

文章编号: 1673-1689(2011)05-0734-06

提高太湖蓝藻厌氧发酵产丁酸的预处理方法

任洪艳, 吕 娴, 阮文权*

(江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 蓝藻厌氧发酵定向产丁酸是蓝藻资源化处置的理想方式。作者选择 4 种操作简单易行的预处理方法, 即酸法、碱法、加热和微波法对蓝藻进行预处理, 考察处理后蓝藻厌氧发酵的丁酸和有机酸产量。结果表明, 各预处理方法均能不同程度地提高蓝藻厌氧发酵过程中的丁酸产量和有机酸产量。其中蓝藻经过 pH 10 碱性预处理后调节初始 pH 5.0 厌氧发酵的丁酸及有机酸产量最高, 分别为 4390 mg/L 和 5962 mg/L, 比空白提高了近 1 倍。

关键词: 有机酸; 酸; 蓝藻; 厌氧发酵; 预处理

中图分类号: X 17

文献标识码: A

Pretreatment Methods to Enhance the Butyric Acid Production by Anaerobic Fermentation on Taihu Lake Blue-Green Algae

REN Hong-yan, LU Xian, RUAN Wen-quan*

(School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Butyric acid oriented production via anaerobic fermentation is a desirable pathway to the recycling treatment of blue-green algae. In the study, four different pretreatment methods, namely acid, alkaline, heat and microwave were used to enhance the fermentation. The content of butyric acid and total organic acids produced from pretreated blue-green algae was evaluated. The results indicated that all pretreatments enhanced the production of butyric acid and total organic acids. Among of them, alkaline pretreatment at pH 10 exhibited the highest production of butyric acid and total organic acids from the blue-green algae feedstock, the value achieved at 4390 mg/L and 5962 mg/L, respectively, which both doubled as compared to that before pretreatment.

Key words: organic acids, butyric, blue algae, anaerobic digestion, pretreatment

近年来,随着经济和人口的快速增长,水体富营养化现象日益严重,蓝藻水华频频发生,蓝藻问

题已成为湖流域的重要研究课题。在蓝藻暴发时,直接打捞蓝藻是减缓爆发程度、保护水体生态环境

收稿日期: 2010-12-27

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2009BAC52B03); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(JUSRP11112)。

作者简介: 任洪艳(1979-),女,黑龙江黑河人,工学博士,讲师,主要从事废弃物资源化方面的研究。

Email: renhongyan@jiangnan.edu.cn

* 通信作者: 阮文权(1966-),男,上海人,工学博士,教授,博士研究生导师,主要从事资源与环境方面的研究。

Email: wqruan@jiangnan.edu.cn

最直接和安全有效的应急治理方法。但每年打捞上岸的几十万 t 蓝藻会占用大量的土地堆放, 且堆放蓝藻产生渗滤液通过渗透作用、暴雨径流等将形成二次污染。因此妥善处理打捞后的蓝藻显得尤为重要, 其中太湖蓝藻打捞后的资源化利用已成为一个颇具吸引力的研究方向^[1-3]。作者所在实验室在国内较早地开展了太湖蓝藻资源化方面的研究工作, 包括厌氧消化产沼气和挥发性脂肪酸等^[4-6]。

在先前厌氧消化产丁酸的实验工作中发现^[7], 蓝藻生物质的水解是限速步骤。这是大多数有机物质存在于细胞内, 而蓝藻细胞壁在化学组成上和细菌类似, 主要为肽聚糖组成, 可分为内外两层(内层是纤维素, 少数人认为是果胶质和半纤维素; 外层以果胶质为主, 有少量纤维素), 在厌氧消化处理过程中细胞壁仍不易破裂, 从而成为生物转化过程中的关键性限制因素。如果在蓝藻厌氧消化前对其进行一定的预处理, 一方面促使细胞壁破裂, 细胞内含物溶出, 加速蓝藻水解过程, 达到缩短发酵时间的目的; 另一方面使蓝藻中的难降解物质变为易降解物质, 难溶物变为易溶物, 增大产酸菌可利用的底物浓度, 达到提高丁酸产率的目的。

