

不同预处理条件对海水养殖废弃物发酵产氢的影响

赵珺^{1,2} 郭亮^{1,2*} 曹昌丽^{1,2} 王宇宁^{1,2}

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院 山东 青岛 266100)

(2. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室 山东 青岛 266100)

摘要:【目的】利用海水养殖场有机废弃物厌氧发酵产氢,可在减少有机污染物的同时获取氢气。【方法】以海水养殖场有机废弃物为底物,比较嗜热酶(S-TE)、酸、碱、灭菌、微波不同预处理方法对厌氧发酵产氢效果的影响,并对发酵过程中底物性质变化[SCOD、可溶性蛋白质、可溶性糖、pH、VFAs (挥发性脂肪酸)和乙醇]进行探讨。【结果】灭菌预处理产氢效果最好,产氢率为 22.0 mL/g VSS,酸处理的效果最差,产氢率为 7.6 mL/g VSS。可溶性糖大量消耗之后,氢气不再产生。接种 S-TE 预处理污泥的底物能更多地释放营养物质,并在整个发酵过程中保持较为稳定的 pH 值。发酵过程中产生的 VFAs 主要成分是乙酸,在发酵后期出现乙醇。【结论】灭菌预处理是海水养殖场有机废弃物厌氧发酵产氢的最佳预处理方法,可溶性糖为这一过程主要的营养来源。

关键词: 海水养殖废弃物, 预处理, 发酵产氢, 嗜热酶

Effects of different pretreatments on hydrogen production from mariculture organic waste

ZHAO Jun^{1,2} GUO Liang^{1,2*} CAO Chang-Li^{1,2} WANG Yu-Ning^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

(2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(No. 20100132120016); 山东省自然科学基金项目(No. ZR2010EQ028); 青岛市科技发展计划项目[No. 12-1-4-1(13)-jch]; 中央高校基本科研业务费项目(No. 201013022)

*通讯作者: Tel: 86-532-66781020; 邮箱: geletu@ouc.edu.cn

收稿日期: 2011-12-10; 接受日期: 2012-03-20

Abstract: [Objective] The utilization of using mariculture organic waste for anaerobic hydrogen fermentation could reduce organic pollutant and obtaining clean energy hydrogen simultaneously. **[Methods]** We used mariculture organic waste for hydrogen production, and investigated the effect of different pretreated methods of, solubilization by thermophilic enzyme (S-TE), acid, alkaline, sterilized, and microwave on mariculture organic waste hydrogen production. The efficiency of these pretreatments and profiles of SCOD, soluble protein and carbohydrate, pH value, VFAs and ethanol during the fermentation were also monitored. **[Results]** The maximum hydrogen yield was 22.0 mL/g VSS, which was obtained from sterilized pretreatment, whereas the minimum hydrogen yield of 7.6 mL/g VSS was obtained from acid pretreatment. The fermentation stopped after soluble carbohydrate was largely consumed. More nutrients could be released from mariculture organic waste after S-TE pretreatment than other pretreatments, and the pH value was remained stable during the fermentation. The main composition of VFAs was acetic acid, and ethanol was produced at the end of fermentation. **[Conclusion]** Sterilized pretreatment was the optimum pretreatment method of anaerobic hydrogen fermentation from mariculture organic waste, and soluble carbohydrate was the main nutrient resource during the fermentation.

Keywords: Mariculture organic wastes, Pretreatments, Hydrogen fermentation, Solubilization by thermophilic enzyme (S-TE)

人类对于海产品的需求增长导致海水养殖业的迅速发展,随之而来的海洋污染问题也日益突出。海水养殖带来的残余饵料、代谢及排泄物进入或悬浮于水中是导致浅海水水质退化的主要原因之一^[1]。因此,对海水养殖水体沉积物进行处理是减轻海水养殖污染的当务之急,而若能对废弃物进行合理利用,则能变废为宝。

氢气是一种高热值、无污染的理想燃料,同时具有来源广泛的优点,可通过经济而环境友好的生物法制取。目前已有许多研究采用各种有机废水和有机废弃物进行厌氧发酵产氢,在降解有机物污染的同时又获取氢气^[2-4]。氢气是厌氧发酵过程中的一种重要中间产物,通常在产生后很快便被产甲烷菌等耗氢菌消耗^[5]。此外,污泥中多数有机物都存在于微生物细胞中,微生物的细胞壁限制了污泥有机物的溢出,使有机物不能被产氢菌利用。因此发酵产氢中的接种污泥需要经过

