用胶塞密封,实验设 3 组平行,置于 35±1 ℃,120 r·min^{-1}恒温振荡培养箱中进行厌氧消化.

表 2　实验设计

Table 2　Experiment design

TS/%	处理 Treatment	样品 Sample/g	脱水污泥 Dewatered sludge/g	接种污泥 Inoculated sludge/g	超纯水 Ultrapure water/g	总质量 Total mass/g
6%	CK	0.00	100.00	18.76	296.12	414.88
	T1(水葫芦段)	41.25	100.00	18.76	254.87	414.88
	T2(水葫芦浆)	38.45	100.00	18.76	257.67	414.88
	T3(水葫芦渣)	19.97	100.00	18.76	276.15	414.88
	T4(水葫芦粉)	4.28	100.00	18.76	291.84	414.88
	T5(水葫芦汁)	45.73	100.00	18.76	250.39	414.88
8%	CK	0.00	133.30	25.32	256.26	414.88
	T1(水葫芦段)	54.99	133.30	25.32	201.27	414.88
	T2(水葫芦浆)	51.25	133.30	25.32	205.01	414.88
	T3(水葫芦渣)	26.63	133.30	25.32	229.63	414.88
	T4(水葫芦粉)	5.70	133.30	25.32	250.56	414.88
	T5(水葫芦汁)	45.73	133.30	25.32	210.53	414.88

1.4　分析项目和方法

总固体(TS)由 DHG-9623A 数显恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司)105 ℃烘 24 h 采用差重法[16]测定;挥发性固体(VS)由 SXL-1008 程控箱式电炉(上海精宏实验设备有限公司)550 ℃灼烧 2 h 采用差重法[16]测定;总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[17]测定;有机碳采用重铬酸钾氧化分光光度法[18]测定;产气量采用排水(饱和 NaCl 溶液)集气法,每日测定产气量;甲烷用气相色谱仪 Agilent 7820A GC(安捷伦科技中国有限公司)分析,TCD 检测器,柱箱温度为 100 ℃,流速为 35 mL·min^{-1},氮气作为载气,前进样口和检测器温度分别维持在 100 ℃和 200 ℃.

VS 降解率(VS reduction,VSr)由下式[19]计算(假设进料中的无机部分即灰分在厌氧消化前后是不变的):

$$VSr = 1 - \frac{VS_{消化液} \cdot (1 - VS_{进料})}{VS_{进料} \cdot (1 - VS_{消化液})} \times 100\% \tag{1}$$

式中,$VS_{消化液}$指消化液中 VS 占 TS 的比例(%);$VS_{进料}$指进料中 VS 占 TS 的比例(%).

2　结果与讨论(Results and discussion)

2.1　日产沼气量分析

图 1(a)是系统 TS 浓度为 6%时,各处理厌氧消化日产沼气量随时间的变化曲线.由图 1(a)可以看出,前 12 天,添加了不同形态水葫芦的消化系统具有相似的产气规律.厌氧消化当天即开始产气,第 2 天产气量下降,在第 3 天各处理出现产气高峰,这是因第 3 天加入 2 g $NaHCO_3$调节厌氧消化瓶内的 pH 所致,其 CO_2含量较高,甲烷含量较低,之后产气量下降.第 5 天各处理产气量开始迅速增加,第 7—10 天内相继出现第 1 个沼气高峰,CK、T2、T5、T4、T1 和 T3 的日产沼气量峰值分别为 192、252、277、279、282、327 mL,之后逐渐减少.CK 对照组在第 7 天出现沼气高峰后,产气量呈下降趋势,到第 28 天,消化完成,停止产气.添加不同形态水葫芦的处理在第 1 个沼气高峰后,随着可降解纤维素、半纤维素的水解酸化,转化为易被产甲烷菌利用的可溶性物质,产气量逐步回升,T1 和 T5 在第 13—15 天出现第 2 个沼气高峰,T4、T2 和 T3 在第 16—19 天出现第 2 个沼气高峰,随后缓慢下降,这与陈广银等[20]的研究结果中水葫芦茎和茎渣的产气趋势相同,由于水葫芦中纤维素、半纤维素的水解酸化,在第 13—15 天内出现第 2 个沼气高峰.

