

多级逆流工艺促进城市污泥厌氧发酵生产挥发性脂肪酸

郭磊¹, 刘和¹, 李秀芬¹, 堵国成^{1,2}, 陈坚^{1,2}

1 江南大学生物工程学院环境生物技术研究室, 无锡 214122

2 江南大学生物工程学院工业生物技术教育部重点实验室, 无锡 214122

摘要: 采用一种新型的厌氧发酵工艺——多级逆流发酵工艺对城市污泥进行厌氧发酵, 实现高效产挥发性脂肪酸的目的。结果表明, 实验条件下应用多级逆流发酵工艺, 挥发性脂肪酸浓度与产率分别达到 (10.5 ± 0.5) g/L 和 0.20 gVFAs/gVS, 与普通厌氧发酵工艺相比, 分别提高了 31% 和 54%。此外, 在多级逆流工艺中, 底物有机质去除率可达 50%, 较普通厌氧发酵提高了 37%。进一步分析多级逆流工艺产酸的机制, 发现产酸效率的提高在于降低了发酵产物对厌氧产酸细菌的抑制效应, 并且工艺的 VFAs 产率以及有机质去除率分别取决于第一级和第三级厌氧发酵过程。因此, 城市污泥采用多级逆流工艺厌氧发酵不仅能够有效促进挥发性脂肪酸的生成, 而且能够较大程度上提高污泥中有机质的去除率。

关键词: 城市污泥, 多级逆流工艺, 厌氧发酵, 挥发性脂肪酸

Bioproduction of Volatile Fatty Acids from Excess Municipal Sludge by Multistage Countercurrent Fermentation

Lei Guo¹, He Liu¹, Xiufen Li¹, Guocheng Du^{1,2}, and Jian Chen^{1,2}

1 Laboratory of Environmental Biotechnology, School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

2 Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

Abstract: A novel anaerobic fermentation process—multistage countercurrent fermentation was applied to improve the bioproduction of volatile fatty acids (VFAs) from excess municipal sludge. Results showed that the total VFAs concentration and the total VFAs yield reached (10.5 ± 0.5) g/L and 0.20 gVFAs/gVS (Volatile solid) using this novel process. Comparing with the conventional anaerobic fermentation, the concentration and yield of total VFAs increased by 31% and by 54%, respectively. Moreover, removal ratio of organic solids also increased by 37% and it was 50% at the end of multistage countercurrent fermentation. We further investigated the mechanism of VFAs production. Results revealed that this novel process could reduce the inhibitory effect of VFAs on the acid-forming microorganisms, and the total VFAs yield and the removal ratio of organic solids respectively depended on the first stage and the third stage of this novel process. Therefore, the multistage countercurrent fermentation can efficiently improve the bioproduction of VFAs from excess municipal sludge, and relatively enhance the removal ratio of organic solids.

Keywords: excess municipal sludge, multistage countercurrent fermentation, anaerobic fermentation, volatile fatty acids

随着我国城市污水生物处理量的增加, 产生的 污泥量也逐年增长, 带来的环境问题愈来愈突出。

Received: November 8, 2007; **Accepted:** April 3, 2008

Supported by: the National Natural Sciences Foundation of China (No. E50508014), the Hi-Tech Research and Development Program ("863" Program) of China (No. 2006AA06Z315) and the Key Grant Project of Chinese Ministry of Education (No. V200611).

Corresponding author: He Liu. Tel: +86-510-85918310; Fax: +86-510-85918309; E-mail: liuhe@jiangnan.edu.cn

国家自然科学基金资助项目 (No. E50508014), 国家 863 计划资助项目 (No. 2006AA06Z315), 教育部重大项目 (No. V200611) 资助。

厌氧消化作为一种成熟的技术已广泛应用于城市污泥的处理处置。挥发性脂肪酸(VFAs)是城市污泥厌氧消化过程中重要的中间产物,不仅可作为发酵工业的原料生产高附加值的产品,还可作为化工原料合成其他产品^[1]。最近研究还发现乙酸是微生物燃料电池的首选底物^[2,3]。因此,通过厌氧发酵将污泥中的有机质转化为挥发性脂肪酸,再利用其生产高附加值的产品是一条与目前污泥厌氧消化产甲烷完全不同的资源化利用新途径^[4,5]。

