

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.06.001

低温强化有氧条件下二氧化碳同型产乙酸研究

王昱伟, 王伟, 李永存, 何江浩

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:同型产乙酸是 CO₂ 生物利用的重要途径,但该过程会受到 O₂ 组分的干扰。文章探讨不同温度对无氧条件和有氧条件下 CO₂ 同型产乙酸效率、污泥产甲烷和产乙酸活性、电子传递活性和辅酶 F₄₂₀ 活性及其微生物群落结构的影响。结果表明:在 35 °C 有氧条件下未产生乙酸,但在 15 °C 有氧条件下,同型产乙酸的累积乙酸产量为(174.8±0.4) mg/g;相反,在 15 °C 有氧条件下累积甲烷产量下降了 82.0%,由 35 °C 的(198.1±9.7) mL/g 下降为 15 °C 的(35.6±9.3) mL/g。低温条件不仅能抑制电子传递活性和辅酶 F₄₂₀ 的活性,而且可以富集同型产乙酸菌 *Acetobacterium*。因此,在有氧条件下二氧化碳同型产乙酸过程中,控制低温不仅有助于抑制甲烷生成,而且能够提高乙酸累积产量。

关键词:同型产乙酸;二氧化碳;乙酸;甲烷;嗜氢产甲烷菌

中图分类号:X701

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)06-0721-07

Homoacetogenesis enhanced by low-temperature under aerobic conditions

WANG Yuwei, WANG Wei, LI Yongcun, HE Jianghao

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Homoacetogenesis is an important pathway for CO₂ bio-utilization, but the process is interfered by O₂. This study investigated the effects of different temperatures on the efficiency of homoacetogenesis, methanogenic and acetic acid-producing activities, INT-ETS and coenzyme F₄₂₀ activities, and the microbiological community structure under anaerobic and aerobic conditions. The results showed that no HAc was produced under aerobic conditions at 35 °C, but at 15 °C, the cumulative HAc production of homoacetogenesis was (174.8±0.4) mg/g under aerobic conditions; on the contrary, the cumulative CH₄ production decreased by 82.0%, from (198.1±9.7) mL/g at 35 °C to (35.6±9.3) mL/g at 15 °C. Low-temperature conditions not only inhibited the activities of INT-ETS and coenzyme F₄₂₀, but also enriched the typical homoacetogens *Acetobacterium*. Therefore, the low-temperature control during homoacetogenesis under aerobic conditions not only helped to inhibit the methanogenesis, but also increased the cumulative yield of HAc.

Key words: homoacetogenesis; carbon dioxide; acetic acid; methane; hydrogenotrophic methanogen

0 引言

全球变暖的大环境下,CO₂ 资源化利用是实现“双碳”目标的重要途径之一。含有 CO₂ 的工业废气与固液有机废物类似,具有能源和经济价

值,是生产增值化学品和材料的可行资源^[1]。在这些方法中,通过微生物转化进行的气体发酵在 CO₂ 利用方面发挥了至关重要的作用^[2]。同型产乙酸菌(HAs)是一类自养微生物,能够通过乙酰辅酶 A 途径将 CO₂ 还原成乙酸(HAc)^[3-4]。

收稿日期:2024-04-08;修回日期:2024-05-14

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFC0408502);国家自然科学基金区域创新发展联合基金资助项目(U19A20108)

作者简介:王昱伟(1999—),女,河北唐山人,合肥工业大学硕士生;

王伟(1983—),男,安徽霍山人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:wang-wei@hfut.edu.cn.

HAc 具有较高的附加值,能作为化石燃料的替代品,也可用作合成生物柴油和多羟基烷酸酯等一系列具有重要商业价值的化学物质,或用于微生物燃料电池发电^[5-7]。在同型产乙酸过程中,需要将 CO₂ 捕获到气体发酵生物系统中^[8],而 O₂ 是 CO₂ 捕集过程中不可避免的气体成分。例如,化石燃料的富氧燃烧的废气中含有 5%~11%的 O₂^[9]。文献^[10]发现,O₂ 占锅炉输出烟气体积的 10%左右。为利用微生物将工业废气中的 CO₂ 转化为增值产品,必须首先去除 O₂,这一过程成本高昂^[11]。过去气体发酵的研究多集中于厌氧环境,有氧条件对工业废气中 CO₂ 的生物利用研究较少。