基于此, 作者拟采用 4 种常见的预处理方法, 即酸法、碱法、加热和微波法对蓝藻进行预处理^[8-11], 探讨 4 种预处理方法对蓝藻厌氧发酵产丁酸过程的影响。

1 材料与方法

1.1 蓝藻来源及其预处理方法

蓝藻取自太湖渤公岛蓝藻打捞处, 其主要性状指标见表 1。

表 1 蓝藻和污泥的性质

Tab. 1 Characterization of the algae and anaerobic sludge				
原料	TS/ %	VS/ %	TN/ (mg/ g)	TP/ (mg/ g)
蓝藻	3.95	3.46	2.62	0.76
颗粒污泥	13.58	10.62	1.81	0.48

酸处理: 在一定量的蓝藻中加入 HCl, 调节 pH 值分别为 2、3、4、5, 轻轻搅拌使其混合均匀。室温反应 24 h 后, 用 NaOH 调节初始 pH 至适当值。

碱处理: 在一定量的蓝藻中加入 NaOH, 使 pH 值分别为 9、10、11、12, 轻轻搅拌使其混合均匀。室温反应 24 h 后, 用盐酸调节初始 pH 值至适当值。

热处理: 1) 温度梯度。将一定量的蓝藻放于灭菌锅中, 分别在 60、80、100 ℃下处理 30 min; 2) 时间梯度。选择最佳温度, 将一定量的蓝藻放于灭菌

锅中分别加热 15、30、45、60 min。

微波处理: 将蓝藻于微波炉中火条件下分别处理 3、4、5 min 后, 搅拌均匀后待用。

1.2 接种污泥来源及其特性

接种污泥为厌氧颗粒污泥, 取自无锡市某柠檬酸厂正在运行的 IC 反应器中。颗粒污泥在接种前先进行加热预处理及活化处理^[12-13]。加热预处理是将颗粒污泥热处理(121 ℃处理 15 min), 以杀灭其中的产甲烷菌, 留下产丁酸菌的芽孢。活化是将热处理后的污泥在 COD 5 000 mg/L 的葡萄糖溶液中培养一周, 使产丁酸菌的芽孢萌发, 污泥的活性得以恢复并加强, 以达到较好的发酵效果。

1.3 实验设计

如图 1 所示, 采用 500 mL 的抽滤瓶作为反应容器, 用倒置的量筒作为气体收集装置。反应瓶置于气浴恒温振荡器中, 保持反应的温度和转速恒定。气体检测由抽滤瓶上端的气体取样口取样, 发酵液从抽滤嘴取样。

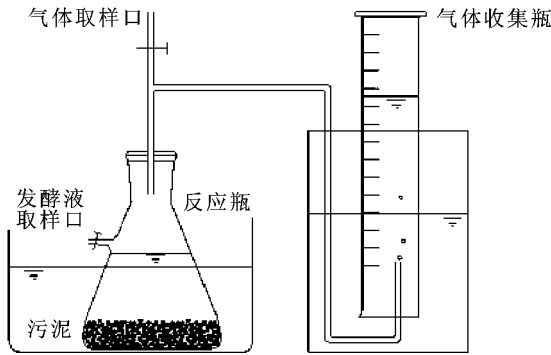


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment equipment

作者采用分批发酵的方式。发酵前测定原料含固率, 控制反应容器中干物质(TS)总量为 15 g, 将颗粒污泥与蓝藻按物料比 1 : 5(TS)混合, 对蓝藻分别预处理, 同时设置空白参比组, 即取未经过预处理的蓝藻作为发酵底物。采用一次进料, 加蒸馏水至 650 mL, 在转速 100 r/min, 温度(35 ± 1) ℃的条件下恒温发酵。

1.4 发酵过程相关指标的测定

1.4.1 TS 和 VS 的测定 烘干法^[14]。

1.4.2 发酵液 pH 值的测定 Delta 320 型 pH 计: 德国 Mettler-Toledo。

1.4.3 有机酸的测定 采用液相色谱仪(Agilent 1100, 美国), 柱子为 ZORBAX SB-Aq 柱, 柱长 150 mm × 4.6 mm, 5 μm, 流动相: 0.5% 乙腈、99.5% 0.02 mol/L KH₂PO₄、调 pH 2.0(用磷酸调节); 流动相流速: 0.5 mL/min; 进样量: 10 μL; 柱温: 30