目前,有关有机废物(水)厌氧发酵产酸的研究多集中于工艺参数如温度^[6]、pH^[7-12]、抑制剂^[13]等方面,而对难降解有机废物发酵产酸的新工艺鲜有报道。城市污泥有机成分较为复杂,异质性高。有些成分(如多糖类)在厌氧发酵过程中优先降解,生物利用率高,有些(如生物纤维)则难以利用,降解率低。此外,随着厌氧发酵过程的进行,发酵产物逐渐累积,导致产物抑制效应不断增强,进一步使得污泥中的有机质越来越难被微生物利用^[14,15]。基于上述原因,本研究提出城市污泥厌氧发酵新技术——多级逆流发酵工艺,针对城市污泥成分复杂的特点,通过在多级反应瓶间将发酵上清液与发酵残留底物进行逆向流动,并在上清液流动方向上向体系补加新鲜料液,使最难被微生物利用的污泥底物与新鲜料液接触提高底物降解率;同时使新鲜污泥与较高浓度的产物接触,降低其抑制作用。

1 材料与方法

1.1 发酵污泥来源及其特性

发酵污泥取自无锡市城北污水处理厂剩余污泥,其特性指标如表 1 所示。

表 1 污泥特性

Table 1 Characteristics of excess municipal sludge

Moisture content (%)	Volatile solids (%)	T-N (g/g)	T-P (g/g)	T-K (g/g)	pH
85	42	2.88×10^{-1}	9.38×10^{-3}	2.49×10^{-3}	8.05

1.2 接种污泥的驯化

接种污泥为取自无锡某柠檬酸厂 UASB 中的厌氧颗粒污泥, TSS 为 68.18 g/L, VSS 为 59.09 g/L。颗粒污泥导入有效容积为 2 L 的 UASB, 加入由葡萄糖配制的 COD 浓度为 20 000 mg/L 的模拟废水, 35°C 下进行驯化。驯化期间定期监测反应器内 pH 变化,

当出水 pH 稳定在 4.0 左右时, 得到具有较高活性产酸细菌的厌氧颗粒污泥作为实验接种物。

1.3 实验方法

1.3.1 多级逆流厌氧发酵工艺

取 3 个 1000 mL 锥形瓶(编号 B1, B2, B3), 分别加入已加水调好的发酵污泥混合液(VS=40 g/L)500 mL, 按与底物 1:10 比例加入接种污泥, 各瓶充 N₂ 1 min 使瓶内保持厌氧, 用橡胶塞塞紧, 置于温度为 35°C 和转速为 120 r/min 摇床中进行厌氧发酵。

发酵 8 d 后各瓶发酵液中挥发性脂肪酸含量积累到一定程度时, 开始进行逆流操作。将 B1、B2、B3 三瓶中的混合液分别倒入 500 mL 离心管中, 8000 r/min 离心 15 min, 将 B1 瓶中的发酵残留污泥加入到 B2 瓶, B2 瓶的残留污泥加入到 B3 瓶, B3 瓶的残留污泥排出体系, 然后向 B1 瓶补充新鲜接种污泥和发酵污泥; 与此同时, B3 瓶的发酵上清液加入到 B2 瓶, B2 瓶的加入到 B1 瓶, B1 瓶的发酵液作为工艺的发产物排出体系, 最后往 B3 瓶中补充新鲜料液。三瓶混合完毕后, 继续发酵, 每 3 天进行一次逆流操作。新加污泥从进入 B1 瓶到排出 B3 瓶共需 9 d (即 SRT=9 d)。因而将这一分批培养过程作为一个完整的逆流操作周期。实验所添加新鲜料液为适合微生物生长繁殖的微量元素混合液^[16], 不含可作为厌氧微生物发酵产酸的底物以保证实验所测挥发性脂肪酸均为微生物利用污泥作为底物发酵所产生。每次进行逆流操作时取发酵液样品用于测试分析, 同时测定各瓶产气量。逆流操作过程如图 1 所示。

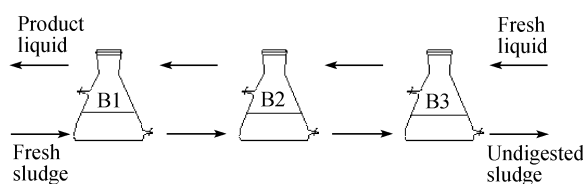


图 1 多级逆流工艺示意图

Fig. 1 Schematics of the multistage countercurrent fermentation

另取三个锥形瓶(编号 H1, H2, H3)分别只加入与 B1, B2, B3 瓶相同量的接种污泥发酵, 发酵 8 d 后与 B1, B2, B3 三瓶同时进行相同条件的逆流操作, 以扣除种泥本身产生的 VFAs。