一定的预处理,以杀死消耗氢气的产甲烷菌并破解细胞壁、释放出更多的有机物质,从而获得更好的产氢效果^[6]。常用的预处理方法可分为物理处理、化学处理、生物处理三大类。嗜热酶法(Solubilization by thermophilic enzyme, S-TE)是一种新型生物法预处理技术。Miah 等将经过嗜热菌 *Bacillus stearothermophilus* AT1 驯化后的污泥接种到产甲烷污泥中,发现产气量得到较大幅度的提高^[7]。对 *Bacillus thermophilicbacteria* AT07-1 预处理的污泥厌氧产氢效果进行研究,试验结果显示,接种处理后污泥发酵产氢效果良好,高出未接种处理(65 °C 热处理)污泥 26.4%,发酵气体中只含有 H₂ 和 CO₂^[8]。

本研究利用嗜热酶、酸、碱、灭菌、微波 5 种方法处理污水处理厂污泥,再将预处理后的污泥用于海水养殖场有机废弃物进行发酵产氢,比较此 5 种预处理污泥产氢效果的差异,并对发酵

过程中底物性质变化[SCOD、可溶性蛋白质、可溶性糖、pH、挥发性脂肪酸(VFAs)和乙醇]进行测定分析,探讨海水养殖场废弃物产氢的可能性,及寻求最佳的污泥预处理方式。海水养殖废弃物产氢的研究刚刚起步,对其预处理方法的探索具有创新性和现实意义。

1 材料与方法

1.1 原料和主要仪器

污泥取自青岛李村河污水处理厂的二沉池污泥,海水有机废弃物取自胶州湾某海参养殖厂,其理化性质如表 1 所示。使用前将污泥过 2.0 mm 网筛筛去大颗粒物质,保存于 4 °C 冰箱。

主要仪器: SG46-280S 立式压力蒸汽灭菌锅,上海博迅实业有限公司; D7023TP-K7 微波炉,格兰仕微波炉电器有限公司; SHY-2 旋转水浴振荡器,金坛市悦诚仪器厂; PHB-5 型 pH 计,杭州奥立龙仪器有限公司; 722N 可见光分光光度计,上海精科实业有限公司; SP-6890 气相色谱仪,山东鲁南瑞虹化工仪器有限公司; GC-2010 气相色谱仪,岛津(香港)有限公司。

1.2 原料预处理方法

(1) 酸预处理: 用 6 mol/L 的盐酸将污泥的 pH 值调至 2.0±0.1,并在搅拌状态下保持 5 min,在室温下(15 °C–24 °C)贮存 12 h 强化预处理,之后直接加入底物中进行发酵。

(2) 碱预处理: 用 6 mol/L 的氢氧化钠将污泥的 pH 值调至 12.0±0.1,并在搅拌状态下保持 5 min,在室温下(15 °C–24 °C)贮存 12 h 强化预处理,之后直接加入底物中进行发酵。

(3) 灭菌预处理: 将污泥置于灭菌锅中于 1×10⁵ Pa 灭菌处理 30 min,在室温下(15 °C–24 °C)放置 3 h 进行冷却。

(4) 微波预处理: 取 1 L 污泥置于玻璃烧杯中,用微波炉以 720 W 功率持续辐射 5 min。

(5) 嗜热酶(S-TE)预处理: 取 100 mL 污泥置于 250 mL 锥形瓶中,接种嗜热菌(*Bacillus thermophilicbacteria* AT07-1),调节 pH 为 7.0,在 65 °C,搅拌速率 140 r/min,处理 12 h。

为了体现出酸、碱处理的直接影响,本次试验中经酸、碱处理后的污泥未经调节 pH,直接接种到底物中。

		表 1 原材料性质			
Table 1		Characters of raw materials			
	pH	TCOD (mg/L)	SCOD (mg/L)	SS (g/L)	VSS (mg/L)
污泥 Sludge	7.2±0.1	9 242±242	79±5	5.02±0.32	3.92±0.21
有机废 弃物 Organic waste	6.9±0.1	10 493±236	92±6	1.74±0.13	1.22±0.09

