

固体碱强化水葫芦发酵产沼气的研究

杨晓瑞 梁金花 徐文龙 缪青松 朱建良*

(南京工业大学 生物与制药工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 采用固体碱预处理水葫芦, 驯化污泥, 并将其添加于水葫芦发酵体系中进行厌氧发酵。考察固体碱对水葫芦微观结构、活性污泥驯化、厌氧发酵产气速率以及甲烷含量的影响。结果表明: 发酵初始加入固体碱且添加量为发酵底物的60%时, 发酵平均产气速率最高, 为16.88 mL/(g·d), 此时, 甲烷含量也达到最大, 为80.06%; 与不添加固体碱的发酵体系相比, 分别提高了72.77%和64.73%。固体碱不但能驯化污泥, 而且能破坏水葫芦的致密纤维结构, 同时能调节发酵体系的pH值, 防止有机酸对产酸菌的反馈抑制, 创造更适宜于产甲烷菌生长的有利环境, 提高水葫芦甲烷化的速率和效率。

关键词: 水葫芦; 固体碱; 活性污泥; 产沼气

中图分类号: S216.4

引言

沼气发酵是水葫芦等植物秸秆开发利用的有效途径, 目前对水葫芦厌氧发酵体系已有相关研究^[1-3]。由于水葫芦存在致密的木质纤维结构, 在发酵前应对其进行预处理^[4-5]。Abdel-Fattah等^[6]比较了NaOH、H₂O₂、过氧乙酸和次氯酸盐预处理水葫芦效果, 得到0.1% NaClO₂在100℃下处理1h, 结合过氧乙酸100℃处理15min, 得到的样品最理想, 该样品木质素、纤维素和半纤维素回收率分别为2.56%、96.69%和81.38%。Gao等^[7]在温度为120℃条件下, 用离子液体和共溶剂对水葫芦处理120min后, 纤维素的含量为27.9%, 木质素的脱除率为49.2%, 沼气产率与未经预处理的相比提高了97.6%。魏世清等^[8]以沼液为接种物, 将水葫芦与猪粪混合, 两者混合比例为2:1时, 水葫芦TS、VS产气率分别为128.69 mL/g、151.57 mL/g。叶小梅等^[9]以水葫芦为原料、污泥为接种物进行厌氧发酵, 得到正值分蘖期的水葫芦产气潜力达到336 mL/g (TS)和517 mL/g (VS), 甲烷体积分数可达75%。周岳溪等^[10]对水葫芦稀酸预处理后接种污泥进行两相厌氧生物处理, 得到鲜水葫芦平均产气

量为134 L/kg, 甲烷体积分数为75.1%左右。

传统的水葫芦厌氧发酵体系中普遍存在水葫芦预处理过程的酸碱中和、催化剂回收利用难及发酵过程中pH调节难等问题。本文在发酵体系中添加固体碱对水葫芦进行降解预处理, 不仅避免了酸碱中和等后处理工序而且催化剂可以重复利用。同时固体碱还可以对污泥进行驯化, 调节发酵体系的pH值, 从而能够提高厌氧发酵体系的产气速率和效率。目前利用固体碱强化水葫芦厌氧发酵体系方面的研究文献鲜有报道。

1 实验部分

1.1 实验材料

活性污泥: 取自南京工业大学国家生化中心。将污泥中加入一定量的牛粪, 放在35℃恒温水浴锅中驯化15d待用。

水葫芦: 南京工业大学江浦校区打捞。将打捞出水的新鲜水葫芦清洗干净, 晒干, 直至水葫芦叶片触手即碎。然后将其粉碎至80~100目(150~178 μm), 用封口袋密封保存。

固体碱: D201型大孔强碱性苯乙烯系阴离子交换树脂, 江苏苏青水处理工程集团有限公司。

1.2 主要设备及仪器

6890N气相色谱仪, 安捷伦科技(中国)有限公司; HH-4恒温水浴锅, 常州国华电器有限公司; PHS-3C精密pH计, 上海雷磁仪器厂; SX2型马弗炉, 上海市实验仪器总厂; FZ102型微型植物粉碎