1.3.2 普通厌氧发酵工艺

取一锥形瓶(编号 C)加入与实验组等量的接种污泥和发酵污泥进行厌氧发酵产酸, 发酵条件与实

验组相同, 定期取发酵液样品测定其挥发性脂肪酸含量, 与多级逆流工艺进行比较。另取一锥形瓶(编号 H), 只加入相同量的种泥发酵, 以扣除种泥本身产生的 VFAs。

1.4 分析测定方法

1.4.1 常规指标

实验中所用污泥的含水率、VS、总磷、总氮等指标均采用标准方法进行分析^[17,18]。

1.4.2 发酵液中挥发性脂肪酸的测定

从瓶中取 5 mL 发酵液, 15 000 r/min 离心 15 min, 所得上清液经 0.2 μm 膜过滤, 取滤出液 0.5 mL 于离心管中, 加入等体积 3 mol/L 磷酸酸化, 再加入等体积 0.835 g/L 的 4-甲基戊酸作为内标物进行气相色谱分析。气相色谱仪型号为岛津 GC2010, 采用 AOC-20i+s 自动进样装置。毛细管柱型号 PEG-20M, 30 m×0.32 mm×0.50 μm。气化室温度 250°C, FID 检测器温度 250°C。采用一阶程序升温, 柱箱初始温度 80°C, 保留 2 min, 然后以 15°C/min 速率升温至 190°C, 保留 1 min。

1.5 各指标计算方法

城市污泥厌氧发酵产酸及底物降解效果可用以下几个指标分析:

- (1) 底物降解率 = $\frac{\text{初始 VS 量} - \text{发酵终了 VS 量}}{\text{初始 VS 量}}$ (%)
- (2) VFA 转化率 = $\frac{\text{VFA 产量}}{\text{反应消耗 VS 量}}$ (gVFAs/gVS_{digest})
- (3) 乙酸转化率 = $\frac{\text{乙酸产量}}{\text{反应消耗 VS 量}}$ (g 乙酸/gVS_{digest})
- (4) VFA 产率 = $\frac{\text{VFA 产量}}{\text{初始 VS 量}}$ (gVFAs/gVS_{fed})
- (5) 乙酸产率 = $\frac{\text{乙酸产量}}{\text{初始 VS 量}}$ (g 乙酸/gVS_{fed})

实验中当多级逆流体系运行稳定后, 分别计算各周期(即已经扣除上一周期中产生的挥发性脂肪酸含量)中的底物降解率以及 VFA 与乙酸的转化率和产率, 取各指标的均值与普通工艺产酸达峰值时的各指标进行比较分析。

为考察发酵产物对产酸细菌的抑制效应, 计算了体系游离态挥发性脂肪酸浓度, 公式^[21]如下:

$$\text{游离态有机酸} = \frac{C_T [H^+]}{K_A + [H^+]}$$

其中: C_T —各挥发性脂肪酸浓度; $[H^+]$ —体系 H^+ 浓度; K_A —各挥发性脂肪酸的离解常数

2 结果与讨论

2.1 污泥多级逆流厌氧发酵工艺与普通工艺厌氧发酵产酸效果比较

多级逆流工艺中发酵上清液与污泥沿相反方向逆向流动, 即产物从 B3 向 B1 中富集, 因而把 B1 瓶的发酵液作为整个工艺的产物, 与 C 瓶进行比较, 见图 2。

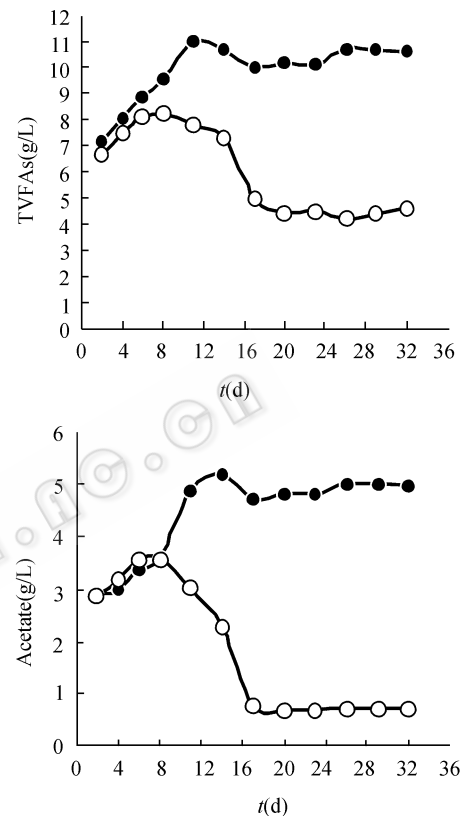


图 2 多级逆流工艺与普通工艺发酵产总挥发性脂肪酸与产乙酸效果比较

Fig. 2 Comparison of the concentrations of VFAs and acetic acids between the multistage countercurrent fermentation and the conventional anaerobic fermentation