1.3 厌氧发酵产氢

将预处理污泥与海水养殖场有机废弃物以 1:9 比例、总量 100 mL 加入 250 mL 锥形瓶中。用氮气吹脱瓶中的氧气,胶塞密封,在设置为 35 °C、转速 120–140 r/min 的往复水浴恒温振荡器上连续运行。实验中,各组实验均设置 5 个相同条件的反应瓶,同时开始运行,产气后一定时间间隔按编号依次取出一个瓶,记录产气量,测定气体成分和反应瓶中污泥底物的各项指标(SCOD、可溶性蛋白质、可溶性糖、VFAs 和乙醇)。为保证数据可靠,实验设计 3 组平行组,取平均值进行分析。

1.4 分析方法

发酵过程中产生的气体体积采用排饱和食盐水电法测定。用 1 mL 气密性注射器抽取排出的气体,采用气相色谱法分析(SP-6890,山东鲁南瑞虹),TCD 检测器,2 m 不锈钢填充柱,载体为 Porapak-Q,氮气做载气,流量为 1.0 mL/min,进样口、色谱柱和热导检测器(TCD)的温度分别为

100 °C、50 °C、100 °C。pH 值用 pH 计测定。TCOD、SCOD 采用微波消解法测定,可溶性蛋白质采用福林酚试剂法测定,可溶性糖采用硫酸-苯酚法测定^[9],VFAs 和乙醇使用气相色谱法分析(GC-2010, 岛津), 配备 30 m×25 mm×25 μm 毛细管柱(DB-FFAP, 安捷伦), FID 检测器, 以氮气为载气, 流量为 2.6 mL/min, 进样口、检测器、炉温温度分别为 250 °C、300 °C、70 °C。采用标准方法测定污泥的总固体量(TSS)和挥发性固体量(VSS)^[10]。

1.5 数据处理

产氢率根据以下公式计算:

$$\text{产氢率}(\text{mL/g VSS})=\text{H}_2(\text{mL})/\text{VSS}(\text{g}) \tag{1}$$

2 结果与分析

2.1 预处理对发酵产氢率的影响

表 2 表示接种不同预处理污泥所产生的发酵气体中,含氢量最高的是灭菌批次,含氢量达到 83.5%, 其余 4 种发酵气体的含氢量为 50.8%–72.3%, 所有气体中均未检测出甲烷。这一结果表明各种预处理均有效抑制了厌氧消化过程中耗氢菌的活性,使底物的厌氧消化过程停止在产氢产乙酸阶段,产甲烷菌在恢复正常条件 26.0 h 后仍未恢复活性。发酵累积产氢率随时间

的变化关系如图 1 所示,产氢效果最好的是灭菌批次,最大产氢率为 22.04 mL/g VSS, 其余的嗜热酶、酸、碱、微波预处理批次最大产氢率分别为 14.6、7.6、9.2、15.9 mL/g VSS。不同预处理污泥发酵气体含氢量和产氢率的差异,表明污泥预处理方式对产氢具有显著影响,灭菌预处理在此次研究中的效果最好。Wang 等比较了灭菌、酸等 5 种预处理污泥发酵产氢,Guo 等比较了灭菌、微波等 3 种预处理污泥发酵产氢,在二者的研究中灭菌污泥也都具有最高的产氢率^[11–12]。各组污泥产氢延迟时间都比较短,在 3.0 h 之内就有较明显的氢气积累,说明经预处理的污泥较适合产氢菌的生长繁殖。此次研究中嗜热酶预处理的产氢率为 14.6 mL/g VSS, 略低于朱小峰等利用嗜热酶预处理剩余污泥产氢的结果 16.3 mL/g VSS, 产生气体的平均含氢量为 63.7%, 明显高于朱小峰等 49.8%的含氢量,可能因为两次研究使用了不同的底物^[13]。

2.2 底物变化与产氢率的关系

厌氧发酵产氢时,有机物释放和消耗过程同步进行。一方面蛋白质、糖等营养物质被产氢菌利用合成自身物质或进行生长代谢,从而使 SCOD 减少;另一方面底物中仍存在一定的固体物质,产氢菌可以分泌水解酶水解固体有机物,