收稿日期: 2013-06-23

基金项目: 国家“863”计划(2011AA02203)

第一作者: 女, 1983年生, 博士生

* 通讯联系人

E-mail: jlzhu@njut.edu.cn

机,天津市泰斯特仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 污泥驯化

取 1 L 量筒 2 个,编号为 A、B,各装入 1 L 活性污泥。A 中加 10 g 固体碱,B 为空白对照。将量筒口用保鲜膜包扎,用针刺穿几个小孔,放入恒温培养箱中 35 ℃ 培养 60 h 后,对其性质进行测定。

1.3.2 水葫芦预处理

取 3 个 100 mL 烧杯,编号为 a、b 和 c,各加 10 g 水葫芦粉,其中 a 加蒸馏水 50 mL、b 加 10% 氢氧化钠溶液 50 mL、c 加蒸馏水 50 mL 和固体碱 2 g,烧杯口用保鲜膜包裹密封,室温放置 24 h 后,将水葫芦粉取出,烘干喷金之后用透射电镜观察。

1.3.3 水葫芦发酵产沼气

取 8 个 250 mL 发酵瓶,编号为 1~8 号,各加 10 g 预处理后的水葫芦粉,分别接入 100 mL 驯化后的活性污泥和自来水。其中 1 号瓶不加固体碱;2 号瓶发酵初始加固体碱 2 g;3 号瓶在发酵初始时添加包装成袋的固体碱 1 袋(2 g/袋);4 号瓶待发酵 2 d 后添加固体碱 1 袋(2 g/袋);5 号瓶在发酵初始时每天加固体碱 1 袋(0.4 g/袋),共加 5 d,2 g;6 号瓶在发酵初始时添加固体碱 2 袋(2 g/袋),共 4 g;7 号瓶在发酵初始时添加固体碱 3 袋(2 g/袋),共 6 g;8 号瓶在发酵初始时添加固体碱 4 袋(2 g/袋),共 8 g。将 8 个发酵瓶置于 35 ℃ 恒温水浴锅中培养 15 d,每天记录产气量,并计算每克水葫芦每天的平均产气速率,检测气体成分组成,共测量 3 次,取其平均值。

1.3.4 固体碱寿命考察实验

在发酵瓶中加 10 g 预处理后的水葫芦,包装成袋固体碱 3 袋(2 g/袋),共 6 g,分别接入 100 mL 驯化后的污泥和自来水,在 35 ℃ 恒温水浴发酵 15 d 后,将固体碱回收并将表面杂质用水洗净,继续进行发酵产气,如此循环使用 12 次。测定每次发酵过程中的产气量,并计算每克水葫芦每天的平均产气速率,共测量 3 次,取其平均值。

1.4 分析方法

1.4.1 活性污泥性质测定^[11-12]

(1) 污泥沉降体积比(ϕ_{SV30})

将混匀的活性污泥混合液迅速倒进 1000 mL 量筒中至满刻度,静置沉淀 30 min 后,沉淀污泥与所取混合液之体积比,以 mL/L 表示。

(2) 混合液悬浮固体质量浓度(ρ_{MLSS})

将污泥样品摇匀,准确量取 100 mL 于已恒重的

蒸发皿中,在恒温水浴上蒸干后移至(105 ± 2) ℃ 的烘箱中,继续干燥 2 ~ 3 h,取出并放入干燥器中冷却,半小时后称重。重复以上操作,直到前后两次质量差不超过 0.002 g,为恒重 m 。

$$\rho_{MLSS} = \frac{m}{0.1}$$

(3) 悬浮固形物质量浓度(ρ_{SS})

将定量滤纸在 103 ~ 105 ℃ 烘干,干燥器内冷却,称重,反复直至获得恒重或称重损失小于前次称重的 4%,质量为 m_0 。

将 100 mL 样品用上述干燥至恒重的滤纸过滤,放入 103 ~ 105 ℃ 的烘箱中烘干取出,在干燥器中冷却至平衡温度称重,反复干燥至恒重或失重小于前次称重的 5% 或 0.5 mg (取较小值),质量为 m_1 。

$$\rho_{SS} = \frac{(m_1 - m_0)}{0.1}$$

(4) 可挥发性固形物质量浓度(ρ_{VSS})