hjhx.rcees.ac.cn

图 1(b)是系统 TS 浓度为 8%时,各处理厌氧消化日产沼气量随时间的变化曲线.由图 1(b)可以看出,在第 1 天各处理出现产气高峰,主要是由于投加 2 g $NaHCO_3$作为缓冲剂,产生了大量 CO_2所致,之后产气量迅速下降,第 3 天各处理产气量开始增加.在第 6 天,T1、T3 和 T5 出现第 1 个沼气高峰,峰值气量分别为 382、551、299 mL;T2、T4 和 CK 的第 1 个沼气高峰出现在第 7 天,峰值气量分别为 502、369、285 mL,这是由于混合物料消化程度的差异,产生了不同的产气高峰期[21].之后,随着纤维素、半纤维素的水解,添加水葫芦的处理相继出现第 2 个沼气高峰.而 CK 对照组在第 7 天出现 1 个沼气高峰(285 mL)后,产气量呈下降趋势,到第 27 天,消化结束.

由于有机物降解难易程度的不同,当大分子有机质水解、产酸的速率与产甲烷的速率不能保持平衡时,会造成日产沼气量出现上下起伏的变化[22].系统 TS 浓度为 6%和 8%的各处理中,除了 CK 只有 1 次明显的沼气高峰外,其他处理均出现 2 次明显的沼气高峰.

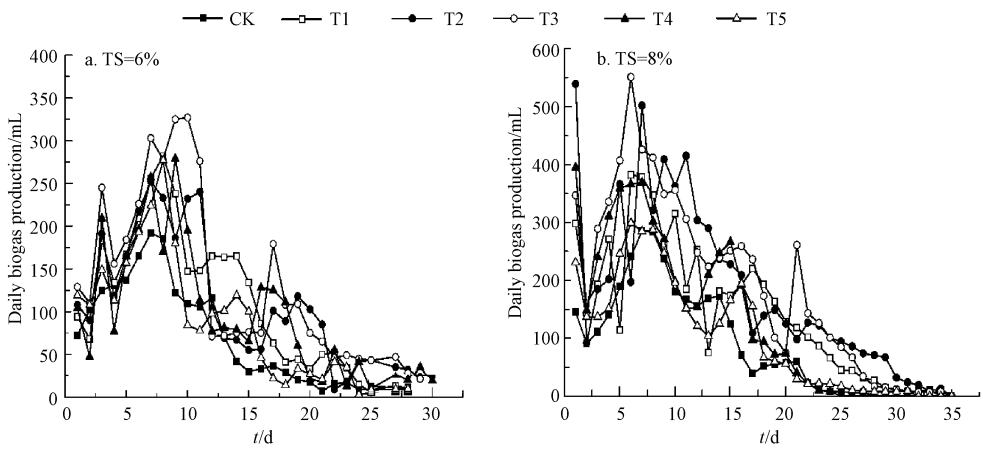

图 1 不同处理的日产沼气量

Fig.1 Daily biogas production in different treatments

2.2 甲烷含量的变化

系统 TS 浓度为 6%时,各处理厌氧消化的甲烷含量见图 2(a),厌氧消化前 6 天甲烷含量迅速增加,从开始的 3%增加到 60%.由于各处理在第 3 天加入了 2 g $NaHCO_3$,此时虽出现日产气量高峰,但主要成分为 CO_2,甲烷含量只有 21%左右.厌氧消化第 9 天,CK、T1、T4 和 T5 甲烷含量达到最大值,分别为 70.63%、72.66%、74.24%和 76.54%;T2 和 T3 在第 11 天甲烷含量达最大值,分别为 73.76%和 74.88%.第 10 天后,CK 对照组的甲烷含量迅速下降,并且明显低于联合消化的甲烷含量.各处理甲烷含量在消化后期逐渐下降至某一值,这可能是消化初期加入 $NaHCO_3$调节 pH 值,带入了 Na^+,对甲烷含量产生了较大的影响[23-24].