表 2 不同预处理方法生物气的成分和产气量比较			
Table 2 Comparison of biogas content and hydrogen production of among different pretreatments			
预处理方法 Pretreated method	产气量 Biogas yield (mL)	含氢量 Hydrogen content (%)	CO ₂ 含量 CO ₂ content (%)
嗜热酶 S-TE	9.4	63.7	36.3
酸 Acid	5.2	60.4	39.6
碱 Alkaline	7.5	50.8	49.2
灭菌 Sterilized	11.1	83.5	16.5
微波 Microwave	9.0	72.3	27.7

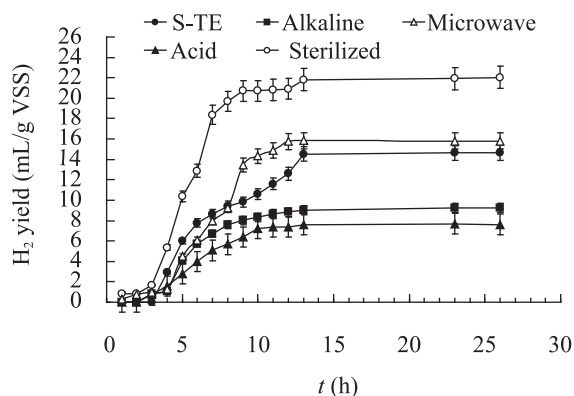


图1 不同预处理污泥发酵氢气产量变化

Fig. 1 Variations of different pretreatments on hydrogen yield during anaerobic fermentations

发酵过程中还有 VFAs 的生成,从而使 SCOD 增加。在这两方面因素的共同作用下,SCOD 在发酵过程中呈现出波动性变化^[13]。各组底物中的 SCOD 在产氢开始前均有所升高,表明此时水解过程占主导,底物中可溶性有机物含量提高,为稍后的产氢菌代谢产氢提供丰富的营养物质准备。接种了嗜热酶、酸、碱、灭菌、微波预处理污泥后的底物初始 SCOD 分别为 1 990、1 654、1 570、1 290、1 458 mg/L,产气前 SCOD 增幅分别为 8.5%、12.8%、13.8%、18.1%和 12.8%。图 2 与图 1 比较可知,产氢率较高的预处理污泥,如经灭菌和微波预处理污泥,在产氢初始阶段对 SCOD 的释放也较明显,说明这些污泥中的产氢菌活性较高,因此能分泌更多的水解酶和产生更多的氢气。值得注意的是,接种了经过嗜热酶预处理后的污泥释放 SCOD 的量较其他方法有显著提高,比灭菌处理后污泥的 SCOD 高 54.3%。这与 Yang 等的发现类似,他们认为嗜热酶预处理对于水解有促进作用,因为嗜热酶预处理后高效产氢菌可以更为有效地水解大分子,所以 SCOD 在发酵过程中上升幅度更大^[14]。产氢菌对营养物质的利用使 SCOD 在产氢过程中减小,但是产氢结束后底物 SCOD 含量仍然很高,具有较高的可生化性,可进行后续利用。

可溶性蛋白质浓度变化如图 3 所示,在产氢延迟阶段,底物在水解酶的作用下不断释放出可溶性蛋白质,蛋白质浓度提高,之后产氢菌利用蛋白质进行代谢并产氢,蛋白质浓度下降。碱、微波、灭菌预处理批次的底物中蛋白质浓度的变化曲线较为相近,而与嗜热酶和酸处理批次中蛋白质浓度变化有较明显不同。将图 1 与图 3 比较,可知接种嗜热酶预处理污泥的底物可溶性蛋白质浓度在第 2.5 h 即达到最大值 790.2 mg/L,远高于同时的碱、灭菌、微波处理污泥,且在产氢开始后立即下降,而其他批次的蛋白质变化落后于氢气的积累。酸预处理批次释放产生的蛋白质浓度最高,达到 1 713.3 mg/L,但是其产氢率却是最低的,且在不产氢的 10.0–23.0 h 时段蛋白质浓度有显著下降。这可能因为经过酸预处理后的污