℃; 检测器: 紫外检测器(210 nm)。

2 结果与讨论

2.1 发酵初始 pH 值对蓝藻定向发酵产丁酸的影响

厌氧微生物的产酸发酵存在 3 种类型: 丁酸型发酵、丙酸型发酵和乙醇型发酵, 不同产酸发酵菌群的主要液相末端发酵产物不尽相同, 如丁酸型发酵以丁酸和乙酸为主要液相末端发酵产物。理论表明^[15-16], pH 值是影响产酸相末端发酵产物组成的主要限制性因子之一。因此, 作者首先考察蓝藻厌氧消化初始 pH 4.0~6.5 时丁酸产量相应的变化, 结果见图 2。

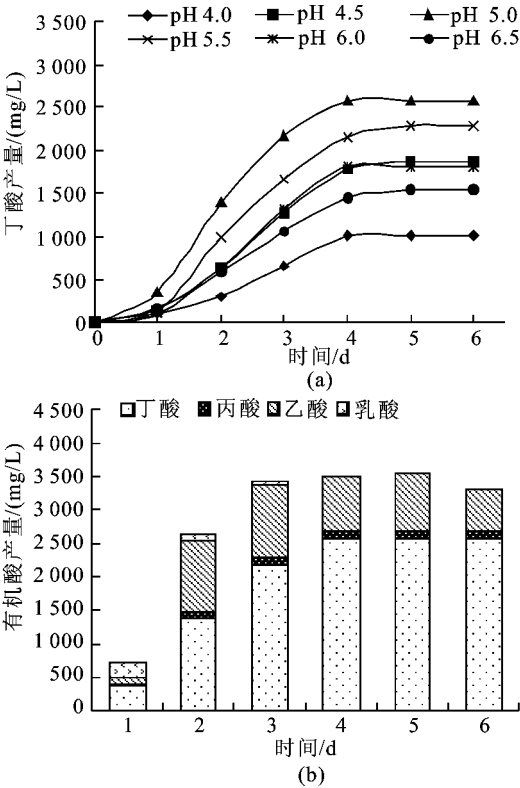


图 2 发酵初始 pH 值对发酵过程中有机酸产量的影响
Fig.2 Effect of initial pH on organic acid titer during fermentation process

当发酵初始 pH 值较低时, 随着 pH 值升高, 丁酸产量明显提高。当发酵初始 pH 5.0 时, 丁酸产量达到最高, 为 2 570 mg/L, 明显优于其他实验组。随后进一步提高 pH, 丁酸产量反而下降, 直到 pH 6.5 时, 丁酸产量约为 1 500 mg/L。其中 pH 4.0 时, 丁酸产量最低, 可能是由于酸分子可以自由穿透细胞膜, 进入细胞内的酸引起细胞质酸化, 使得微生物细胞跨膜质子梯度, 即 pH 梯度下降甚至崩溃, 导致微生物细胞内依赖于 pH 梯度的产能反应和运输系统发生解耦联, 对微生物的生长产生抑制甚至毒害作用^[17]。

在此基础上, 也对蓝藻厌氧发酵初始 pH 5.0 时所产其它几种主要有机酸进行了分析, 结果见图 2(b) 所示: 当发酵进行 5 d 时, 累计产酸达 3 554 mg/L, 其中丁酸占 72%, 其次为乙酸和丙酸。结果表明, 随着厌氧发酵过程的进行, 反应体系中有有机酸质量浓度逐渐增加, 引起 pH 值下降, 但过低的 pH 值将抑制微生物生长及污泥活性, 甚至影响反应继续进行。

2.2 酸法预处理对蓝藻厌氧发酵产丁酸的影响

酸法预处理属于化学预处理方法, 通过化学物质直接作用于底物, 改变底物性质。作者在厌氧发酵前, 通过加入一定量的酸浸泡蓝藻, 造成蓝藻细胞壁破裂及胞内有机质释放溶解为小分子物质, 便于微生物利用, 以提高蓝藻的厌氧消化效率^[18]。