在同型产乙酸过程中,H₂ 被用作电子供体,嗜氢产甲烷菌(HMs)会与 HAs 竞争 CO₂ 和 H₂,生成甲烷^[12]。对于产甲烷的抑制一般采用产甲烷抑制剂 2-溴乙基磺酸钠(SBES),但是 SBES 价格昂贵,难以在大规模生产中应用^[13]。以文献^[14]添加 3 g/L 的 SBES 使累积产甲烷量降低 72.8%为例,每吨水中需要添加 3 kg SBES 抑制产甲烷,约需要 2 550 美元的成本。为了促进 HAc 的生成,有必要找到一种更为经济的方法抑制甲烷的产生。温度是污泥气体发酵的关键变量之一,对厌氧产甲烷菌有重要影响^[15]。传质限制将导致 HAs 和 HMs 竞争底物,在大多数情况下 HMs 受益。在低温条件下,HAs 拥有更快的 H₂ 固定能力,文献^[16]发现在 25 °C 条件下,HAs 的富集和 HMs 的消除是可能的,在 4 个批次的富集期结束时,产乙酸的选择性为 100%;文献^[17]发现在 17 °C 的微生物群落富集中,HAs 优于 HMs,而在 30 °C 时,HMs 优于 HAs。但针对有氧条件下,低温控制能否促进 CO₂ 发酵同型产乙酸的相关报道并不多。

本文以提高 HAc 产量为目标,通过分析产物种类及质量浓度、微生物代谢活性和微生物群落结构,系统探究体积分数 10% O₂ 下,不同温度对 CO₂ 气体发酵产物的影响。

1 材料与方 法

1.1 接种污泥

本文实验所用接种污泥取自安徽朱砖井污水处理厂,接种污泥悬浮固体(mixed liquid suspended solids, MLSS)质量浓度为(20.1±0.3) g/L,挥发性悬浮固体(mixed liquid volatile suspended solids, MLVSS)质量浓度与 MLSS 质量浓度比值

为 0.41。将接种污泥置于血清瓶中,用 N₂ 吹扫 60 s 以排除空气,然后迅速用橡胶塞密封,并置于摇床中遮光培养(37 °C、140 r/min)待用。

1.2 实验设计

通过预实验确定实验温度和实验周期。预实验在 300 mL 血清瓶中进行,每个血清瓶中装有 50 mL 污泥和 50 mL 培养液。采用 5 mol/L HCl 溶液和 5 mol/L NaOH 溶液调整初始 pH 值为 7.0。采用 N₂ 吹扫血清瓶的顶空 60 s 以排出空气,然后引入外源气体(H₂ 120 mL、CO₂ 60 mL、N₂ 20 mL)。设置 35 °C 组、30 °C 组、25 °C 组、20 °C 组、15 °C 组、10 °C 组 6 个实验组,每个实验组设置 3 个平行样,每隔 12 h 测量顶空气体组分。最终根据反应情况和顶空气体消耗时间选择 35、25、15 °C 作为实验梯度温度,每个反应周期为 4 d。

正式实验在 300 mL 血清瓶中进行,每个血清瓶中装有 50 mL 污泥和 50 mL 培养液。培养基的营养元素与文献^[18]一致。采用 5 mol/L HCl 溶液和 5 mol/L NaOH 溶液调整初始 pH 值为 7.0。采用 N₂ 吹扫血清瓶的顶空 60 s 以排出空气,然后引入外源气体。控制组(H₂ 120 mL、CO₂ 60 mL、N₂ 20 mL)均保持无氧状态,O₂ 组(H₂ 120 mL、CO₂ 60 mL、O₂ 20 mL)初始氧分压为 10%。共设置 35 °C 控制组、35 °C O₂ 组、25 °C 控制组、25 °C O₂ 组、15 °C 控制组、15 °C O₂ 组 6 个实验组,每个实验组设置 3 个平行样。每个批次实验重复 6 个周期,每个周期持续 4 d。

1.3 微生物活性实验

通过序批实验测定污泥的嗜乙酸产甲烷菌(AMs)、HMs 和 HAs 活性,将 50 mL 污泥和 50 mL 培养液放入 300 mL 血清瓶中。所有血清瓶采用 N₂ 冲洗 60 s 以排除空气,并置于 37 °C、140 r/min 的摇床中遮光培养。每个实验组均设置 3 个平行样。污泥的 AMs 活性采用乙酸钠为基质,污泥质量与基质中化学需氧量比例保持为 1:1。每 4 h 测定一次血清瓶顶空气体组分。污泥的 HMs 和 HAs 活性采用 H₂ (120 mL)和 CO₂ (60 mL)为底物,其余实验步骤同上。每 4 h 测定一次血清瓶顶空气体组分,测定甲烷产量,评估 HMs 的产甲烷活性。每 8 h 测定上清液乙酸产量,评估 HAs 的产乙酸活性。

1.4 其他指标检测方法

pH 值由 pHS-3C pH 计(中国雷磁科学仪器有限公司)测定,溶解氧(dissolved oxygen, DO)