● B1 ○ C

结果表明, 发酵前 8 天多级逆流工艺与普通工艺的发酵条件相同, 两者产酸效果相当。从第 8 天开始, 多级逆流工艺开始进行逆流操作, B1 瓶挥发性脂肪酸浓度可维持在 10.5 g/L 左右。而普通工艺在发酵 8 d 后, 挥发性脂肪酸浓度不断下降。与普通工艺相比, 多级逆流工艺系统运行稳定后总酸产量比普通工艺达到峰值时提高了 31%, 乙酸浓度提高了 37%。分析以上结果, 造成多级逆流工艺产酸效果优于普通工艺的原因是: (1) 产甲烷被抑制, 普通

工艺在第 8 天后, 种泥中世代期较长的产甲烷细菌数量增加, 产甲烷效应明显(数据未列出), 造成挥发性脂肪酸浓度不断下降。而逆流工艺由于污泥停留时间短, 有效地抑制了产甲烷效应; (2)富集作用, 随着 B2 瓶中发酵液转入 B1 瓶, 挥发性脂肪酸逐渐富集, 浓度升高; (3)维持了种泥高效产酸活性, 逆流工艺 B1 瓶由于不断有新鲜种泥加入, 保持了污泥的产酸活性。

2.2 挥发性脂肪酸分布比较

城市污泥厌氧发酵可产生多种挥发性脂肪酸, 包括乙酸, 丙酸, 丁酸等。在多级逆流发酵工艺中, 体系运行稳定后, 分析 B1 瓶中产生 VFA 组成, 乙酸占 VFAs 比例为 50%。在普通发酵产酸工艺中, 发酵第 8 天产生 VFAs 浓度最高, 此时乙酸约为 43%, 随发酵时间的延长, 由于产甲烷作用, VFAs 浓度下降的同时乙酸的比例也降至 20%以下。比较多级逆流工艺运行稳定后与普通工艺发酵得到 VFAs 峰值时乙酸在 VFAs 中的比例, 多级逆流工艺提高了 16%。多级逆流工艺总挥发性脂肪酸分布结果表明, B1 瓶中总挥发性脂肪酸浓度增加的同时, 乙酸占总 VFA 的比例维持在 50%左右, 未发生较大变化, 这说明工艺在稳定运行的同时可以保持较好的挥发性脂肪酸和乙酸生产强度。而普通工艺由于产甲烷效应, 挥发性脂肪酸浓度下降的同时乙酸比例也大幅下降。两种工艺挥发性脂肪酸构成比的不同, 是由于多级逆流工艺的操作方式抑制了世代期较长的产甲烷微生物, 使产酸体系中世代期较短的产酸微生物占优势。多级逆流工艺这一特点可逐步实现城市污泥厌氧发酵定向产酸, 并为挥发性脂肪酸的后续利用及再加工工艺奠定良好的基础。

2.3 VFA 产率以及底物转化率

多级逆流工艺的 VFAs 产率及底物降解率根据体系稳定后各周期 VFAs 产量以及底物降解量计算, 而普通工艺则根据在 VFAs 浓度最高, 即发酵第 8 天时的产量及底物降解量计算。多级逆流工艺运行稳定后 VFAs 产率与乙酸产率分别达到 0.20 gVFAs/gVS 和 0.094 g 乙酸/gVS, 较普通发酵工艺分别提高了 54%和 65%。同时, 底物降解率较普通工艺提高了 37%。何品晶^[19]等采用序批式厌氧发酵方式考察了不同 pH 对易腐性有机垃圾厌氧水解和酸化的影响, 结果发现在 pH 为 7 和发酵时间为 200 h 时, 获

得的 VFAs 的产率仅为 0.12 gVFAs/gVS; Yuan 等^[10]考察了不同 pH 条件下剩余污泥厌氧发酵产酸的情况, 发现 pH 为 10, 发酵时间为 8 d 时, VFAs 产率最高, 达到 0.25 gCOD/gVS。而本文中应用多级逆流工艺促进城市污泥厌氧发酵生产挥发性脂肪酸, 在未调节体系 pH 值情况下, VFAs 浓度与产率均能维持在较高水平。此外, 采用多级逆流工艺还可大幅度降低污泥中的有机质含量, 这对污泥减量化处理也有着较大的意义。