将干净的坩埚放入烘箱中干燥 1 h,取出放在干燥器中冷却至恒重,称重,质量为 m_2 ,单位 g;

将(3)中的滤纸和污泥放在上述干燥至恒重的坩埚中,然后放入马弗炉中,600 ℃ 灼烧 2 h,在干燥器中冷却并称重为 m_3 。

$$\rho_{VSS} = \frac{[(m_1 + m_2 - m_0) - m_3]}{0.1}$$

(5) 混合液挥发性悬浮固体质量浓度(ρ_{MLVSS})

$$\rho_{MLVSS} = \rho_{MLSS} - \rho_{VSS}$$

(6) 比值(f)

$$f = \rho_{MLVSS} / \rho_{MLSS}$$

(7) 污泥容积指数(I_{SVI})

$$I_{SVI} = \frac{\phi_{SV30}}{\rho_{MLSS}}$$

1.4.2 pH 值测定

发酵液的 pH 值由配备 E-201-C 型 pH 复合电极的 PHS-3C 型精密 pH 计测定。

1.4.3 产气量测定

气体经过导气软管进入集气瓶,集气瓶预先装满饱和食盐水,气体进入后,饱和食盐水通过导液软管排入量筒,读取量筒的液面示数,确定排出的液体量,即反应产生的气体量。

1.4.4 气体组分测定

发酵气体成分采用气相色谱检测,条件为:气化温度 80 ℃;不锈钢柱 $\phi 3 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 长 2 m,填料 porapak Q 80 ~ 100 目(150 ~ 178 μm),柱温 90 ℃;

热导检测器(TCD),检测器温度 180 ℃;载气高纯氮气,流速 15 mL/min;进样量 1 mL。通过外标法定量分析气体中各组分的含量。

2 结果与讨论

2.1 固体碱对活性污泥驯化的影响

依据实验方法 1.3.1 节所设条件进行实验,样品 A 中添加 10 g 固体碱,B 为空白对照,对污泥性质进行测定,结果如表 1 所示。

表 1 固体碱对活性污泥性质的影响

Table 1 Effect of alkaline resin on the activated sludge properties

| 性质 | 样品编号 | |
|---------------------------------|--------|--------|
| | A | B |
| $\phi_{SV30}/(mL \cdot L^{-1})$ | 873.30 | 972.90 |
| $\rho_{SS}/(g \cdot L^{-1})$ | 30.20 | 38.64 |
| $\rho_{VSS}/(g \cdot L^{-1})$ | 19.54 | 27.91 |
| $\rho_{MLSS}/(g \cdot L^{-1})$ | 41.80 | 40.52 |
| $\rho_{MLVSS}/(g \cdot L^{-1})$ | 22.26 | 12.61 |
| $I_{SVI}/(mL \cdot g^{-1})$ | 20.89 | 24.01 |
| f | 0.53 | 0.31 |

如表 1 所示,1 L 活性污泥在 A、B 量筒中厌氧培养 60 h 后,A 中 ϕ_{SV30} 为 873.3 mL/L,沉淀体积小 B。A 中 ρ_{SS} 含量是 B 的 78.16%, ρ_{VSS} 含量是 B 的 70.01%。由 ρ_{MLVSS} 可以得到 A 污泥中微生物的数量大于 B。由 I_{SVI} 看出 A 中污泥较 B 中密实,有机物含量较少、易于凝聚沉降。由 f 值可以看出,A 中灰分含量较 B 少,污泥龄较长 B 短,但微生物的活性较 B 高。从外观上看,A 中污泥与上清液分层明显,上清液清澈透明,污泥呈松散颗粒状;B 中污泥与上清液分层不明显,上清液浑浊,污泥成粘稠状。由此说明经过固体碱处理的污泥沉降速度较快,颗粒成型较快,更有利于微生物的生长。