由 JPB-607A 便携式溶解氧测定仪(中国雷磁科学仪器有限公司)测定;气体成分由 SP-6890 气相色谱仪(中国山东瑞宏有限公司)测定;HAc 的质量浓度由 7890A 气相色谱仪(美国安捷伦公司)测定;污泥电子传递活性和辅酶 F₄₂₀ 活性按照文献[19]的方法测定;微生物群落由上海美吉生物公司检测,细菌引物为 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')。

所有数据均使用 Microsoft Excel 2019 软件进行分析,图使用 Origin 2018 和 Microsoft Visio 2021 绘制。

2 结果与讨论

2.1 低温环境对同型产乙酸代谢产物的影响

不同温度下,同型产乙酸过程中的每周期乙酸产量和每周期甲烷产量如图 1 所示。

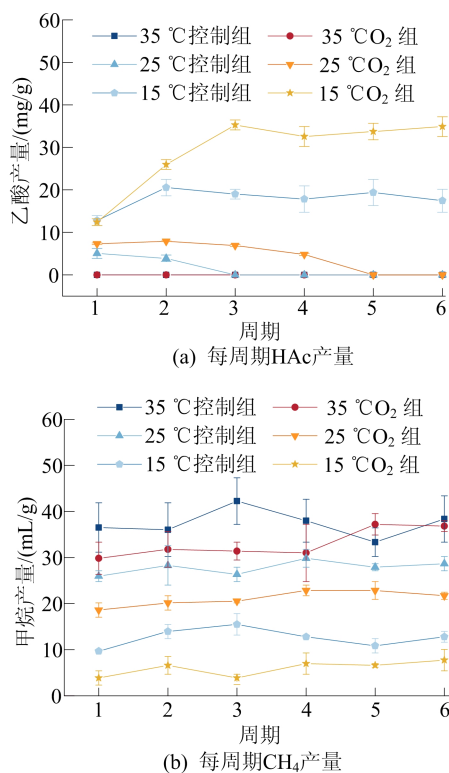


图1 不同温度对同型产乙酸过程代谢产物的影响

在 35 °C 条件下,无论是否存在 O₂,都不会产生 HAc,而甲烷产量为 6 组最高。控制组和 O₂ 组的平均甲烷产量分别为 (37.4 ± 2.7) mL/g 和 (33.0 ± 2.9) mL/g。与生成 HAc (4H₂ + 2CO₂ → CH₃COOH + 2H₂O, ΔG^o = -94.9 kJ/mol) 相比,CO₂ 转化为 CH₄ 的吉布斯自由能较低 (4H₂ + CO₂ → CH₄ + 2H₂O, ΔG^o = -130.7 kJ/mol),在

未进行低温控制时,CO₂ 向 CH₄ 的转化更占有优势^[12]。在 25 °C 有氧条件下,乙酸产量从最开始的 (7.3 ± 0.2) mg/g 到第 5 个周期降为 0。15 °C 有氧条件下的乙酸产量最高、甲烷产量最低。在 15 °C 有氧条件下,乙酸产量从第 1 个周期的 (12.4 ± 0.8) mg/g 上升至第 6 个周期的 (34.9 ± 2.3) mg/g;而第 1 个周期的甲烷产量为 (3.9 ± 1.6) mL/g,第 6 个周期略微上升为 (7.8 ± 2.3) mL/g。

每 2 h 检测一次 DO 质量浓度,得到 1 个周期内的 DO 质量浓度变化情况如图 2 所示。从图 2 可以看出,35、25、15 °C 不同 O₂ 组的进水 DO 质量浓度分别为 (3.00 ± 0.10) mg/L、(3.25 ± 0.05) mg/L、(3.05 ± 0.15) mg/L,3 组 DO 分别在 6、8、12 h 时均降为 0,DO 被全部消耗。当环境中含有微量 O₂ 时,厌氧消化中剩余的 DO 会迅速耗尽,从而转回厌氧状态^[20]。相比于 35 °C,15 °C 下微生物活性降低,微生物消耗 O₂ 速度变慢,延缓了达到厌氧环境的时间^[21]。因此低温有氧条件下,DO 在水中停留时间延长。

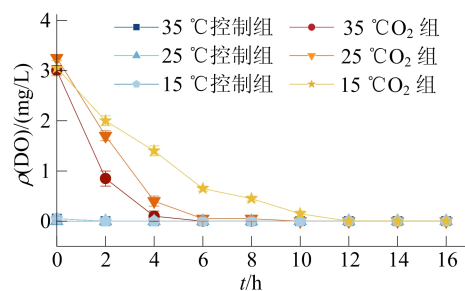


图2 DO 质量浓度随时间的变化

不同温度下,同型产乙酸过程中的累积乙酸产量和累积甲烷产量如图 3 所示。

在 15 °C 时,HAc 得以富集,但是在 35 °C 下,H₂/CO₂ 主要由 HMs 消耗,生成 CH₄。甲烷和乙酸产量与 HMs 和 HAs 竞争 H₂ 作为其生长的电子供体有关^[2],在有利条件下,气体发酵的代谢倾向于产生甲烷^[2],但是在低温环境能够转化气体发酵途径由产甲烷变为产乙酸。