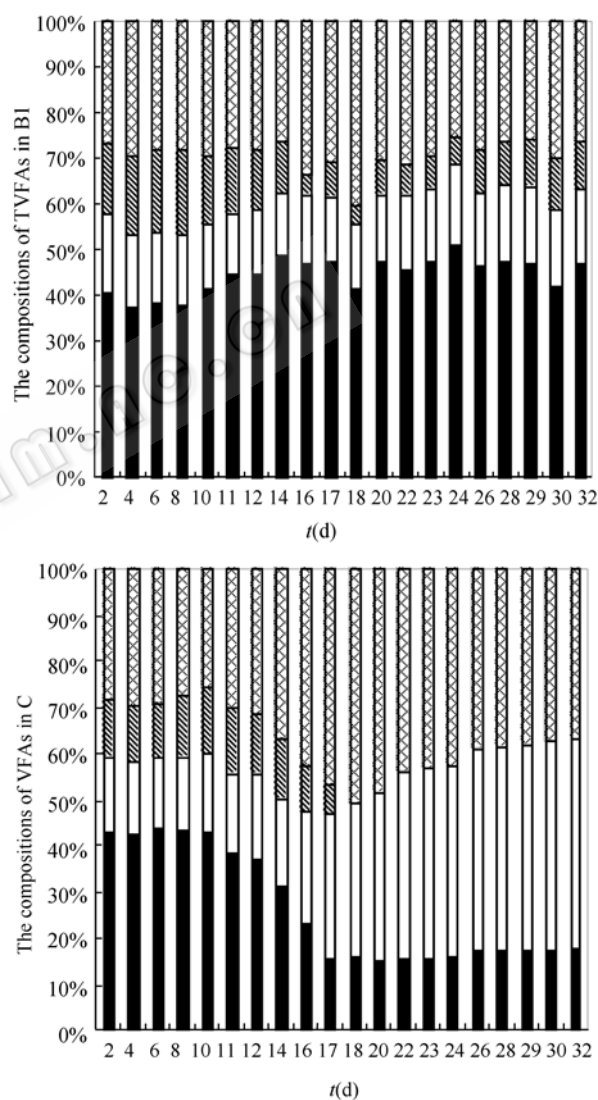


图 3 多级逆流工艺与普通工艺产总挥发性脂肪酸构成比分布变化图

Fig. 3 Comparison of the distribution patterns of VFAs between the multistage countercurrent fermentation and the conventional anaerobic fermentation

■ Acetic acid □ Propionic acid ▨ Butyric acid ▩ Other VFAs

表 2 多级逆流工艺与普通工艺厌氧发酵产酸效果与底物降解效果比较

Table 2 Comparison of the acidogenic efficiency and the removal ratio of organic solids between the multistage countercurrent fermentation and the conventional anaerobic fermentation

Items	Conventional anaerobic fermentation	Multistage countercurrent fermentation	Increasing by
VFAs Concentration (g/L)	8.23	10.5	31%
Acetic acids Concentration (g/L)	3.57	5.00	37%
VFAs Yield (gVFAs /gVS _{fed})	0.13	0.20	54%
Acetic acids Yield (g acetic acids /gVS _{fed})	0.057	0.094	65%
Conversion ratio from VS into VFAs(gVFAs/gVS _{digest})	0.356	0.399	12%
Conversion ratio from VS into acetic acids (g acetic acid /gVS _{digest})	0.156	0.187	20%
Percentage of acetic acids in VFAs(%)	43.44	50.96	17%
Removal ratio of VS (%)	36.49	50.16	37%