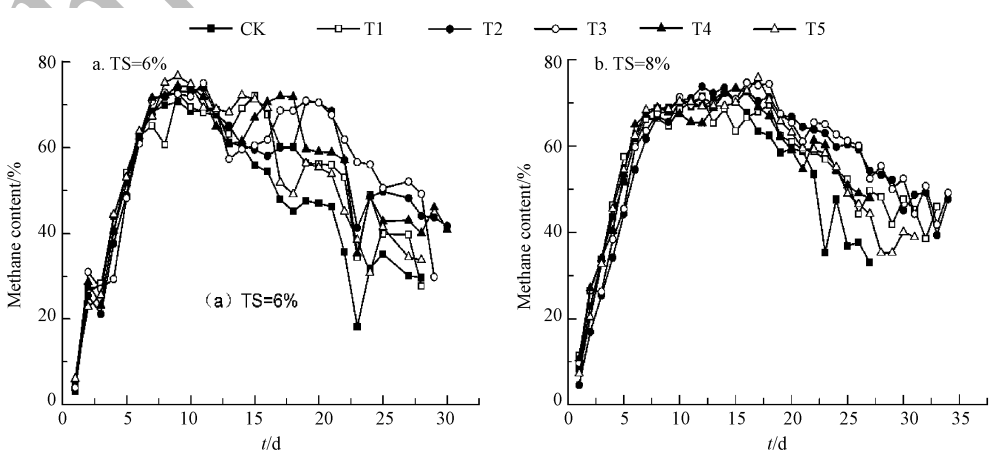

图 2 不同处理的甲烷含量

Fig.2 Methane content in different treatments

系统 TS 浓度为 8%时,各处理厌氧消化甲烷含量见图 2(b).从图 2(b)可知,各处理厌氧消化甲烷含量的变化趋势相似,前 7 天甲烷含量迅速增加,第 7 天甲烷浓度达到 61%以上,之后增幅变缓.在第 7 天到第 18 天,甲烷含量较为稳定,第 18 天后甲烷含量呈现下降趋势.消化后期,T1、T2、T3 和 T4 的甲烷含量稳定在 47%—50%,T5 甲烷含量在 40%左右浮动,CK 对照组的甲烷含量却稳定在 30%左右,明显低于污泥和水葫芦联合消化的甲烷产量.从整个消化周期看,T3 的甲烷含量变化曲线大多位于各处理上方,表明 T3 的甲烷转化效率高,粉碎和压滤处理破坏了水葫芦结构,增大了比表面积[25],有利于甲烷的产生.

2.3　累积产甲烷量分析

系统 TS 浓度为 6%时,不同处理的累积产甲烷量见图 3(a).由图 3(a)可知,累积产甲烷量从高到低依次为 T3(水葫芦渣)、T2(水葫芦浆)、T1(水葫芦段)、T4(水葫芦粉)、T5(水葫芦汁)和 CK.厌氧消化前 5 天,各处理累积产甲烷量差别不大.之后,T3 的累积产甲烷量迅速增加,且始终高于其他处理.CK 对照组的累积产甲烷量为 1046.03 mL,添加水葫芦处理中累积产甲烷量最少的 T5(1365.23 mL)比 CK 多 30.5%;T3 的累积产甲烷量最多,为 2213.67 mL,比 CK 增加 111.6%.在整个消化期内,T3、T2、T1、T4 和 T5 的累积产甲烷量依次为 2213.67、1800.78、1731.46、1652.71、1365.23 mL,T3 的累积产甲烷量分别比 T1、T2、T4 和 T5 提高 27.8%、22.9%、33.9%和 62.5%,表明水葫芦渣与污泥联合厌氧消化具有良好的产甲烷性能.

系统 TS 浓度为 8%时,不同处理的累积产甲烷量见图 3(b).前 16 天,各处理累积产甲烷量迅速增加,之后增速减缓.各处理消化结束后,累积产甲烷量的高低次序与 TS 浓度为 6%时相同,添加水葫芦渣的累积产甲烷量最高(3891.89 mL),分别比 T1、T2、T4、T5 和 CK 提高 32.7%、8.1%、48.8%、84.5%和 110.6%,说明水葫芦渣与污泥联合厌氧消化的产甲烷能力高于其他处理.

根据不同处理累积产甲烷量可以看出,水葫芦的不同破碎程度对联合厌氧消化有一定影响.水葫芦汁的添加具有一定的产甲烷性能,但较之于其他处理,不具有明显优势.水葫芦粉经过烘干处理,可能导致有机物分解了一部分,故其累积产甲烷量要低于 T1、T2 和 T3.粉碎可破坏水葫芦细胞壁的纤维素结晶结构,增大微生物接触底物的比表面积[26],促进了厌氧消化反应的进行,故添加水葫芦浆处理的累积产甲烷量高于水葫芦段.压滤处理可以破坏水葫芦中的木质纤维素结构,增大产甲烷菌和物料接触面积,在一定程度上利于反应进行,故水葫芦渣处理的累积产甲烷量最多,这与陈广银等[20]的研究结果一致.