经酸法预处理后, 蓝藻厌氧发酵丁酸及有机酸产量见图 3。在预处理 pH 值为 4 和 5 时, 丁酸产量明显提高, 分别为 3 621 mg/L 和 3 342 mg/L, 表明适当的酸预处理过程会促进蓝藻的厌氧发酵。但酸处理 pH 值为 2 和 3 时, 有机酸的产量明显低于空白组。尤其 pH 2 时, 丁酸及其他有机酸产量均较低, 仅为空白组的 1/3。分析原因可能是极酸条件严重破坏或消解了蓝藻中的有机物, 引起易于被利用的成分大大减少, 最终导致产量下降。因此, 酸法预处理的最佳条件为 pH 值为 5。

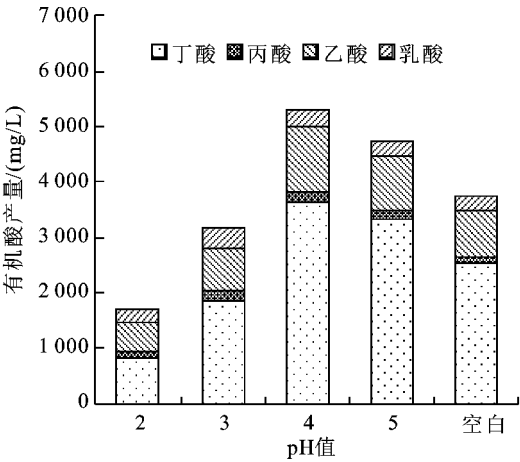


图 3 酸法预处理对丁酸及有机酸产量的影响
Fig.3 Effects of acid pretreatment on butyric acid and organic acid production

2.3 碱法预处理对蓝藻厌氧发酵产丁酸的影响

碱预处理属于化学法, 和酸预处理相似, 浸泡蓝藻后可使细胞壁中部分碱可溶性糖层水解, 同时溶解部分脂类, 从而增大细胞壁的通透性, 使胞内物质更易析出。同时碱液调节细胞 pH 值, 也可改变蛋白质的电荷性质, 使蛋白质之间或蛋白质与其它物质之间的相互作用力降低而易于溶解^[18]。厌氧

发酵前加入一定量的碱液浸泡蓝藻, 在抑制细胞活性的同时, 使细胞壁溶解, 释放胞内物质, 增大产酸菌可利用的底物浓度, 有效促进蓝藻的厌氧消化。

经过碱预处理后, 蓝藻发酵的丁酸及有机酸产量的变化情况见图 4。蓝藻经 pH 9、pH 10 和 pH 11 碱预处理后, 有机酸产量均提高, 其中 pH 10 时丁酸产量和有机酸产量最高, 分别为 4 390 mg/L 和 5 962 mg/L, 比空白组提高了近 1 倍。表明低剂量的添加碱对提高污泥的厌氧消化性能效果更为明显。在 pH 12 时, 产量比空白组略有下降, 这可能是由于过碱的环境引起蓝藻过度变质变性, 降低了底物中可供微生物利用的有机物浓度。因而, 碱预处理的最佳条件是 pH 10。

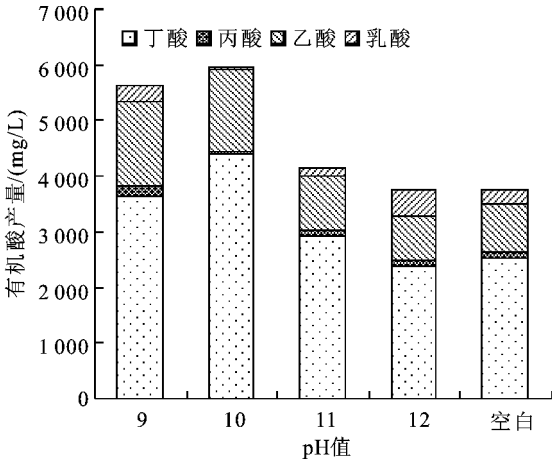


图 4 碱法预处理对丁酸及有机酸产量的影响
Fig. 4 Effects of alkali pretreatment on butyric acid and organic acid production