2.4 多级逆流厌氧发酵工艺对城市污泥发酵产物抑制效应的消除

在污泥发酵产酸体系中, 游离态挥发性脂肪酸的累积会对产酸细菌产生抑制效应。为进一步阐述多级逆流工艺产酸效率增强的原因, 接下来分析了两种工艺的发酸液中游离态挥发性脂肪酸的浓度及 pH 变化趋势, 见图 4。可以看出, 多级逆流体系中游离态挥发性脂肪酸浓度在第 8 天时达到最高值 3 g/L, 由于此时开始逆流操作, 稳定状态下游离态挥发性脂肪酸浓度维持在 0.5 g/L 左右, pH 值也稳定在 6。相比于多级逆流工艺, 普通发酵工艺在 12d 后由于产甲烷作用, 挥发性脂肪酸浓度大幅降低, 从而造成游离态挥发性脂肪酸浓度的下降。陈艺阳等^[20]通过添加产甲烷菌抑制剂, 考察了 pH 对发酵污泥产挥发性脂肪酸的影响。结果发现 pH 值为 6 时, 可为产酸菌营造一个较好的生态位, 但随发酵时间的增加, 挥发性脂肪酸浓度并未持续上升, 其原因主要是由于发酵产物的积累增强了其对体系产酸微生物的抑制效应。Sandhya 等^[21]也报道, 在 pH 为 6 时, 游离态挥发性脂肪酸浓度达到 0.65 g/L 就会对厌氧产酸细菌产生抑制作用。本试验中, 多级逆流工艺稳定后的结果表明产物抑制作用有明显的减弱, 有利于持续稳定高效生产挥发性脂肪酸, 这是多级逆流工艺在降低产物抑制效应方面的优势。

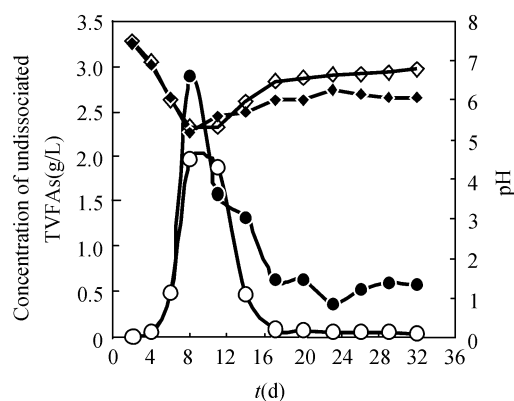


图 4 多级逆流工艺与普通工艺发酵体系中游离子态挥发性脂肪酸与 pH 值随时间变化分布图

Fig. 4 Time course of the undissociated VFAs concentration and pH for the multistage countercurrent fermentation and the conventional anaerobic fermentation

● B1 ○ C ◆ pH of B1 ◇ pH of C

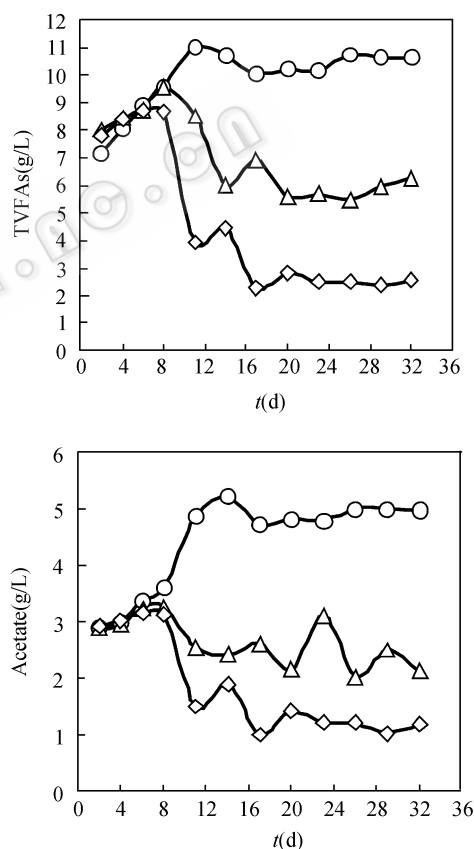


图 5 多级逆流工艺三级反应瓶产总挥发性脂肪酸与产乙酸变化图

Fig. 5 Variation of the concentrations of VFAs and acetic acids at each stage in the multistage countercurrent fermentation process

○ B1 △ B2 ◇ B3

2.5 多级逆流厌氧发酵工艺分级产酸效果

考察挥发性脂肪酸在逆流工艺各级反应瓶中的富集作用和底物在各级反应瓶中的降解程度, 可深

入分析多级逆流工艺高效产酸的机制并为优化工艺提供依据。图 5 表示了多级逆流工艺中三级反应瓶之间的产酸变化情况。分析发现, 发酵前 8 天, 由于初始发酵条件相同, 各瓶产酸效果相当, 第 8 天开始逆流操作后, VFAs 在各级反应瓶之间(B3→B2→B1)不断富集, B1 瓶中的 VFAs 浓度最高, 与新添加进体系的污泥接触, 降低了普通工艺中产物累积所带来的抑制效应, 因而保持了 B1 瓶中较高的 VFAs 产量。同时, 随着底物在各级反应瓶之间(B1→B2→B3)的转移, 降解率逐步提高, 当到达 B3 瓶时, 难降解有机成分残留多, 此时通过向 B3 瓶添加含有适合微生物生长利用的维生素以及微量元素的新鲜料液, 可促进底物的进一步降解。