最终,6 组的累积甲烷产量分别为 (224.5 ± 2.0) mL/g (35 °C 控制组)、(198.1 ± 9.7) mL/g (35 °C CO₂ 组)、(167.0 ± 4.3) mL/g (25 °C 控制组)、(126.7 ± 1.9) mL/g (25 °C CO₂ 组)、(75.6 ± 2.0) mL/g (15 °C 控制组)、(35.6 ± 9.3) mL/g (15 °C CO₂ 组)。在 3 种不同温度下,O₂ 组的累积甲烷产量相比 35、25、15 °C 控制组分别降低了

11.8%、24.1%、52.9%。在 15 °C 条件下, O₂ 组的累积乙酸产量达到(174.8±0.4) mg/g, 比控制组提高了 38.8%。文献[22]发现 O₂ 能显著抑制产甲烷古菌的活性, 并导致 CH₄ 产量下降。在含氧废气的低温发酵中, 由于低温导致微生物消耗 DO 速度变慢, 存在的 O₂ 抑制了甲烷生成, 但是未对同型产乙酸活动造成负面影响。

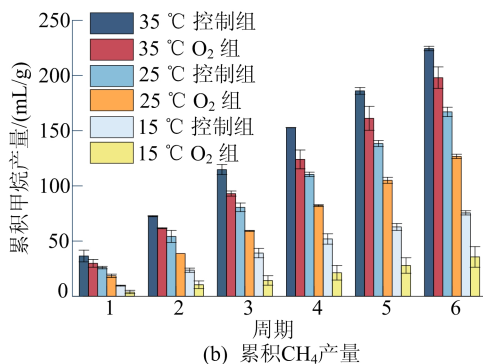
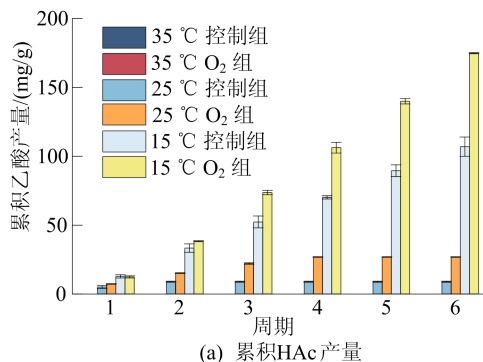


图 3 不同温度对同型产乙酸过程代谢产物的影响

2.2 污泥产甲烷和产乙酸活性分析

不同微生物的活性分析如图 4 所示。

尽管在以 H₂/CO₂ 为底物的情况下, HAs+AMs 产生 CH₄ 的途径并非理想途径, 但在 AMs 活性较强的反应器中经常出现^[12,23]。35 °C 控制组的 AMs 活性为(0.22±0.01) mL/(h·g), O₂ 组为(0.15±0.03) mL/(h·g); 在 25 °C 下, AMs 活性分别为(0.12±0.03) mL/(h·g)和(0.10±0.02) mL/(h·g)。15 °C 时完全抑制了 AMs 活性, 这表明在 15 °C 时, 生成的 HAc 不会被 AMs 消耗。35、25 °C O₂ 组 HMs 活性分别为(0.81±0.06) mL/(h·g)、(0.63±0.04) mL/(h·g); 15 °C 的 O₂ 组降至(0.29±0.03) mL/(h·g), 相比 35 °C 的 O₂ 组 HMs 活性降低了 64.2%。O₂ 溶于水时, 会产生活性氧(reactive oxygen species, ROS), 对产甲烷菌有抑制作用^[24]。同时, 在以 CO₂ 和 H₂ 为底物时的活性实验中, 35 °C 和 25 °C 下的 4 组均未产生 HAc, 而在 15 °C 下控制

组的 HAs 活性为(0.70±0.02) mg/(h·g), O₂ 组 HAs 活性为(0.72±0.01) mg/(h·g)。文献[25]发现, 在 15 °C 时, HAs 的产乙酸行为不受影响。HAs 在酸性、碱性和低温(10~20 °C)条件下更有活性^[26]。这与本实验结果吻合, 低温有氧环境仅仅抑制了产甲烷菌的活性, 而 HAs 未受明显影响, 促进了 HAc 的产生和积累。

