

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.13.017

不同氧化还原介体对剩余污泥厌氧发酵产酸的影响

胡德秀^{1,2}, 杨元珠¹, 闫怡心¹, 代康康¹, 胡长玲¹, 张舒婷¹

(1. 西安理工大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 生态环境与化工学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了提高剩余污泥厌氧发酵产酸效率,选择蒽醌-2-磺酸钠(AQS)、1,2-萘醌-4-磺酸钠(NQS)和秸秆生物炭(BC)三种氧化还原介体(ROMs),探究不同ROMs对剩余污泥厌氧发酵中挥发性脂肪酸(VFA)浓度及组分、有机物溶出和微生物的影响。结果表明,各组产酸峰值日均为第5天。1 mmol/L AQS组的VFA浓度(以COD计)最大,为872.01 mg/L,是对照组的2.05倍;100 μ mol/L NQS组的最大产酸量为437.62 mg/L,比对照组提升了3.04%;而BC对污泥发酵有抑制作用,VFA浓度仅为对照组的23.12%~43.69%。3种ROMs都增加了VFA组分中乙酸和丙酸总量占比,1 mmol/L AQS组、100 μ mol/L NQS组、5 g/L BC组的乙酸和丙酸总量占比分别为对照组的5.11、2.57、2.28倍。功能微生物群落结构分析表明,1 mmol/L AQS组的产酸菌富集效果最好,4 mmol/L AQS组促进了产乙酸优势菌种富集,物种多样性稍有降低。

关键词: 氧化还原介体; 剩余污泥; 厌氧发酵; 挥发性脂肪酸

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)13-0115-07

Effect of Different Redox Mediators on Acid Production from Anaerobic Fermentation of Waste Activated Sludge

Hu Dexiu^{1,2}, Yang Yuanzhu¹, Yan Yixin¹, Dai Kangkang¹, Hu Changling¹, Zhang Shuting¹

(1. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Eco-Environmental and Chemical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of acid production from anaerobic fermentation of waste activated sludge, three redox mediators (ROMs)—sodium anthraquinone-2-sulfonate (AQS), sodium 1,2-naphthoquinone-4-sulfonate (NQS), and straw biochar (BC)—were selected to investigate their effects on the concentration and composition of volatile fatty acid (VFA), organic matter dissolution, and microorganisms during the anaerobic fermentation of waste activated sludge. The results showed that the peak day of acid production in each group was day 5. The highest VFA concentration (calculated as COD) was 872.01 mg/L in the 1 mmol/L AQS group, which was 2.05 times that of the control group. The maximum acid yield in the 100 μ mol/L NQS group was 437.62 mg/L, which was 3.04% higher than that of the control group. In contrast, BC inhibited sludge fermentation, with VFA concentrations ranging from only 23.12% to 43.69% of those in the control group. All three ROMs increased the combined proportion

通信作者: 胡德秀 E-mail: hudexiu@xaut.edu.cn

of acetic acid and propionic acid in the VFA composition. The combined proportions of acetic acid and propionic acid in the 1 mmol/L AQS, 100 $\mu\text{mol/L}$ NQS, and 5 g/L BC groups were 5.11 times, 2.57 times, and 2.28 times those of the control group, respectively. Analysis of the functional microbial community structure indicated that 1 mmol/L AQS group exhibited the best enrichment of acid-producing bacteria, while 4 mmol/L AQS group promoted the enrichment of acetic acid-producing dominant bacteria, with a slight decrease in species diversity.

Keywords: redox mediator; waste activated sludge; anaerobic fermentation; volatile fatty acid (VFA)

随着我国对城镇污水处理的重视,污泥量也逐年增加。剩余污泥作为污水处理过程中的副产物,含有大量有机质、微生物及营养物质。厌氧发酵是一种常用的污泥资源化处理技术,生成的挥发性脂肪酸(VFA)中,乙酸和丙酸等短链脂肪酸可作为污水处理反硝化过程的优质碳源。但是,目前剩余污泥厌氧发酵产酸面临产酸量低、发酵时间长等问题,为提高发酵产酸效率,可通过添加药剂或者预处理技术来提高VFA产量。

使用氧化还原介体(ROMs)催化加速电子传递效率,从而改善厌氧过程中微生物代谢功能是提高污泥发酵效率的一种有效措施。作为电子传递的催化剂,ROMs具备接收和释放电子的能力,其能够促进电子从供体向受体的快速转移,从而提高氧化还原效率。目前常用的ROMs分为可溶态的醌类、黄素、腐殖质等化合物和不溶态的固相碳材料,如生物炭(BC)、活性炭(AC)等。醌基型ROMs可以提升高固体含量的污泥发酵效果,增强细胞与基质之间的电子传递效率,从而有效促进基质降解^[1]。Zhang等^[2]发现,100 mg/L 蒽醌-2-磺酸钠(AQS)可改善污泥发酵过程,缩短发酵滞后期,最大产酸浓度达647.0 mg/L,比对照组提高了21.53%。苑宏英等^[3]发现,100 $\mu\text{mol/L}$ 的1,2-萘醌-4-磺酸钠(NQS)可增强酶活性、提高电子传递速率、降低反应活化能以及提升反应速率。另外,BC作为碳基原料在高温热解过程中形成的副产品,具备在微生物间进行直接种间电子传递的能力,从而提高厌氧发酵效率。Duan等^[4]发现,当600 $^{\circ}\text{C}$ 下制备的藻类BC投加量为1.0 g/L时,藻类厌氧发酵中VFA浓度(以COD计)在第4天达到最大值(4 334 mg/L),约为对照组的2.1倍。