表 3 多级逆流工艺分级产酸效果及底物降解比较
Table 3 Comparison of the VFAs yield and the removal ratio of organic solids at each stage in the multistage countercurrent fermentation process

Items	B1	B2	B3
VFAs yield (gVFAs/gVS _{fed})	0.081	0.073	0.056
Acetic acid yield (g acetic acid/gVS _{fed})	0.044	0.028	0.034
Percentage of acetic acids in VFAs (%)	55.19	39.69	60.69
Removal ratio of VS (%)	15.05	20.99	24.13

表 3 给出了多级逆流工艺中各级反应瓶的产酸效果及污泥中有机质去除率。从表中可见, B1 瓶的 VFAs 产率最高, 而 VS 去除率最高值出现在 B3 瓶这级反应中。这种结果可以为今后多级逆流工艺的优化改进提供依据, 即可以通过改变新加污泥的 VS 浓度来得到更高的 VFAs 产率和通过改变补加新鲜料液的浓度来得到更高的底物去除率。

3 结论

主要结论如下:

(1) 城市污泥厌氧发酵多级逆流工艺相比于普通工艺具有更高的 VFAs 产量, 多级逆流工艺运行稳定后 VFAs 与乙酸产率分别达到 0.20 gVFAs/gVS 和 0.094 g 乙酸/gVS, 较普通发酵工艺分别提高了 54%和 65%。同时, 多级逆流工艺对污泥底物的降解率较普通工艺提高了 37%。

(2) 城市污泥厌氧发酵多级逆流工艺具有可连续稳定运行的优势, 其产酸优势的机制在于逆流操

作能较好的减弱体系中游离态挥发性脂肪酸对微生物的抑制作用。

(3) 通过对工艺分级产酸效果的分析, 多级逆流工艺的 VFAs 产率以及底物降解程度的高低分别取决于 B1 和 B3 两级反应, 为后续的工艺优化指明了方向。

REFERENCES

- [1] Zhou Y, Yin X. Production status and market analysis of acetic acid. *Journal of Chemical Industry & Engineering*, 2003, **24**(2): 27–30.
- [2] Liu H, Cheng SA, Logan BE. Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell. *Environ Sci Technol*, 2005, **39**(2): 658–662.
- [3] Min B, Logan BE. Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell. *Environ Sci Technol*, 2004, **38**(21): 5809–5814.
- [4] Iranpour R, Stenstrom M, Tchobanoglous G. Environmental engineering: energy value of replacing waste disposal with resource recovery. *Science*, 1999, **285**(5428): 706–711.
- [5] Largus TA, Khursheed K, Muthanna HA, et al. Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *Trends Biotechnol*, 2004, **22**(9): 477–485.
- [6] Song YC, Kwon SJ, Woo JH. Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic and thermophilic digestion of sewage sludge. *Water Research*, 2004, **38**: 1653–1662.
- [7] Horiuchi JI, Shimizu T, Tada KT, et al. Selective production of organic acids in anaerobic acid reactor by pH control. *Bioresource Technology*, 2002, **82**: 209–213.
- [8] Samir KK, Chen WH, Li L, et al. Biological hydrogen production: effects of pH and intermediate products. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004, **29**: 1123–1131.
- [9] Nie YQ, Liu H, Du GC, et al. Acetate production by acidification-homoacetogenesis two-phase coupling process: effect of initial pH. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2007, **23**(4): 686–691.
聂艳秋, 刘和, 堵国成, 等. 初始 pH 值对产氢产乙酸/耗氢产乙酸两段耦合工艺定向生产乙酸的影响. *生物工程学报*, 2007, **23**(4): 686–691.
- [10] Yuan HY, Chen YG, Zhang HX, et al. Improved bioproduction of short-chain fatty acids (SCFAs) from excess sludge under alkaline conditions. *Environ Sci Technol*, 2006, **40**: 2025–2029.
- [11] Ren NQ, Wang AJ, Ma F. *Physiological Ecology of Acidogens in Anaerobic Biotreatment Process*. Beijing: Science Press, 2005.
任南琪, 王爱杰, 马放. 产酸发酵微生物生理生态学. 北京: 科学出版社, 2005.