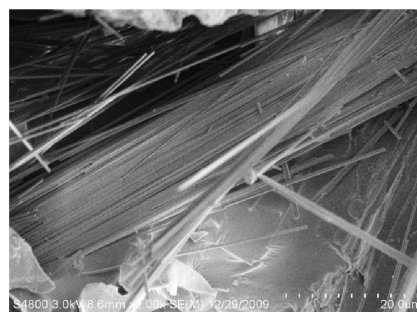
由上述可知,固体碱促进了污泥中微生物对有机物的有效利用。它可以将污泥中微生物难以利用的大分子有机物降解为容易利用的小分子有机物,还可以将活性污泥中部分不溶性物质转化为可溶性物质。

2.2 固体碱对水葫芦微观结构的影响

由于水葫芦的致密纤维结构不易被微生物直接利用,因此利用固体碱对其进行预处理,并与液体碱预处理进行比较。依据实验方法 1.3.2 节所设条件进行实验,对水葫芦粉进行电镜扫描,得到结果见图 1。



(a) 未经预处理



(b) 固体碱预处理 24 h



(c) 10% 氢氧化钠溶液预处理 24 h

图 1 水葫芦粉预处理的 SEM 图

Fig. 1 SEM images of hyacinth pretreated water

如图 1 所示,未经固体碱处理的水葫芦粉(图 1(a)),其木质纤维结构致密有序,纤维素被半纤维素和木质素形成的致密结构牢牢地包裹着。固体碱处理 24 h 后(图 1(b)),水葫芦粉致密的木质纤维结构被破坏,结构松散凌乱。10% 氢氧化钠溶液处理 24 h 后(图 1(c)),水葫芦粉致密的木质纤维素结构同样也被破坏。水葫芦经固体碱处理 24 h 与 10% 氢氧化钠溶液处理 24 h 效果相当。由图 1(b)和(c)可以得到,液体碱和固体碱的活性位点都可以破坏水葫芦纤维外面包围的木质素保护层,使纤维素和半纤维素挣脱木质素的束缚,暴露出来,从而容易被微生物或其产生的胞外酶降解利用。

2.3 固体碱对沼气发酵的影响

2.3.1 固体碱对沼气发酵过程中 pH 值的影响

按实验方法 1.3.3 节所设条件进行实验,其中

1 号瓶不加固体碱,2 号瓶发酵初始添加固体碱 2 g,将发酵瓶置于 35 °C 恒温水浴锅中培养 15 d,对其 pH 值进行测定,结果见图 2。

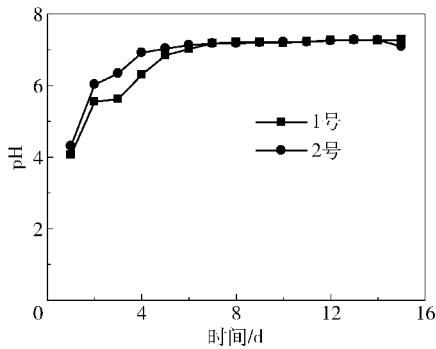


图2 固体碱对发酵液 pH 值的影响
Fig.2 Effect of solid base on the pH value of the fermentation broth

如图 2 所示,发酵开始前 3 d,2 号瓶和 1 号瓶发酵液都处于酸性状态,但 2 号发酵液 pH 值上升较快。第 4 天,2 号瓶发酵液 pH 值为 6.92,接近中性,进入甲烷化发酵阶段;此时 1 号瓶发酵液 pH 值为 6.30,偏酸,在第 5 天才进入甲烷化发酵阶段。在第 5 天及以后 1 号和 2 号瓶都处于甲烷化阶段。