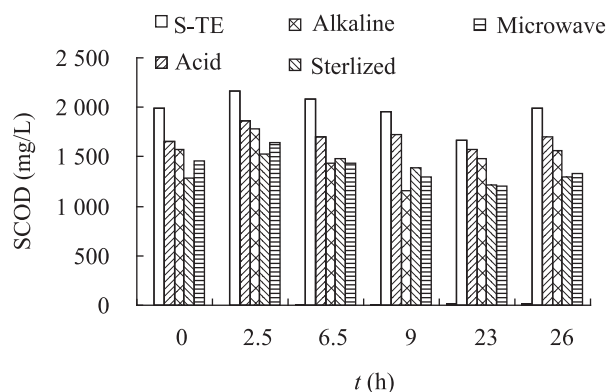


图2 发酵过程中 SCOD 浓度变化

Fig. 2 Variations of SCOD during fermentation

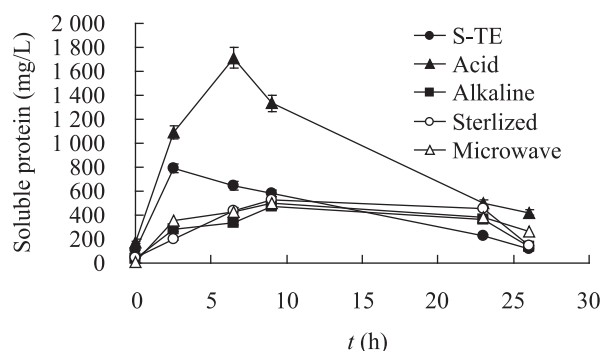


图3 发酵过程中可溶性蛋白质浓度变化

Fig. 3 Variations of soluble protein during fermentation

泥中还存在其他非产氢菌，它们的活动抑制氢气产生，并在产氢停止的阶段继续活动，消耗蛋白质。

可溶性糖浓度变化如图 4 所示，发酵后所有组中的可溶性糖均在产氢前增大到最高值。研究表明，糖类是污泥厌氧发酵中产氢菌主要利用的营养物质^[15-16]。在本研究中，使用海水养殖场有机废弃物为底物，S-TE 批次中糖的浓度在 2.5 h 为 610.0 mg/L，与微波、灭菌预处理批次同一时间的糖浓度相近(分别为 621.6、611.1 mg/L)，酸预处理的糖浓度也高达 520.0 mg/L。只有碱预处理释放的可溶性糖明显较低，为 228.9 mg/L。此后可溶性糖在产氢发酵过程中被消耗，最终各组底物中可溶性糖浓度为 19.9–54.4 mg/L。微波、灭菌、碱预处理中，糖的消耗主要出现在 2.5–6.5h。在嗜热酶和酸预处理批次中，糖的消耗稍晚，主要发生在 6.5–9.0 h。除了碱预处理组，其余预处理的可溶性糖浓度在产氢发酵过程中均下降 90%以上，说明产氢菌对总糖的利用率很高。由于可溶性糖消耗殆尽的同时产氢也停止，说明底物中缺少营养物质是产氢菌停止发酵产氢的原因。不同预处理方法会筛选出不同的优势菌群，导致底物中糖和蛋白质被利用的情况不同^[17]。

2.3 产氢代谢产物变化和产氢率的关系

在可溶性糖和可溶性蛋白质降解过程中会产生小分子物质，例如 H⁺、CO₂、VFAs、氨基酸、NH₄⁺-N 等^[18]。VFAs、氨基酸和 NH₄⁺-N 的产生

造成 pH 发生变化^[19]。发酵过程中各组的 pH 变化情况如表 3 所示。其他组底物中 pH 值在发酵后 2.5 h 即达到峰值约为 8，酸处理的污泥在 6.5 h 后才增长至峰值 6.8，这也许是酸处理批次比其他预处理批次产生氢气少的原因。一般情况下，发酵产氢的最适 pH 值范围是 5.0–6.5，当环境中 pH 值偏离最适 pH 值达到 0.5 个单位时，产氢率就会减少 20%^[20-22]。在此次研究中，当 pH 范围在 5.0–6.0 时产氢效率最高，pH 低于 5.0 时(约 9.0 h 时)产氢停止。嗜热酶批次的 pH 值在发酵过程中明显比其他组高，其最低值也达到 5.7，这可能是因为虽然嗜热酶批次释放出的蛋白质质量少于酸处理批次，但是嗜热酶预处理后，能分泌水解酶的细菌活性仍然很高，体系的缓冲能力较强，使 pH 保持在较高的水平。酸处理却抑制了水解酶分泌细菌的活性，使 pH 不能恢复。