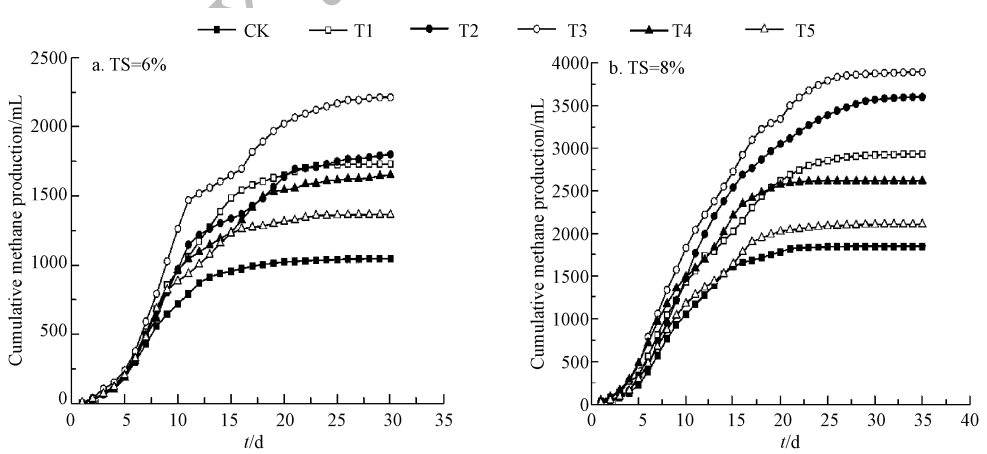

图 3　不同处理的累积产甲烷量

Fig.3　Cumulative methane production in different treatments

2.4　TS 甲烷产率分析

不同处理的 TS 甲烷产率见图 4.无论系统 TS 浓度为 6%还是 8%,添加水葫芦渣(T3)处理的 TS 甲烷产率均为最高,其次为 T2(水葫芦浆)、T1(水葫芦段)、T4(水葫芦粉)和 T5(水葫芦汁),表明水葫芦的粉碎和压榨是提高消化性能的有效措施.较之于 TS 浓度为 6%的处理,TS 浓度为 8%的甲烷产率明显

增大,其中水葫芦浆和水葫芦渣最为显著,TS 甲烷产率分别提高了 49.9%和 31.8%,说明 TS 浓度的增加,使厌氧消化系统中微生物数量与有机物含量增多,有利于底物利用率的提高和微生物的生长繁殖,促进厌氧消化的进行.

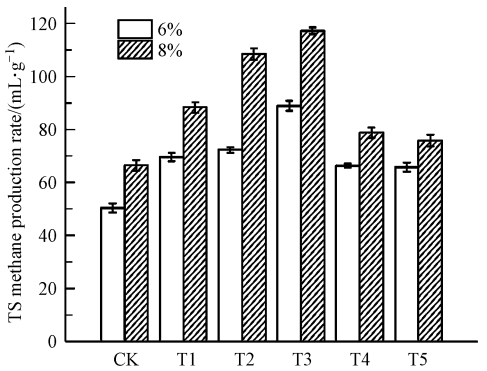

图 4 不同处理的 TS 甲烷产率

Fig.4 TS methane production rate in different treatments

2.5 TS 和 VS 降解率分析

不同形态水葫芦和污泥厌氧消化的 TS 与 VS 降解率见表 3.TS 浓度为 6%和 8%条件下,除了 T5(水葫芦汁)的 TS 降解率低于或等于 CK 外,其他处理 TS 降解率均高于 CK.在两个 TS 浓度下,T3(水葫芦渣)的 TS 降解率和 VS 降解率均高于其他处理,且 T3 产甲烷量也明显高于其他处理,表明水葫芦的粉碎和压滤有利于有机物质的分解.

表 3 厌氧消化结束时 TS、VS 降解率

Table 3 The reduction rate of TS and VS after digestion

处理 Treatment	TS=6%		TS=8%	
	TS 降解率 TS reduction/%	VS 降解率 VS reduction/%	TS 降解率 TS reduction/%	VS 降解率 VS reduction/%
CK	16.20	38.69	18.21	55.70
T1	24.17	43.98	22.50	53.62
T2	22.67	43.23	21.93	57.19
T3	24.50	45.96	29.00	60.98
T4	22.50	40.28	27.38	60.59
T5	15.55	43.62	18.21	59.29

3 结论(Conclusion)

(1)在两个 TS 浓度下,对照组只出现一次产沼气高峰,添加水葫芦的处理在消化过程中均出现2 次产沼气高峰,且添加水葫芦处理的累积产甲烷量高于对照组.