水葫芦沼气发酵的限速环节是胞外酶对水葫芦的降解。为了提高产沼气速度,必须加快水葫芦的水解速度,但是随着水葫芦快速水解发酵液的酸化速度也加快,pH 值就会随之降低。而产沼气的主要菌群产甲烷菌适合中性偏碱的环境,如果 pH 值过低,产甲烷菌的活性就会降低,甚至死亡,将直接影响到后续甲烷化阶段的顺利进行。水葫芦的快速水解与甲烷化的顺利进行形成了一对矛盾,而固体碱的存在有效地调和了这对矛盾。在厌氧发酵产酸阶段,它可以吸附有机酸,提高发酵液中的 pH 值。而当沼气发酵产甲烷阶段发酵液呈较强碱性时,吸附在固体碱上的有机酸又会被释放,中和发酵液的 pH 值,使其维持在弱碱性环境。由此可见,发酵液中添加固体碱有利于创造甲烷菌生长的良好环境。

2.3.2 添加固体碱对沼气发酵产气的影响

实验条件同 2.3.1 节,记录发酵过程的产气量,计算水葫芦的平均产气速率,结果列于图 3。

由图 3 可知,固体碱的添加对水葫芦厌氧发酵产气有明显的影响,其产气过程有 3 个阶段。第一个阶段产气速率缓慢上升,1 号瓶为 1~3 d,2 号瓶为 1~4 d,此时,2 号瓶的产气速率大于 1 号瓶。在这一阶段产酸菌将水葫芦分解成乙酸、H₂ 和 CO₂,此

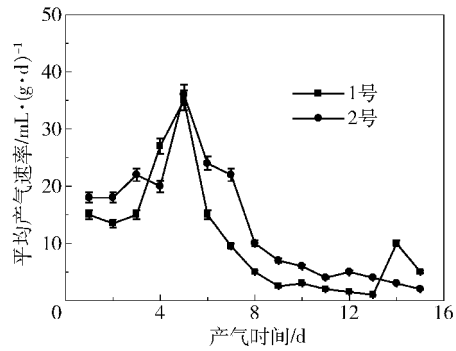


图3 添加固体碱对产气速率的影响

Fig.3 Effect of solid base on the gas production rate
时发酵液的 pH 值会降低。在 pH 值较低的情况下,产甲烷菌会受到抑制,而固体碱的存在缓冲了 pH 值的变化,2 号瓶的产甲烷菌已开始产气,因此 2 号瓶的产气速率高于 1 号瓶。第二个阶段是产气高峰,1 号瓶的产气高峰为两天,产气速率分别为 27.00 mL/(g·d) 和 35.00 mL/(g·d),2 号瓶仅为一天,产气速率达 36.00 mL/(g·d)。1 号瓶在第一阶段产甲烷量少,因此在第二阶段底物较丰富,表现为产气高峰提前 1 d 到来,并维持了 2 d。第三阶段是产气速率下降阶段,该阶段 2 号瓶的产气速率基本大于 1 号瓶。2 号瓶的产甲烷菌未受第一阶段酸化的影响,其活性和数量都超过 1 号瓶。故 2 号瓶产气速率总体上大于 1 号瓶。

2.3.3 固体碱包装方式对沼气发酵的影响

按实验方法 1.3.3 节所设条件进行实验,其中 2 号瓶在发酵初始加固体碱 2 g,3 号瓶添加包装成袋的固体碱 1 袋(2g/袋)。将发酵瓶置于 35 °C 恒温水浴锅中培养 15 d,记录发酵过程的产气量,计算水葫芦的平均产气速率,结果见图 4。

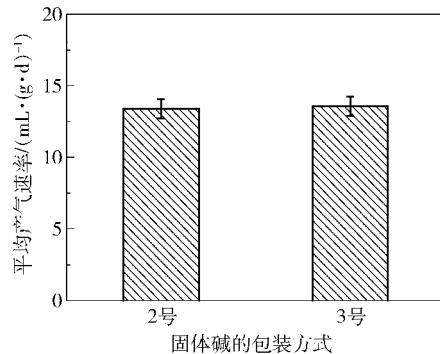


图4 固体碱的包装方式对产气速率的影响
Fig.4 Effect of the packaging of the solid base on the gas production rate