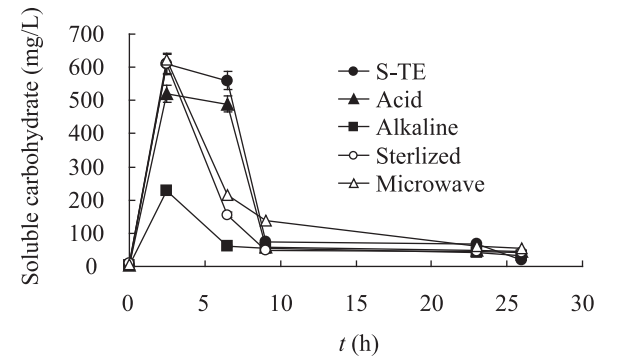


图 4 发酵过程中可溶性糖浓度变化
Fig. 4 Variations of soluble carbohydrate during the fermentation

表 3 发酵过程中 pH 变化 Table 3 Variations of pH during fermentation					
时间 Time (h)	嗜热酶 S-TE	酸 Acid	碱 Alkaline	灭菌 Sterilized	微波 Microwave
0	7.9	5.5	8.7	7.0	7.1
2.5	8.0	6.5	8.2	7.6	7.8
6.5	7.0	6.8	5.0	5.0	4.6
9.0	6.1	4.7	4.6	5.0	4.6
23.0	5.7	3.9	5.2	5.3	4.5

图 5 表示在厌氧发酵过程中 VFAs 和乙醇的变化。VFAs 和乙醇的总量在发酵过程中主要呈现增加的趋势, 发酵开始时嗜热酶、酸、碱、灭菌、微波预处理的液相产物总量分别为 653.8、1 225.3、385.7、785.2、544.5 mg/L, 当反应结束时升为 2 723.7、2 271.2、2 054.6、1 479.4、1 732.7 mg/L。所有批次发酵的主要产物都为乙酸, 其次是乙醇, 呈现乙醇型发酵的特征, 且乙醇主要产生于发酵阶段的后期。在微波预处理批次的整个发酵过程中都能观察到乙醇的存在, 其他批次则在 9.0 h 后出现乙酸浓度下降、乙醇浓度上升的情况, 表示在发酵产氢过程中出现溶剂化现象。Ginkel 和 Logan 报道了发酵 10.0 h 后出现溶剂化的情况^[23]。Mohan 等也观察到相似的现象^[24]。由于可溶性糖是此次研究中主要的发酵产物, 根据方程 (2)–(5), 可知当糖发酵生成乙醇的时候, 对产氢量没有影响。而当发酵产物是乙酸和丁酸时, 会

同时生成氢气, 若发酵产物为丙酸则会使产氢量减少。各批次均在预处理过程中生成少量丙酸, 在发酵过程中丙酸逐渐转化为其他产物。此次研究中产氢情况较好的灭菌处理批次和嗜热酶处理批次产生乙醇量较小, 而产氢效果较差的酸、碱处理批次在反应中后期的乙醇含量较大, 乙醇的大量产生可能减少了这两个批次的氢气产量。相比较而言, 嗜热酶批次产生乙醇的时间较晚, 比例也较小, 说明该种预处理方法相对不易发生溶剂化。丁酸在嗜热酶预处理批次的发酵过程后期产生, 表明此时底物中可能发生了优势菌群的转化和代谢途径的改变, 有向丁酸型发酵转变的趋势。