2 4 加热预处理对蓝藻厌氧发酵产丁酸的影响

热处理技术常用于厌氧消化的预处理阶段, 属于物理预处理方法。生物细胞经过热处理, 有助于细胞内结合水和有机质(如蛋白质、脂肪和碳水化合物等)被释放出来并进一步水解。经不同的温度处理, 破坏生物细胞的部位不同: 在 45~ 65 ℃时, 热处理会破坏细胞膜破裂以及 rRNA; 在 50~ 70 ℃时破坏 DNA; 在 65~ 90 ℃时破坏细胞壁; 在 70~ 95 ℃引起蛋白质变性^[19]。因此作者选择蓝藻的热预处理温度为 60~ 100 ℃。同时, 生物细胞中大分子蛋白质经过热处理后被分解成溶于水的小分子片段, 并可产生一定浓度的氨氮, 从而使处理系统具有较好的可生化性和缓冲能力^[20]。

2 4 1 热处理温度影响 不同热处理温度对蓝藻厌氧消化过程中累积丁酸和有机酸产量的影响见图 5。分别在 60、80、100 ℃热处理 30 min 后, 蓝藻发酵丁酸和有机酸的产量与未处理的空白样相比均明显提高。其中经 60 ℃热处理后, 虽然对丁酸

产量影响不大, 但一定程度上提升了乙酸产量, 并显著提高了总有机酸产量; 当预处理温度达 80 ℃时, 蓝藻发酵产丁酸及有机酸产量最高, 分别达到 4 114 mg/L 和 5 797 mg/L; 进一步升高温度, 则导致丁酸和有机酸产量均下降。因此, 确定最佳热处理的温度为 80 ℃。

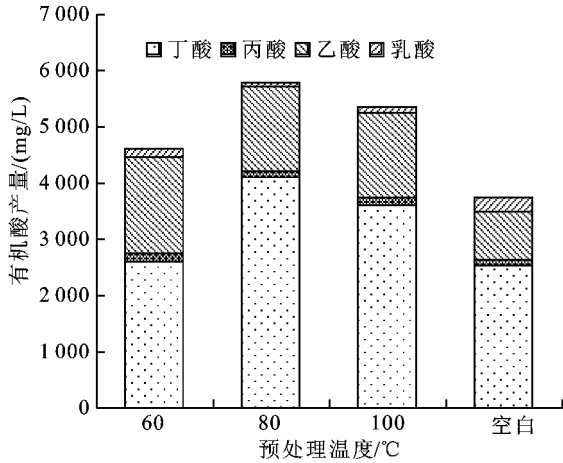


图 5 不同热处理温度对丁酸及有机酸产量的影响
Fig. 5 Effects of thermal pretreatments on butyric acid and organic acid production

2 4 2 热处理时间影响 进一步考察热处理时间对蓝藻厌氧发酵产酸的影响。蓝藻经 80 ℃热处理 15、30、45、60 min 后进行厌氧发酵产丁酸和有机酸, 结果见图 6。与未加热的空白样相比, 当预处理时间较短时, 随着预处理时间的延长, 热处理后蓝藻发酵产酸量显著增加; 在热处理 45 min 时, 相对应的丁酸和有机酸产量分别约为 4 300 mg/L 和 6 000 mg/L; 当热处理时间大于 45 min 后, 其对应的酸产量明显降低, 在热处理 60 min 时, 丁酸和有机酸产量均低于对照样, 分别仅为 1 800 mg/L 和 2 900 mg/L 左右。相对于热处理 15 min 和 60 min 的效果不理想, 可能是由于热处理时间过短, 导致破壁不彻底, 胞内有机物不能完全溶出; 而时间过长会引起有机物质过分液化或变质。另外, 尽管热处理 45 min 和 30 min 的蓝藻发酵产丁酸及有机酸产量有所增加, 但增加并不是特别明显, 所以结合热处理过程能耗方面的考虑, 今后实验中热处理时间应为 30 min。

2 5 微波预处理对蓝藻厌氧发酵产丁酸的影响

微波预处理也是物理预处理方法的一种, 利用微波场将电能转化为热能, 导致细胞内的极性物质尤其是水分子吸收微波能, 产生大量的热能, 使细胞内温度迅速上升, 液态水汽化产生的压力将细胞膜和细胞壁冲破, 形成微小的孔洞, 进一步加热, 导致细胞内部和细胞壁的水分减少, 细胞收缩, 表面