图 4 可以看出,3 号瓶 15 d 的平均产气速率比 2

号瓶多 1.27%, 由此可以认为将固体碱包装成袋添加到发酵液中与将固体碱直接添加到发酵液中相比无明显影响。为了方便固体碱的回收再生与循环利用, 将固体碱用不锈钢丝网包装成袋后添加到沼气发酵液中。

2.3.4 固体碱添加方式对产气量的影响

按实验方法 1.3.3 节所设条件进行实验, 其中 3 号瓶在发酵初始时添加包装成袋的固体碱 1 袋(2 g/袋), 4 号瓶待发酵 2 d 后添加固体碱 1 袋(2 g/袋), 5 号瓶在发酵初始时每天加固体碱 0.4 g(共加 5 d)。将发酵瓶置于 35 °C 恒温水浴锅中培养 15 d, 记录发酵过程的产气量, 计算水葫芦的平均产气速率, 结果见图 5。

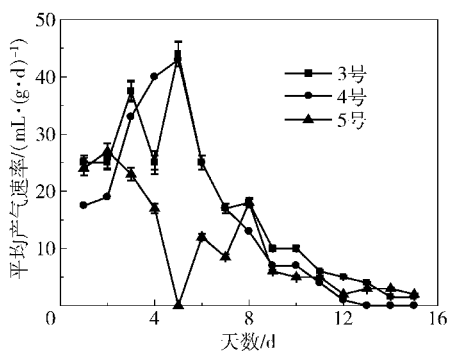


图 5 固体碱添加方式对产气速率的影响

Fig. 5 Effect of the method of addition of the solid base on the gas production rate

如图 5 所示, 4 号瓶前 3 d 产气速率明显低于 3 号瓶。5 号瓶前两天产气速率与 3 号瓶相似。在沼气发酵第 5 天时, 3 号瓶和 4 号瓶同时到达产气最高峰。而 5 号瓶在第 5 天产气量为 0, 这可能是由于固体碱的连续加入, 发酵液 pH 值一直处于变化阶段, 产气微生物难以适应这种 pH 值变化而停止生长。

3 号瓶在发酵初始添加的固体碱吸附了发酵产酸阶段所产的有机酸, 产酸过程没有发生反馈抑制。3 号瓶 15 d 的总产量达 2035 mL, 平均产气速率为 13.57 mL/(g·d)。比 4 号瓶高 4.38%, 比 5 号瓶高 30.48%。因此, 在发酵初始加入固体碱效果最好。

2.3.5 固体碱的添加量对沼气发酵的影响

按实验方法 1.3.3 节所设条件进行实验, 其中 1 号瓶不加固体碱; 其他实验组在发酵初始添加包装成袋的固体碱(2 g/袋), 3 号瓶添加一袋共 2 g, 6 号瓶添加 2 袋共 4 g, 7 号瓶添加 3 袋共 6 g; 8 号瓶添加 4 袋共 8 g。将发酵瓶置于 35 °C 恒温水浴锅中培养