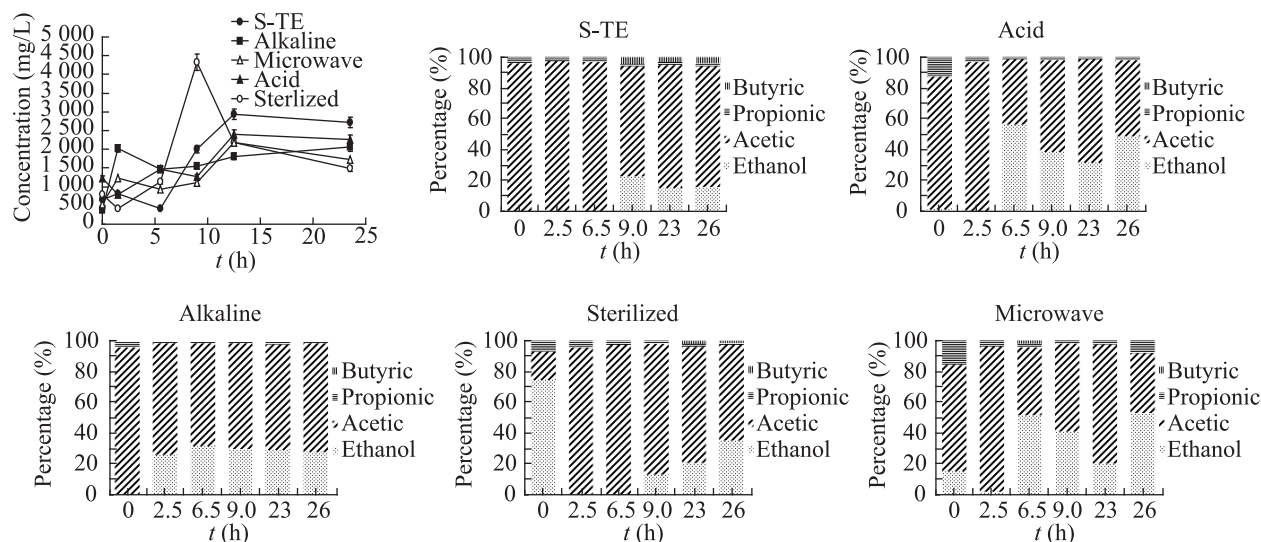
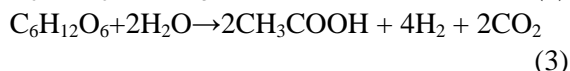


图 5 VFAs 和乙醇浓度和百分比

Fig. 5 The concentration and percentage of VFAs and ethanol

3 结论

(1) 利用海水养殖场废弃物作为底物, 以不同方法预处理过的污水处理厂污泥为接种的厌

氧发酵产氢结果显示, 产氢效果最好的是灭菌预处理, 其产氢率为 22.0 mL/g VSS, 氢气含量高达 83.4%。产氢率从高到低依次为微波处理、嗜热酶处理、碱处理、酸处理批次。各发酵气体均只

含 H_2 和 CO_2 , 不含 CH_4 。

(2) 发酵产氢过程中, 底物 SCOD 变化不大, 可溶性蛋白质、可溶性糖、pH 都呈现先增后减的趋势, 但变化情况不尽相同, 可知不同预处理方法对微生物的选择性不同, 并影响产氢菌在发酵过程中对营养物质的利用。可溶性糖为主要的营养来源, 比蛋白质更易被产氢菌利用。可溶性糖大量消耗后产氢停止。

(3) 发酵过程产生的 VFAs 浓度最高的是乙酸, 乙醇含量也很高, 发酵类型为乙醇型发酵。乙醇在发酵后期出现, 表示发酵出现溶剂化趋势。

(4) 接种嗜热酶处理污泥的废弃物产氢率为 14.6 mL/g VSS , 氢气含量为 63.7%。经嗜热酶预处理的污泥能更多地释放营养物质, 并在发酵全过程中保持较为稳定的 pH 值。

参 考 文 献

- [1] 胡文佳, 杨圣云, 朱小明. 海水养殖对海域生态系统的影响及其生物修复[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2007, 46(S1): 197-202.
- [2] 宋庆彬, 李爱民, 鞠茂伟, 等. 厨余和污泥不同混合比例碱处理产氢特性研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(3): 396-400.
- [3] Nguyen TAD, Kim KR, Nguyen MT, et al. Enhancement of fermentative hydrogen production from green algal biomass of *Thermotoga neapolitana* by various pretreatment methods[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(23): 13035-13040.
- [4] Chen SD, Lee KS, Lo YC, et al. Batch and continuous biohydrogen production from starch hydrolysate by *Clostridium* species[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(7): 1803-1812.
- [5] Gujer W, Zehnder AJB. Conversion processes in anaerobic digestion[J]. Water Science and Technology, 1983, 15(8/9): 127-167.
- [6] Pavlostathis SG, Gossett JM. A kinetic model for anaerobic digestion of biological sludge[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1986, 28(10): 1519-1530.
- [7] Miah MS, Tada C, Yang YN, et al. Aerobic thermophilic bacteria enhance biogas production[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2005, 7(1): 48-54.
- [8] 汤迎, 李小明, 杨永林, 等. 嗜热菌株 AT07-1 的分离鉴定及其在污泥溶解预处理厌氧发酵产氢中的应用[J]. 环境科学学报, 2009, 29(11): 2300-2305.
- [9] 任南琪, 王爱杰, 马放. 产酸发酵微生物生理生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 301-306.
- [10] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 354-359.
- [11] Guo L, Li XM, Xie B, et al. Impacts of sterilization, microwave and ultrasonication pretreatment on hydrogen producing using waste sludge[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(9): 3651-3658.
- [12] Wang CC, Chang CW, Chu CP, et al. Producing hydrogen from wastewater sludge by *Clostridium bifermentans*[J]. Journal of Biotechnology, 2003, 102(1): 83-92.
- [13] 朱小峰, 郭亮, 李小明, 等. S-TE 预处理污泥厌氧发酵产氢[J]. 太阳能学报, 2010, 31(10): 1257-1263.
- [14] 杨永林, 李小明, 郭亮, 等. 接种嗜热菌对剩余污泥的溶解效果研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(17): 5-9.
- [15] Xiao BY, Liu JX. Biological hydrogen production from sterilized sewage sludge by anaerobic self-fermentation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(1): 163-167.
- [16] Massanet-Nicolau J, Dinsdale R, Guwy A. Hydrogen production from sewage sludge using mixed microflora inoculum: effect of pH and enzymatic pretreatment[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(14): 6325-6331.
- [17] 谢波, 郭亮, 李小明, 等. *Pseudomonas* sp. GL1 利用不同预处理污泥产氢及其底物变化研究[J]. 环