出现裂纹。孔洞或裂纹的存在使得胞外溶剂容易进入细胞内,溶解并释放出胞内产物,以此达到蓝藻破壁胞内有机物溶出,使固体物质转化为液态,利于微生物利用的目的^[18]。基于此,作者尝试采用微波预处理来促进蓝藻厌氧发酵,其酸产量随微波预处理时间的变化见图 7。

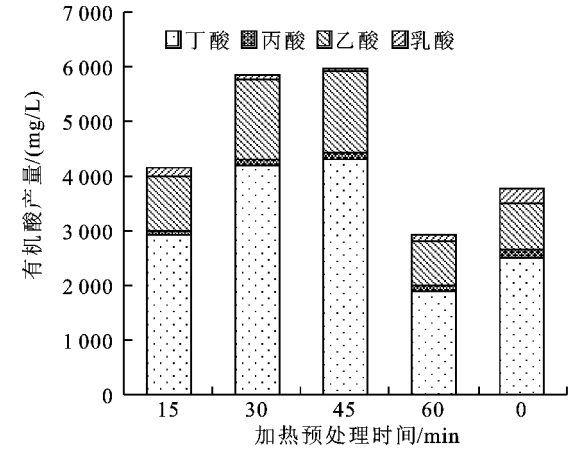


图 6 不同热处理时间对丁酸及有机酸产量的影响
Fig. 6 Effects of different thermal time on butyric acid and organic acid production

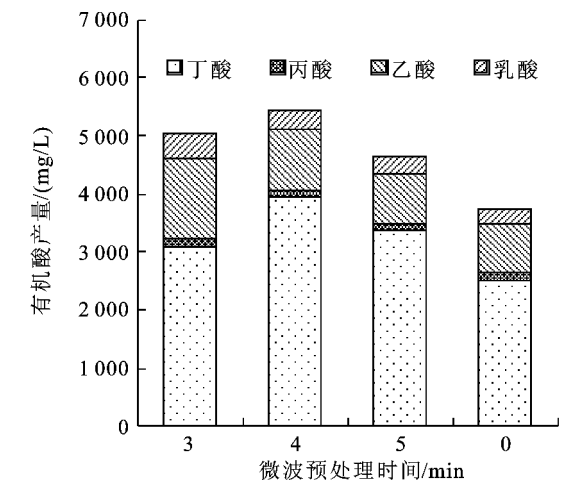


图 7 不同微波预处理时间对丁酸和有机酸产量的影响
Fig. 7 Effects of microwave pretreatment time on butyric acid and organic acid production

微波预处理 3~5 min 后,蓝藻厌氧发酵所产丁酸和有机酸均明显提高。其中微波处理 4 min 时所产丁酸及有机酸质量浓度最高,分别约为 4 000 mg/L 和 5 400 mg/L。综上,最佳的微波预处理时间为 4 min。

2.6 各种预处理方法的比较

经过上述酸法、碱法、加热和微波等 4 种预处理

理方法对蓝藻厌氧发酵产酸影响的研究,初步获得它们最适的预处理参数,分别为:酸法, pH 4.0;碱法 pH 10.0; 80 ℃加热 30 min; 中火微波 4 min。在它们各自适宜条件下,蓝藻发酵产丁酸量见图 8。

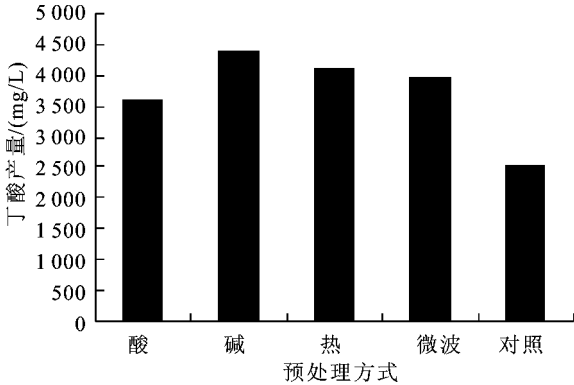


图 8 预处理方法对丁酸产量的影响
Fig. 8 Effects of various pretreatment methods on butyric acid titer