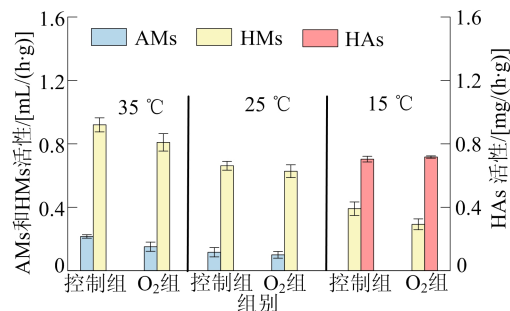


图 4 同型产乙酸生成过程中的污泥活性分析

2.3 辅酶 F₄₂₀ 和电子传递活性

在第 6 个周期结束时, 分析污泥的产生 CH₄ 的关键酶辅酶 F₄₂₀ 和电子传递的活性如图 5 所示。由图 5 可知, 随着温度的降低, 污泥的电子传递活性也逐渐降低。35 °C 下, O₂ 组的电子传递活性为控制组的 98.4%。25 °C 下, O₂ 组的电子传递活性为 35 °C 控制组的 89.3%, 15 °C 下 O₂ 组电子传递活性下降为 35 °C 控制组的 73.8%。电子传递的相对活性与 CH₄ 产量呈正相关^[19], 当温度降低时, 电子传递活性亦降低。

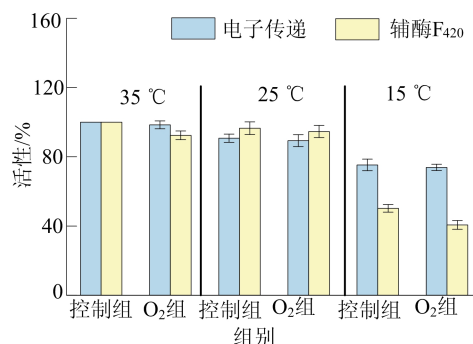


图 5 不同温度下辅酶 F₄₂₀ 和电子传递活性

辅酶 F₄₂₀ 在甲烷生成过程中起着关键作用, 是生成甲烷的指标^[18,27]。与 35 °C 的控制组相比, 35 °C 时 O₂ 组的辅酶 F₄₂₀ 活性降低至 92.4%, 随后, 辅酶 F₄₂₀ 活性随着温度降低而降低。在 25 °C 下, O₂ 组的辅酶 F₄₂₀ 活性为 35 °C 控制组的 94.6%, 25 °C 并未对辅酶 F₄₂₀ 活性造成明显抑制, 因此 25 °C 的产甲烷量与 35 °C 相近。

在 15 °C 下, O₂ 组的辅酶 F₄₂₀ 活性进一步降低, 为 35 °C 控制组的 40.7%。辅酶 F₄₂₀ 水平过低会干扰从 CO₂ 到甲基辅酶 M 过程中的电子传递, 从而抑制甲烷生产率^[28]。因此, 低温对 HMs 活性的负面影响可能是由于干扰了厌氧发酵过程中电子传递和辅酶 F₄₂₀ 的转化过程, 抑制了 CO₂ 向甲基辅酶 M 的转化。因此, 在 15 °C 条件下, CO₂ 转化为 CH₄ 的途径中断, 使 CO₂ 转化为乙酸。