15 d, 记录发酵过程的产气量, 计算水葫芦的平均产气速率, 检测产气中的甲烷浓度, 结果见图 6。

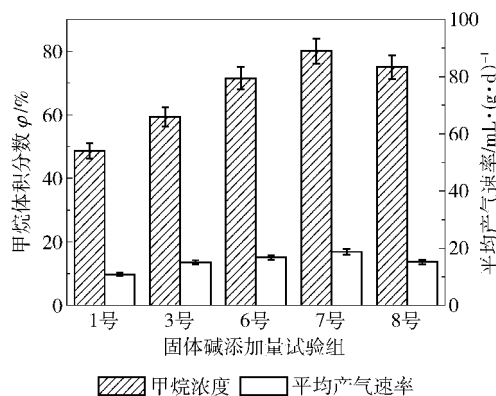


图 6 固体碱添加量对沼气发酵的影响

Fig. 6 Effect of solid base dosage on the biogas fermentation

如图 6 所示, 1 号瓶发酵 15 d 平均产气速率为 9.77 mL/(g·d); 3 号瓶为 13.60 mL/(g·d), 产气速率比 1 号瓶提高 39.20%; 6 号瓶为 15.13 mL/(g·d), 产气速率提高 54.86%; 7 号瓶最大, 为 16.88 mL/(g·d), 产气速率提高 72.77%; 8 号瓶为 13.70 mL/(g·d), 产气速率提高 40.23%。与不添加固体碱发酵体系相比, 固体碱添加量为发酵底物量的 20% 时, 发酵产气中甲烷体积分数为 59.29%, 提高了 22.00%; 固体碱添加量为发酵底物量的 60% 时, 发酵产气中甲烷含量最大, 达 80.06%, 提高 64.73%; 固体碱添加量为发酵底物量的 80% 时, 发酵产气中甲烷含量为 75.00%, 提高 54.32%。

从水葫芦平均产气速率和产气甲烷含量可以看出, 发酵初始时固体碱的添加量都是以发酵底物水葫芦的 60% 为最优。在发酵产酸过程中, 固体碱的碱性基团和发酵液中的酸结合并与其形成动态平衡。在产酸阶段碱性基团不断地与酸结合, 在产气阶段又不断地将其释放, 使发酵液的 pH 值维持在稳定状态。固体碱添加量低于 60% 时, 结合有机酸的量少, 发酵液的 pH 值较低, 利于产酸菌的生长而不利于产甲烷菌的生长, 发酵体系中会代谢产生氢气, 因此, 甲烷含量相对较低。当固体碱添加量高于 60% 时, 固体碱结合的有机酸较多, 发酵液的 pH 值较高, 有利于有机物水解, 而水解有机物的微生物会代谢产生二氧化碳, 因此发酵体系中甲烷含量较低。

2.3.6 固体碱的使用寿命

按实验方法 1.3.4 节所设条件进行实验, 固体碱循环使用 8 次后水葫芦的平均产气速率结果见图 7。

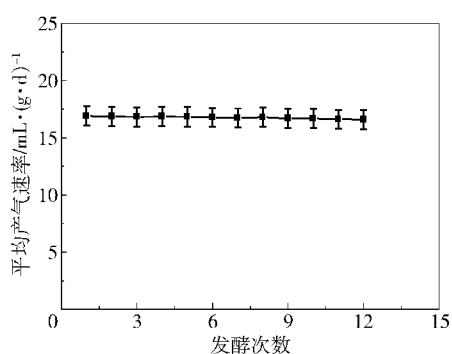


图7 固体碱的再生对产气速率的影响

Fig. 7 Effect of regeneration of the solid base on the gas production rate

由图7可知,固体碱重复使用12次后,其对水葫芦发酵的强化作用没有明显降低,水葫芦沼气的产气速率都在 $16.70 \text{ mL}/(\text{g}\cdot\text{d})$ 左右。由此可以得到以15 d为一个发酵周期,固体碱在厌氧发酵过程中可以重复使用12次即半年以上。

3 结论

(1) 固体碱对活性污泥驯化有明显效果。与不添加固体碱相比,经固体碱处理后,污泥结构密实、有机物含量少、颗粒成型较快,沉降速度较快,更有利于微生物的生长。

(2) 固体碱对水葫芦预处理有明显效果。水葫芦经固体碱处理24 h,与经10%氢氧化钠溶液处理24 h效果相当。预处理后,水葫芦的致密纤维结构被破坏,纤维素和半纤维素挣脱木质素的束缚,暴露出来,容易被微生物或其产生的胞外酶降解利用。

(3) 固体碱可以调节发酵液的pH值,防止有机酸对产酸菌的反馈抑制,与不添加固体碱相比,发酵体系提前一天进入甲烷化发酵阶段。

(4) 固体碱可以提高发酵产沼气的速率和效率。与不添加固体碱的发酵体系相比,发酵初始加入固体碱且添加量为发酵底物量的60%时,产气速率最高为 $16.88 \text{ mL}/(\text{g}\cdot\text{d})$,提高了72.77%,此时,甲烷含量最大,达80.06%(体积分数),提高了64.73%。固体碱的使用寿命在半年以上。

参考文献:

[1] Wang Z X, Calderon M M. Environmental and economic analysis of application of water hyacinth for eutrophic water treatment coupled with biogas production [J]. Journal of Environmental Management, 2012, 110(15): 246-

253.