在蓝藻未经预处理时(对照)发酵产丁酸量为 2 521 mg/L,经酸、碱、热和微波 4 种方法预处理后,蓝藻的丁酸产量分别达到 3 621 mg/L、4 390、4 114、3 972 mg/L。该实验结果表明,4 种预处理方法均有助于蓝藻的丁酸发酵;与预处理前相比,在适宜条件下的预处理能使蓝藻发酵的丁酸产量分别提高 44%、74%、63% 和 58%。碱处理的效果尤为明显,可能是碱对细胞磷脂双分子层的溶解优于酸^[21];而微波预处理时由于微波作用会引起挥发性物质损失,降低底物浓度,导致丁酸产量低于碱处理^[22]。

3 结 语

在综合考虑运行费用和厌氧消化效果的前提下,对蓝藻厌氧发酵采取适宜的预处理方法具有积极意义。作者探讨的 4 种预处理方法均能不同程度地提高蓝藻厌氧发酵过程中丁酸和有机酸产量,各预处理方法的适宜条件分别为:酸法 pH 4.0;碱法 pH 10.0; 80 ℃加热 30 min; 中档微波 4 min。在 4 种预处理方法中,蓝藻厌氧发酵的丁酸产量大小顺序为:碱处理> 热处理> 微波处理> 酸处理> 空白样,碱法预处理对应的丁酸和有机酸产量最高,分别在 4 400 mg/L 和 6 000 mg/L 左右。从整个厌氧发酵过程中各项指标分析及工业化应用方面考虑,碱法预处理更符合蓝藻快速减量化、资源化的要求。

参考文献(References):

[1] 李玉祥,刘和,堵国成,等. 碱性条件促进太湖蓝藻厌氧发酵产挥发性脂肪酸[J]. 环境工程学报, 2010, 4(1): 209- 213.
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