(2)在两个 TS 浓度下,添加水葫芦渣处理的日产沼气量峰值、累积产甲烷量、TS 甲烷产率以及 TS 和 VS 降解率均为最高.系统 TS 浓度为 6%时,添加水葫芦渣处理的累积产甲烷量达到 2213.67 mL,较对照组提高 111.6%,分别比水葫芦段、水葫芦浆、水葫芦粉和水葫芦汁提高 27.8%、22.9%、33.9%和 62.5%;系统 TS 浓度为 8%时,水葫芦渣的累积产甲烷量为 3891.89 mL,分别比水葫芦段、水葫芦浆、水葫芦粉、水葫芦汁和对照提高 32.7%、8.1%、48.8%、84.5%和 110.6%,表明水葫芦渣与污泥联合厌氧消化产甲烷能力高于其他形态的水葫芦处理,水葫芦的粉碎和压榨是提高消化性能的有效措施.

(3)TS 浓度为 8%的甲烷产率明显高于 TS 浓度为 6%的,其中水葫芦浆和水葫芦渣处理最为显著,分别提高了 49.9%和 31.8%.

hjhx.rcees.ac.cn

参考文献(References)

[1] 戴小虎. 我国城镇污泥处理处置现状及思考[J].给水排水, 2012, 48(2):1-5.
DAI X H. Present situation and thinking of municipal sludge treatment and disposal in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 48(2):1-5 (in Chinese).

[2] 张万钦, 戚丹丹, 吴树彪,等. 不同预处理方式对污泥厌氧发酵的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9):187-198.
ZHANG W Q, QI D D, WU S B, et al. Effect of different pretreatment methods on sewage sludge anaerobic digestion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9):187-198 (in Chinese).

[3] 武淑文. 城市污泥资源化利用研究进展[J]. 广西轻工业, 2009, 25(4):113-114,167.
WU S W. Research progress on utilization of municipal sludge[J]. Guangxi Journal of Light Industry, 2009, 25(4):113-114,167 (in Chinese).

[4] 张冬, 董岳, 黄瑛,等. 国内外污泥处理处置技术研究与应用现状[J]. 环境工程, 2015, 33(S1):600-604.
ZHANG D, DONG Y, HUANG Y, et al. Research and application situation of sludge treatment and disposal technology at home and abroad [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(S1):600-604 (in Chinese).

[5] LIU J Y, HUANG S J, SUN S Y, et al. Effects of sulfur on lead partitioning during sludge combustion based on experiments and thermodynamic calculations[J]. Waste Management, 2015, 38:336-348.

[6] GÜEREÑA D, NEUFELDT H, BERAZNEVA J, et al. Water hyacinth control in lake victoria: Transforming an ecological catastrophe into economic, social, and environmental benefits[J]. Sustainable Production and Consumption, 2015, 3:59-69.

[7] 刘敬勇, 黄李茂, 宁寻安, 等. 城市干污泥与水葫芦的混燃特性分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(8):2955-2967.
LIU J Y, HUANG L M, NING X A, et al. Analysis of co-combustion characteristics of sewage sludge and water hyacinth[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(8):2955-2967 (in Chinese).

[8] 王丽芬, 邓辅唐, 孙珮石, 等. 水葫芦渣与污泥混合好氧堆肥试验研究[J]. 科协论坛, 2012(1):117-119.
WANG L F, DENG F T, SUN P S, et al. Experimental study on aerobic composting of water hyacinth residue and sludge[J]. Science & Technology Association Forum, 2012(1):117-119 (in Chinese).

[9] GUNNARSSON C, PETERSEN C. Water hyacinths as a resource in agriculture and energy production: A literature review[J]. Waste Management, 2007, 27(1):117-129.

[10] LAY J J. Biohydrogen generation by mesophilic anaerobic fermentation of microcrystalline cellulose[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2001,74:280-287.

[11] 程军,潘华引,戚峰,等. 污泥和水葫芦混合发酵产氢的影响因素分析//中国可再生能源学会氢能专业委员会.第七届全国氢能学术会议论文集[C].中国可再生能源学会氢能专业委员会:2006:231-236.
CHENG J, PAN H Y, QI F, et al. Influence Factors on Bio-H_2 Production from Digested Sludge and Hyacinth by Co-fermentation//China Association for Hydrogen Energy. The 7th Chinese Hydrogen Energy Conference[C]. China Association for Hydrogen Energy:2006:231-236 (in Chinese).