2.4 微生物群落结构变化

细菌群落结构在属水平上相对丰度如图 6 所

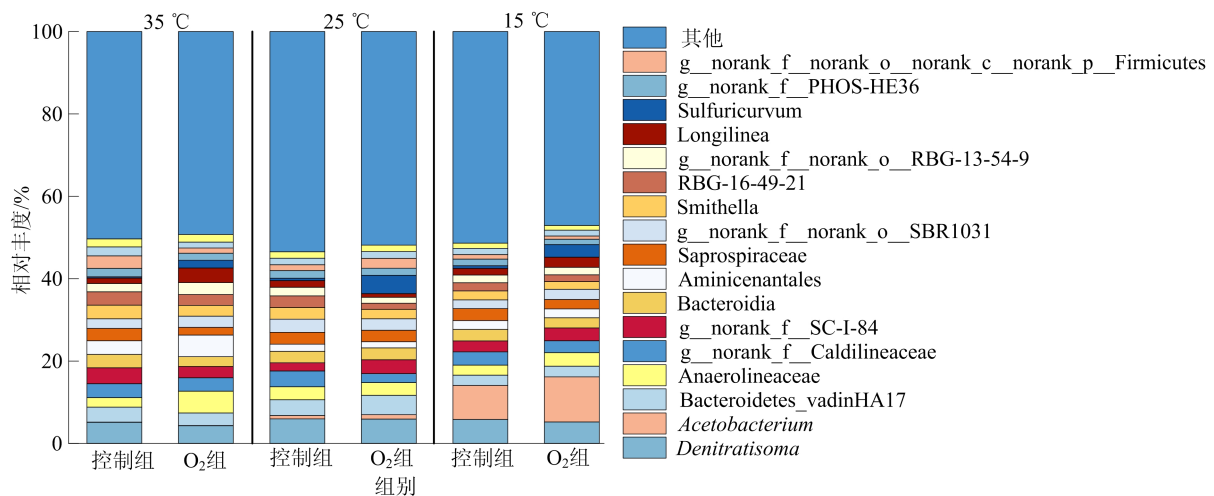


图 6 细菌群落在属水平的相对丰度

15 °C 明显富集了典型的同型产乙酸菌 *Acetobacterium*。当以 H₂ 和 CO₂ 作为唯一底物时, *Acetobacterium* 的优势会增加^[32]。*Acetobacterium* 能够以 CO₂ 为碳源, H₂ 为还原剂, 进行稳健的自养生长, 而 HAc 通常是 *Acetobacterium* 唯一的代谢产物^[33]。在低温条件下, *Acetobacterium* 的富集和 HMs 的消除是可能的, 没有气液传质限制^[16]。在 15 °C 的控制组和 O₂ 组, *Acetobacterium* 的相对丰度分别为 6.6%、9.0%, 而在 25 °C 下, 控制组和 O₂ 组的 *Acetobacterium* 相对丰度分别为 0.6%、0.7%, 在 35 °C 下其丰度均小于 0.01%。文献^[34]在生物电合成醋酸盐的过程中发现, 由于在阴极上直接生成 H₂ 的速率高, *Acetobacterium* 容易在阴极上富集^[34]。当温度为 15 °C 时, 产甲烷菌的活性被抑制, HAs 能够利用的 H₂ 和 CO₂ 增多, 富集了 *Acetobacterium*, 直接促进了 HAc 的累积。

3 结 论

本文探究 35、25、15 °C 不同温度对控制组和

示(合并丰度小于 100%)。*Denitratisoma* 是氢气反硝化菌^[29], 各组别从左到右 *Denitratisoma* 相对丰度分别为 4.1%、3.4%、4.8%、4.8%、4.6%、4.3%。文献^[30]研究发现, 当将 CO₂ 加入 H₂ 自养反硝化过程中, *Denitratisoma* 的丰度增加。文献^[31]研究发现, 电化学生物过程转化 CO₂ 到 CH₄ 过程中, 优势甲烷菌种与 *Denitratisoma* 呈负相关。在各组中, 25、15 °C 下, *Denitratisoma* 的相对丰度高于 35 °C, 低温下的甲烷产量也较少。

O₂ 组 CO₂ 同型产乙酸效率、污泥产甲烷和产乙酸活性、电子传递活性和辅酶 F₄₂₀ 活性及其微生物群落结构的影响, 得到如下结论:

1) 25、15 °C 下, 累积乙酸产量与累积甲烷产量成反比。35 °C 下气体发酵产物仅为 CH₄, 未产生 HAc; 25 °C 下, 产酸周期延长并降低甲烷产量; 而 15 °C 下, O₂ 组累积乙酸产量相比 25 °C 提高 549.2%, 累积甲烷产量下降 71.9%。

2) 10% O₂ 能够抑制产甲烷活性, 对于同型产乙酸无负面影响。在 15 °C 下, AMs 活性为 0, 即产生的 HAc 未被 AMs 消耗。15 °C 时 O₂ 组的 HMs 活性相比 35 °C 时降低了 64.2%, 表明低温有氧环境抑制了 HMs 对于 CO₂ 和 H₂ 的竞争。

3) 15 °C 干扰了厌氧发酵过程中的电子传递和辅酶 F₄₂₀ 的转化过程。在 15 °C 下, 控制组和 O₂ 组的电子传递活性分别下降为 35 °C 控制组的 75.3% 和 73.8%, 辅酶 F₄₂₀ 活性分别下降为 35 °C 控制组的 50.2% 和 40.7%。

4) 本研究结论拓宽了 CO₂ 生物转化的反应条件和范围, 优化了含氧量小于 10% 的 CO₂ 同型

产乙酸的温度范围。进一步通过低温条件使得 CO₂ 废气定向产酸工艺的规模化生产有了更为经济的控制策略。未来,该技术能够结合微生物的链延长反应,通过 HAc 生成中链脂肪酸来提高产物的附加值。

[参 考 文 献]