- LI Yu-xiang, LIU He, DU Guo-cheng, et al. Enhanced production of volatile fatty acids from waste algae in Taihu Lake under alkaline condition[J]. **Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control**, 2010, 4(1): 209–213. (in Chinese)
- [2] 李克朗, 张玲, 刘洋, 等. 太湖蓝藻培养单细胞蛋白的可行性[J]. 食品与生物技术学报, 2009, 28(4): 569–572.
LI Ke-lang, ZHANG Ling, LIU Yang, et al. Study on the single-cell protein production by Taihu *Cyanobacteria*[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2009, 28(4): 569–572. (in Chinese)
- [3] 王寿权, 严群, 阮文权. 蓝藻猪粪共发酵产沼气及动力学研究[J]. 食品与生物技术学报, 2008, 27(5): 108–112.
WANG Shou-quan, YAN Qun, RUAN Wen-quan. Study on the production and dynamics of methane production by co-fermentation of blue-green algae and pig manure[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2008, 27(5): 108–112. (in Chinese)
- [4] 王寿权, 严群, 缪恒锋, 等. 接种比例对猪粪与蓝藻混合发酵产甲烷的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 172–176.
WANG Shou-quan, YAN Qun, MIAO Heng-feng, et al. Effect of inoculum to substrate ratios on methane production in mixed anaerobic digestion of pig manure and blue-green algae[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2009, 25(5): 172–176. (in Chinese)
- [5] 戚莉莉, 程子波, 邹华, 等. 高效液相色谱法测定太湖水微囊藻毒素[J]. 食品与生物技术学报, 2009, 28(1): 97–101.
QI Li-li, CHEN Zi-bo, ZOU Hua, et al. HPLC determination of microcystin in Taihu Lake[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2009, 28(1): 97–101. (in Chinese)
- [6] 胡萍, 严群, 宋任涛, 等. 蓝藻与污泥混合厌氧发酵产沼气的初步研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(3): 559–564.
HU Ping, YAN Qun, SONG Ren-tao, et al. Biogas production through anaerobic digestion from the mixture of blue algae and sludge[J]. **Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control**, 2009, 3(3): 559–564. (in Chinese)
- [7] 吕娴, 严群, 阮文权. 蓝藻之间发酵产丁酸的条件研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(6): 1358–1362.
LU Xian, YAN Qun, RUAN Wen-quan. Pirectimal fermentation of butyric acid from Taihu Lake blue-green algae[J]. **Techniques and Equipment for Environmental pollution control**, 2011, 5(6): 1358–1362. (in Chinese)
- [8] Gonze E, Pillot S, Valette E, et al. Ultrasonic treatment of an aerobic activated sludge in a batch reactor[J]. **Chemical Engineering and Processing**, 2003, 42: 965–975.
- [9] Valo A, Carrere H, Delgenes J P. Thermal, chemical and thermochemical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion[J]. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 2004, 79: 1197–1203.
- [10] 王永华, 徐鹏, 赵金保. 污泥厌氧消化预处理的研究进展[J]. 环境科学动态, 2004, 4: 9–11.
WANG Yong-hua, XU Peng, ZHAO Jin-bao. Research progress on pretreatment of sludge anaerobic digestion[J]. **Environmental Science Trends**, 2004, 4: 9–11. (in Chinese)
- [11] 高瑞丽, 严群, 邹华, 等. 不同预处理方法对剩余污泥厌氧消化产沼气过程的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2009, 28(1): 107–112.
GAO Rui-li, YAN Qun, ZOU Hua, et al. Effects of different pretreatment of waste activated sludge on methane production via anaerobic digestion[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2009, 28(1): 107–112. (in Chinese)
- [12] Nuri A, Tuba C D, Tugba K, et al. Continuous fermentative hydrogen production from cheese whey wastewater under thermophilic anaerobic conditions[J]. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2009, 34: 7441–7447.
- [13] Akutsua Y, Leeb D Y, Li Y Y, et al. Hydrogen production potentials and fermentative characteristics of various substrates with different heat-pretreated natural microflora[J]. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2009, 34: 5365–5372.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 105–220.
- [15] Braber K. Anaerobic digestion of municipal solid waste: a modern waste disposal option on the verge of breakthrough[J]. **Fuel and Energy Abstracts**, 1996, 37(2): 121.
- [16] 赵丹, 任南琪, 王爱杰. pH、ORP 制约的产酸相发酵类型及顶级群落[J]. 重庆环境科学, 2003, 25(2): 33–38.
ZHAO Dan, REN Nan-qi, WANG Ai-jie. Fermentation type and climax community controlled by pH, ORP[J]. **Chongqing Environmental Sciences**, 2003, 25(2): 33–38. (in Chinese)
- [17] Roe A J, McLaggan D, Davidson I, et al. Perturbation of anion balance during inhibition of growth of *Escherichia coli* by weak acids[J]. **The Journal of Bacteriology**, 1998, 180(4): 767–772.
- [18] 杨翠竹, 李艳, 阮南. 酵母细胞破壁技术研究与应用进展[J]. 食品科技, 2006, 7: 138–142.
YANG Cui-zhu, LI Yan, RUAN Nan. Study and applications of technology about breaking yeast cell wall[J]. **Food and Technology**, 2006, 7: 138–142. (in Chinese)
- [19] 戴前进, 方先金, 邵辉煌. 城市污水处理厂污泥厌氧消化的预处理技术[J]. 中国沼气, 2006, 25(2): 11–14.
DAI Qian-jin, FANG Xian-jin, SHAO Hui-huang. Pretreatment methods of anaerobic digestion of sludge from wastewater treatment plant[J]. **China Biogas**, 2006, 25(2): 11–14. (in Chinese)
- [20] Haug R T, Lebrun T J, Tortorici D. Thermal pretreatment of sludges—a field demonstration[J]. **Water Pollution Control Federation**, 1983, 55: 23–34.
- [21] 梁鹏, 黄霞, 钱易. 污泥减量化技术的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(1): 44–52.
LIANG Peng, HUANG Xia, QIAN Yi. Research progress on sludge reduction technologies[J]. **Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control**, 2003, 4(1): 44–52. (in Chinese)
- [22] 蒲贵兵, 孙可伟. 预处理对泔脚发酵产氢的强化研究[J]. 生物加工过程, 2008, 6(2): 71–76.
PU Gui-bing, SUN Ke-wei. Pretreatment of food residues to enhance fermentative production of biohydrogen[J]. **Chinese Journal of Bioprocess Engineering**, 2008, 6(2): 71–76. (in Chinese)