- [12] Zheng P, Hu BL. Kinetics of anaerobic ammonia oxidation. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2001, **17**(2): 193-198.
郑平, 胡宝兰. 厌氧氨氧化动力学研究. *生物工程学报*, 2001, **17**(2): 193-198.
- [13] Chen YY, Liu H, Du GC, *et al.* Effect of 2-bromoethanesulfonate addition on acetate accumulation and variation of bacterial community in anaerobic fermentation of sludge. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, **13**(1): 108-111.
陈艺阳, 刘和, 堵国成, 等. 2-溴乙烷磺酸盐对污泥厌氧发酵过程中乙酸累积及细菌种群的影响. *应用与环境生物学报*, 2007, **13**(1): 108-111.
- [14] Mavinic DS, Koers DA. Performance and kinetics of low-temperature aerobic sludge digestion. *WPCF*, 1979, **51**(8): 2088-2097.
- [15] Zhang QM, Chen WP, Hu GC, *et al.* State and development for treatment and disposal of sewage sludge in city. *Agro-environmental Protection*, 2000, **19**(1): 33-34.
张青敏, 陈卫平, 胡国臣, 等. 污泥有效利用研究进展. *农业环境保护*, 2000, **19**(1): 33-34.
- [16] Caldwell DR, Bryant MP. Medium without rumen fluid for non-selective enumeration and isolation of rumen bacteria. *Appl Microbiol*, 1966, **14**: 794-801.
- [17] Yin J, Tan XJ. Disposition and Reuse of Wastewater and Sludge. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
尹军, 谭学军. 污水和污泥的处理和再利用. 北京: 化工出版社, 2004.
- [18] Editorial Committee of the Analytical Method of Water and Wastewater of the State Environmental Protection Administration of China. *Analytical Methods of Water And Wastewater*. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
国家环保局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [19] He PJ, Pan XJ, Lü F, *et al.* The influence of pH value on anaerobic hydrolysis and acidogenesis rates of biodegradable organic waste. *China Environmental Science*, 2006, **26**(1): 57-61.
何晶晶, 潘修疆, 吕凡, 等. pH 值对有机垃圾厌氧水解和酸化速率的影响. *中国环境科学*, 2006, **26**(1): 57-61.
- [20] Chen YY. The study on the acetate production by fermentation from municipal sewage sludge[M.A dissertation]. Wuxi: Jiangnan University, 2007.
陈艺阳. 市政污泥厌氧发酵定向产乙酸的研究[硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2007.
- [21] Babel S, Fukushi K, Sitanrassamee B, *et al.* Effect of acid speciation on solid waste liquefaction in an anaerobic acid digester. *Water Research*, 2004, **38**: 2417-2423.

《生物工程学报》专刊出版的有关规定

一、申请人资格和定义

申请人应是我国生物技术领域的学术带头人, 熟悉该领域某个方向的现状, 能够把握该方向的发展动态, 并有能力组织国内外专家撰写论文。申请者(即特约编辑)应是组织专刊申请和正式提出专刊申请的负责人。在专刊出版计划批准后的实施过程中, 是该专刊的实际负责人, 应保证有足够的时间和精力从事专刊的组织工作。

二、特约编辑职责

1. 认真填写专刊申请表(见下载专区), 保证所提交申请表内容的真实性;
2. 与编辑部签定出版专刊责任书;
3. 专刊应在确定选题后至少于截稿前半年向国内外公布征稿通知, 来稿仍统一从编辑部网上投稿系统提交, 审稿由专刊特约编辑组织;
4. 负责专刊出版时间进度控制、审稿专家的组织、专刊内容以及质量的把关;
 - (1) 制定出版时间进度计划, 包括审稿时间、审定时间、出版时间等;
 - (2) 组织审稿专家小组(至少 6 人, 其中含国外专家 1~2 人), 审稿专家小组成员要精干、务实, 学风端正, 成员专业知识背景结构合理;
 - (3) 参照《生物工程学报》论文审稿程序, 严格把关论文质量;
 - (4) 专刊内容以及质量: 专刊应反映该研究方向的国内外现状及水平, 包括国内外关键性的研究工作, 鼓励邀请国外作者稿件。应以论文质量作为最高选取原则, 即公平原则, 不偏向任何单位或个人; 专刊组织合理、文章分布均衡; 专刊最终稿由编委会审定签发;
 - (5) 任何作者在同一期专刊中不能多于 2 篇论文, 第一作者论文不得超过 1 篇。

三、申请专刊流程

1. 下载填写专刊申请表, 向编辑部提交申请;
2. 报送主编及编委会讨论专刊申请;
3. 一个月内告知专刊申请结果, 并确定出版的卷、期数;
4. 负责专刊的特约编辑与编辑部签订出版专刊责任书。