- [1] KENARSARI S D, YANG D, JIANG G, et al. Review of recent advances in carbon dioxide separation and capture[J]. RSC Advances, 2013, 3(45): 668-668.
- [2] ANNIE MODESTRA J, KATAKOJWALA R, VENKATA MOHAN S. CO₂ fermentation to short chain fatty acids using selectively enriched chemolithoautotrophic acetogenic bacteria [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 394: 124759.
- [3] ZHANG F, DING J, ZHANG Y, et al. Fatty acids production from hydrogen and carbon dioxide by mixed culture in the membrane biofilm reactor [J]. Water Research, 2013, 47(16): 6122-6129.
- [4] WANG L, CHEN Y, LONG F, et al. Breaking the loop; tackling homoacetogenesis by chloroform to halt hydrogen production-consumption loop in single chamber microbial electrolysis cells [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 389: 124436.
- [5] ZHOU M, YAN B, WONG J W C, et al. Enhanced volatile fatty acids production from anaerobic fermentation of food waste; a mini-review focusing on acidogenic metabolic pathways[J]. Bioresource Technology, 2018, 248: 68-78.
- [6] BAUMANN I, WESTERMANN P. Microbial production of short chain fatty acids from lignocellulosic biomass: current processes and market [J]. Biomed Research Int, 2016, 2016: 8469357.
- [7] ZHENG X, CHEN Y, WANG X, et al. Using mixed sludge-derived short-chain fatty acids enhances power generation of microbial fuel cells [J]. Energy Procedia, 2017, 105: 1282-1288.
- [8] NISAR A, KHAN S, HAMEED M, et al. Bio-conversion of CO₂ into biofuels and other value-added chemicals via metabolic engineering[J]. Microbiol Research, 2021, 251: 126813.
- [9] DE GUIDO G. Cryogenic CO₂ capture from oxy-combustion flue gas by a hybrid distillation + physical absorption process [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2023, 199: 639-658.
- [10] VAN NGUYEN N, PIROUZFAR V, SOHEILINEZHAD H, et al. Optimizing the CO₂ capture and removal process to recover energy and CO₂ from the flue gas of boilers and gas turbines outlet with considering the techno-economic analysis[J]. Energy, 2024, 291: 130281.
- [11] LIEW F, MARTIN M E, TAPPEL R C, et al. Gas fermentation-a flexible platform for commercial scale production of low-carbon-fuels and chemicals from waste and renewable feedstocks[J]. Front Microbiol, 2016, 7: 694.
- [12] LIU R, HAO X, WEI J. Function of homoacetogenesis on the heterotrophic methane production with exogenous H₂/CO₂ involved [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 284: 1196-1203.
- [13] ZEPPELLI M, CHOUCANE H, SCARDIGNO L, et al. Bioelectrochemical vs hydrogenophilic approach for CO₂ reduction into methane and acetate [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 396: 125243.
- [14] QIU S, XIA W, XU J, et al. Impacts of 2-bromoethanesulfonic sodium on methanogenesis: methanogen metabolism and community structure [J]. Water Research, 2022, 230: 119527.
- [15] LIU F, CONRAD R. Chemolithotrophic acetogenic H₂/CO₂ utilization in Italian rice field soil [J]. The ISME Journal, 2011, 5(9): 1526-1539.
- [16] LAGUILLAUMIE L, PEYRE-LAVIGNE M, GRIMALT-ALEMANY A, et al. Controlling the microbial competition between hydrogenotrophic methanogens and homoacetogens using mass transfer and thermodynamic constraints [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 414: 137549.
- [17] CONRAD R, BAK F, SEITZ H J, et al. Hydrogen turnover by psychrotrophic homoacetogenic and mesophilic methanogenic bacteria in anoxic paddy soil and lake sediment [J]. FEMS Microbiology Ecology, 1989, 5: 285-293.
- [18] HE C, LIU T, QU H, et al. Coupling granular activated carbon and exogenous hydrogen to enhance anaerobic digestion of phenol via predominant syntrophic acetate oxidation and hydrogenotrophic methanogenesis pathway [J]. Bioresource Technology, 2021, 323: 124576.
- [19] TIAN T, QIAO S, YU C, et al. Distinct and diverse anaerobic respiration of methanogenic community in response to MnO₂ nanoparticles in anaerobic digester sludge [J]. Water Research, 2017, 123: 206-215.
- [20] NGUYEN D, WU Z, SHRESTHA S, et al. Intermittent micro-aeration; new strategy to control volatile fatty acid accumulation in high organic loading anaerobic digestion [J]. Water Research, 2019, 166: 115080.
- [21] WANG R, LIU J, ZHANG Q, et al. Robustness of the anammox process at low temperatures and low dissolved oxygen for low C/N municipal wastewater treatment [J]. Water Research, 2024, 252: 121209.
- [22] YU N, GUO B, ZHANG Y, et al. Different micro-aeration rates facilitate production of different end-products from source-diverted blackwater [J]. Water Research, 2020, 177: 115783.
- [23] AGNEESSENS L M, OTTOSEN L D M, ANDERSEN M, et al. Parameters affecting acetate concentrations during in-situ biological hydrogen methanation [J]. Bioresource Technology, 2018, 258: 33-40.
- [24] SHI Y, QIAN Y, GUO J, et al. A novel approach for water disinfection by enhanced photoanode oxidation using in-situ generated hydrogen peroxide [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 416: 138001.