[12] PALMOWSKI L M, MULLER J A. Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion[J]. Water Science & Technology, 2000, 41(3):155-162.

[13] 南艳艳, 邹华, 严群,等. 秸秆厌氧发酵产沼气的初步研究[J]. 食品与生物技术学报,2007, 26(6):64-68.
NAN Y Y, ZOU H, YAN Q, et al. Elemental study on the biogas anaerobic fermentation with crops straw[J]. Journal of Food Seience and Biotechnology, 2007, 26(6):64-68 (in Chinese).

[14] 艾平, 张衍林, 盛凯,等. 稻秸厌氧发酵产沼气预处理[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7):266-271.
AI P, ZHANG Y L, SHENG K, et al. Pretreatment for biogas production by anaerobic fermentation of rice straw[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7):266-271 (in Chinese).

[15] 杨姝, 章可, 段青松,等. 预处理方法对水葫芦厌氧发酵产沼气的影响[J]. 环境工程学报, 2014, 8(4):1663-1668.
YANG S, ZHANG K, DUAN Q S, et al. Effect of pretreatment methods on biogas production efficiency of anaerobic fermentation using water hyacinth[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(4):1663-1668 (in Chinese).

[16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版, 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration of China. Water and wastewater test and analysis methods[M]. Fourth edition, Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese).

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJ/T 221—2005, 城市污水处理厂污泥检验方法[S].
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. CJ/T 221—2005, Determination method for municipal sludge in wastewater treatment plant[S]. (in Chinese).

[18] 中华人民共和国环境保护部. HJ 615—2011, 土壤 有机碳的测定 重铬酸钾氧化-分光光度法[S].
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. HJ 615—2011, Soil-determination of organic carbon-potassium dichromate oxidation spectrophotometric method[S] (in Chinese).

[19] 段妮娜, 董滨, 李江华,等. 污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究[J]. 环境科学, 2013, 34(1):321-327.
DUAN N N, DONG B,LI J H, et al. High-solids anaerobic co-digestion of sludge and kitchen garbage under mesophilic conditions[J]. Environment Science, 2013, 34(1):321-327 (in Chinese).

[20] 陈广银, 郑正, 方彩霞,等. 压滤处理对水葫芦不同部位厌氧发酵的影响[J]. 环境化学, 2010, 29(3):462-466.
CHEN G Y, ZHENG Z,FANG C X, et al. Effect of filter-pressing on anaerobic fermentation in different parts of water hyacinth[J]. Environment Chemistry, 2010, 29(3):462-466 (in Chinese).

[21] ADANIKIN B A, OGUNWANDE G A, ADESANWO O O. Evaluation and kinetics of biogas yield from morning glory (*Ipomoea aquatica*) co-digested with water hyacinth (*Eichhornia crassipes*)[J]. Ecological Engineering, 2017, 98:98-104.

[22] 任海伟, 姚新泉, 李金平,等. 青贮玉米秸秆与牛粪混合厌氧消化产气性能的试验研究[J]. 中国沼气, 2015, 33(1):28-32.
REN H W, YAO X Q, LI J P, et al. Performance of anaerobic co-digestion of maize straw silage and cattle manure[J]. China Biogas, 2015, 33(1):28-32 (in Chinese).

[23] 陈广银, 郑正, 常志州,等. NaOH 处理对互花米草高温干式厌氧发酵的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(7):2158-2163.
CHEN G Y, ZHENG Z, CHANG Z L, et al. Effect of NaOH-treatment on dry-thermophilic anaerobic digestion of spartina alterniflora[J]. Environment Science, 2011, 32(7):2158-2163 (in Chinese).

[24] 余益辉, 黄振兴, 高树梅,等. 固相餐厨垃圾厌氧发酵特性[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1):355-361.
YU Y H, HUANG Z X, GAO S M, et al. Characteristics of anaerobic digestion with solid kitchen waste[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(1):355-361 (in Chinese).

[25] SIEBER J R, MCINERNEY M J, GUNSALUS R P. Genomic insights into syntrophy: The paradigm for anaerobic metabolic cooperation [J]. Annual Review of Microbiology, 2012, 66(1):429-452.

[26] HAUNG R T. The practical handbook of compost engineering[M]. USA: Lewis Publishers, 1993.

http://rcees.ac.cn