境科学, 2008, 29(4): 996–1001.

- [18] Das D, Veziroğlu TN. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2001, 26(1): 13–28.
- [19] Xiao BY, Han YP, Liu JX. Evaluation of biohydrogen production from glucose and protein at neutral initial pH[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(12): 6152–6160.
- [20] Lin CY, Cheng CH. Fermentative hydrogen production from xylose using anaerobic mixed microflora[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(7): 832–840.
- [21] Lin CY, Hung CH, Chen CH, et al. Effects of initial cultivation pH on fermentative hydrogen production from xylose using natural mixed cultures[J]. Process Biochemistry, 2006, 41(6): 1383–1390.
- [22] Mu Y, Wang G, Yu HQ. Response surface methodological analysis on biohydrogen production by enriched anaerobic cultures[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, 38(7): 905–913.
- [23] van Ginkel S, Logan BE. Inhibition of biohydrogen production by undissociated acetic and butyric acids[J]. Environment Science and Technology, 2005, 39(23): 9351–9356.
- [24] Mohan SV, Bhaskar YV, Krishna PM, et al. Biohydrogen production from chemical wastewater as substrate by selectively enriched anaerobic mixed consortia: influence of fermentation pH and substrate composition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(13): 2286–2295.

征订启事

欢迎订阅《微生物学通报》

《微生物学通报》创刊于 1974 年, 是中国科学院微生物研究所和中国微生物学会主办, 国内外公开发行人, 以微生物学应用基础研究及技术创新与应用为主的综合性学术期刊。刊登内容包括: 基础微生物学研究, 农业微生物学研究, 工业微生物学研究, 医学微生物学研究, 食品微生物学研究, 环境微生物学研究, 微生物功能基因组研究, 微生物蛋白组学研究, 微生物模式菌株研究, 微生物工程与药物研究, 微生物技术成果产业化及微生物教学研究改革等。

本刊为中国生物科学类核心期刊。曾获国家级优秀科技期刊三等奖, 中国科学院优秀科技期刊三等奖, 北京优秀科技期刊奖, 被选入新闻出版总署设立的“中国期刊方阵”并被列为“双效”期刊。

自 2008 年本刊已经全新改版, 由双月刊改为月刊, 发表周期缩短, 内容更加丰富详实。欢迎广大读者到邮局订阅或直接与本刊编辑部联系购买, 2012 年每册定价 58 元, 全年 696 元, 我们将免邮费寄刊。

另, 本编辑部现存有少量过刊, 如有需要者可直接与编辑部联系。(请事先与编辑部联系, 获悉每册售价。敬请在汇款单上注明所购刊物的年代、卷、期和数量)

邮购地址: (100101)北京朝阳区北辰西路 1 号院 3 号中国科学院微生物研究所 《微生物学通报》编辑部

Tel: 010-64807511; E-mail: bjb@im.ac.cn, tongbao@im.ac.cn

网址: <http://journals.im.ac.cn/WSWXTBCN>

国内邮发代号: 2-817; 国外发行代号: BM413