- [2] O'Sullivan C, Rounsefella B, Grinhamb A, et al. Anaerobic digestion of harvested aquatic weeds: water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), cabomba (*Cabomba Caroliniana*) and salvinia (*Salvinia molesta*) [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(10): 1459-1468.
- [3] Chuang Y S, Lay C H, Sen B, et al. Biohydrogen and biomethane from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) fermentation: Effects of substrate concentration and incubation temperature [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(21): 14195-14203.
- [4] 何加骏, 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 J J, Yan S H, Ye X M, et al. Progress in Anaerobic Digestion of Water Hyacinths [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2008, 24(3): 359-362. (in Chinese)
- [5] Yusuf M O L, Ify N L. The effect of waste paper on the kinetics of biogas yield from the co-digestion of cow dung and water hyacinth [J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(3): 1345-1351.
- [6] Abdel-Fattah A F, Abdel-Naby M A. Pretreatment and enzymic saccharification of water hyacinth cellulose [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(3): 2109-2113.
- [7] Gao J, Chen L, Yan Z C. Effect of ionic liquid pretreatment on the composition, structure and biogas production of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) [J]. Biore-source Technology, 2013, 132(3): 361-364.
- [8] 魏世清, 覃文能, 李金怀, 等. 水葫芦与猪粪混合厌氧发酵产沼气研究 [J]. 广西林业科学, 2008, 37(2): 80-83.
- Wei S Q, Qin W N, Li J H, et al. Biogas generated by anaerobic fermentation of eichhornia crassipes and swine feces [J]. Guangxi Forestry Science, 2008, 37(2): 80-83. (in Chinese)
- [9] 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, 25(4): 787-790.
- Ye X M, Zhou L X, Yan S H, et al. Studies on the anaerobic digestion of water Hyacinth [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2009, 25(4): 787-790. (in Chinese)
- [10] 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.
- Zhou Y X, Kong X, Hao L F, et al. Two-phase anaerobic digestion of water hyacinth pretreated with dilute sulphuric acid [J]. China Biogas, 1996, 14(3): 8-12.

- (in Chinese)
- [11] 张洛红, 李兴. 活性污泥性质检测方法的比较研究[J]. 工业用水与废水, 2011, 42(6): 89-93.
Zhang L H, Li X. Comparative study on detection methods of property of activated sludge[J]. Industrial Water & Wasterwater, 2011, 42(6): 89-93. (in Chinese)
- [12] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998: 106/147.
He Y L. Anaerobic biological treatment of wastewater [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1998: 106/147. (in Chinese)

Biogas production by the fermentation of water hyacinth enhanced by solid bases

YANG XiaoRui LIANG JinHua XU WenLong MIAO QingSong ZHU JianLiang

(College of Biotechnology and Pharmaceutical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: A solid base has been used for water hyacinth pretreatment and sludge acclimation, by addition to a water hyacinth fermentation system for anaerobic fermentation. The effects of solid base addition on activated sludge acclimation, water hyacinth microstructure, gas production rate and the methane content of fermentation gas were investigated. The results showed that: adding solid base during the initial fermentation with a dosage of 60% of the substrate gave the maximum average gas production rate by the water hyacinth (16.88 mL/(g·d)) with a methane content of 80.06%; compared with the fermentation system in the absence of solid base, these values represent increases of 72.77% and 64.73% respectively. The solid base can acclimate sludge, destroy the dense fibrous structure of the water hyacinth, adjust the pH value of the fermentation system in order to prevent organic acid feedback inhibition of bacteria, create a more suitable enabling environment for Methanogenus growth, and improve the efficiency and rate of water hyacinth methanation.

Key words: water hyacinth; solid alkaline; activated sludge; biogas production