过开环控制对步进电机的步数进行控制,根据提前设置的细分倍数和单片机提供给驱动器的脉冲个数,可知步进电机旋转的圈数,再由圈数和对应螺杆的每圈推进距离将角位移转换为线位移,从而得出滑块推动的距离,通过几何运算可以求得探杆张开的长度。由于上端到螺杆的距离是固定的,因此可以利用三点求圆的直径原理,利用几何关系求出圆的直径。实验结果表明:300 mm的管径误差基本控制在2.0%之内;500 mm的管径误差在2.1%之内;600 mm的管径误差基本在3.3%之内;800 mm的管径误差基本在1.6%之内。该测量系统能够较准确地测出管道的直径,基本满足设计要求。

[参 考 文 献]

- [1] 陈茂添,王文华,吴伟娜. 步进电机智能控制系统的设计与实现[J]. 机电工程技术, 2020, 49(8): 112-114.
- [2] 赵鹏,李帅波,钱美,等. 步进电机控制系统设计与实现[J]. 自动化仪表, 2022, 43(11): 87-90, 94.
- [3] 陈祖霖,沈英,吴靖. 结合STM32和FPGA的步进电机运动控制系统设计[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 27-33.
- [4] 郑洁,张朝晖,李栋,等. 高精度步距角细分自动测试影响因素分析及其测试[J]. 微电机, 2022, 55(12): 85-88.
- [5] XIN B, YUN B Z, JI F W, et al. Stepper motor driver based on FPGA with USB interface[C]//Proceedings of the Fifth International Symposium on Test Automation & Instrumentation II. [S. l.]: World Publishing Corporation, 2014: 6.
- [6] 郑文强,宋单阳,王培恩,等. 基于蓝牙通信的液压支架电液控制器无线遥控系统开发[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 194-198.
- [7] 鲁文杰. 基于软件细分的两相步进电机驱动器设计[J]. 桂林航天工业学院学报, 2022, 27(3): 349-353.
- [8] 谢长君,杜康,刘力. 两相步进电机细分驱动器研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2013, 35(6): 851-855.
- [9] 伍艳雄,黄勇,高林,等. 步进电机细分驱动控制系统设计与实现[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(4): 458-462.
- [10] 金博丕,王宏,李坦,等. 智能调节续流模式的步进电机细分控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 390-396, 403.
- [11] (责任编辑 胡亚敏)
-
- (上接第726页)
- [25] FU B, JIN X, CONRAD R, et al. Competition between chemolithotrophic acetogenesis and hydrogenotrophic methanogenesis for exogenous H₂/CO₂ in anaerobically digested sludge: impact of temperature[J]. Front Microbiol, 2019, 10: 2418.
- [26] PAN X, ZHAO L, LI C, et al. Deep insights into the network of acetate metabolism in anaerobic digestion: focusing on syntrophic acetate oxidation and homoacetogenesis[J]. Water Research, 2021, 190: 116774.
- [27] ZHU L, WU B, LIU Y, et al. Strategy to enhance semi-continuous anaerobic digestion of food waste by combined use of calcium peroxide and magnetite[J]. Water Research, 2022, 221: 118801.
- [28] FAN Y, YIN M, CHEN H. Insights into the role of chitosan in hydrogen production by dark fermentation of waste activated sludge[J]. Science of the Total Environment, 2023, 859: 160401.
- [29] FAHRBACH M, KUEVER J, MEINKE R, et al. *Denitratissima oestradiolicum* gen. nov., sp. nov., a 17 β -oestradiol-degrading, denitrifying betaproteobacterium[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2006, 56(7): 1547-1552.
- [30] XING W, WANG Y, HAO T, et al. pH control and microbial community analysis with HCl or CO₂ addition in H₂-based autotrophic denitrification[J]. Water Research, 2020, 168: 115200.
- [31] ZHANG Z, LU X, NIU C, et al. Clarifying catalytic behaviors and electron transfer routes of electroactive biofilm during bioelectroconversion of CO₂ to CH₄[J]. Fuel, 2022, 310: 122450.
- [32] KUCUKAGA Y, FACCHIN A, STEFANELLI V, et al. Innovative char-sparger for improving volatile fatty acids (VFA) production in homoacetogenic fermentation of H₂/CO₂ with microbial mixed cultures (MMC)[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 471: 144165.
- [33] TARRARAN L, AGOSTINO V, VASILE N S, et al. High-pressure fermentation of CO₂ and H₂ by a modified *Acetobacterium woodii* [J]. Journal of CO₂ Utilization, 2023, 76: 102583.
- [34] BIAN Y, LEININGER A, MAY H D, et al. H₂ mediated mixed culture microbial electrosynthesis for high titer acetate production from CO₂ [J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2024, 19: 100324.
- (责任编辑 吴亮)