目前的研究主要集中在单一ROMs对污泥厌氧

发酵产酸的影响,不同ROMs影响差异的相关报道较少。为了探究不同ROMs对污泥产酸系统的适用性和效果差异,选择电子传递速率快的AQS、NQS和BC^[1,4],考察厌氧发酵过程中不同实验条件对污泥酸化的影响,揭示VFA浓度及组分、有机物和微生物群落结构的变化。为了推动剩余污泥中碳和磷资源的同步回收研究,笔者采用了常温发酵技术,该技术能同时满足聚磷菌和产酸菌的生长需求,可为污泥资源化厌氧发酵技术提供科学理论与指导。

1 材料与方法

1.1 材料来源与性质

剩余污泥和接种污泥分别取自西安市某污水处理厂二沉池回流段和倒置A²/O工艺厌氧池。污泥经曝气、静置沉降、过筛后备用。实验污泥的性质见表1。

表1 实验污泥性质

Tab.1 Characteristics of experimental sludge

项目	pH	MLSS/ (g/L)	MLVSS/ (g/L)	总COD (TCOD)/ (mg/L)	溶解性 COD (SCOD)/ (mg/L)	上清液 蛋白质/ (mg/L)	上清液 多糖/ (mg/L)
剩余 污泥	7.16	23.68	13.00	14 789.05	156.24	14.60	17.10
接种 污泥	7.08	23.53	12.75	13 035.65	161.25	14.81	20.65

AQS和NQS均为分析纯,状态为固体粉末;BC以产量大且易得的玉米秸秆为原料,在500 $^{\circ}\text{C}$ 下热解制备而成。

1.2 实验方法

实验在室温下进行,并且不调控pH。以1 000 mL的血清瓶为反应容器,按质量比为4:1混合剩余污泥和接种污泥并装料。共设置10组实验,分别为

原泥对照组和投加 1、2、4 mmol/L AQS (AQS1、AQS2、AQS4)^[5], 100、300、500 $\mu\text{mol/L}$ NQS (NQS100、NQS300、NQS500)^[3], 5、10、15 g/L BC (BC5、BC10、BC15)^[6]的实验组,用氮气吹脱 5 min 以降低溶解氧浓度($\text{DO} < 0.2 \text{ mg/L}$),保持厌氧条件。采集 30 mL 的污泥样本,标记为厌氧处理的起始时间(0 d)。随后,密封血清瓶,并在室温条件下进行为期 16 d 的发酵过程。每日采集 30 mL 污泥,经离心(4 000 r/min, 5 min)、抽滤(0.45 μm)后收集上清液,测定 VFA、SCOD、溶解性蛋白质及多糖。

1.3 检测项目及方法

SCOD 采用快速消解分光光度法测定;溶解性蛋白质采用 Folin-酚试剂法测定;溶解性多糖采用蒽酮-硫酸法测定。VFA 采用高效液相色谱仪检测,浓度以 COD 计。微生物群落结构采用 PCR 扩增及 16S rDNA 高通量测序进行分析,之后通过拼接、质控、嵌合体过滤等步骤获得高质量的 CleanData,用以后续微生物结构分析。

2 结果与讨论

2.1 氧化还原介体对 VFA 浓度及组分的影响

在厌氧发酵过程中,不同 ROMs 对剩余污泥产酸的影响如图 1 所示。可知,各组 VFA 浓度表现为先上升后下降的趋势,并在第 5 天达到峰值。AQS 的产酸促进效果较好,AQS1 组的最大 VFA 浓度为 872.01 mg/L,是对照组的 2.05 倍,说明 AQS 的投加提高了剩余污泥的产酸能力。这是因为 AQS 促进了细胞膜内外的电子转移,对细菌群落的组成和活性产生了显著影响,进而促进了厌氧发酵过程。NQS100 组最大 VFA 浓度为 437.62 mg/L,比对照组提升 3.04%。AQS 组和 NQS 组整体呈现随着投加量的增加,VFA 生成量逐渐减少的趋势,这可能是高浓度的 ROMs 对微生物具有一定的毒性,抑制其细胞生长代谢,从而导致部分功能微生物活性下降和数量减少^[2]。BC 组的 VFA 浓度均较低,为对照组的 23.12%~43.69%,说明 BC 的投加对污泥发酵产酸有抑制作用。原因如下:第一,使用的 BC 制备温度较高,表面含氧官能团破裂重组,形成气体挥发,减少了活性位点^[7];第二,高温热解制备的 BC 具有更强的电子接受能力,损耗了更多电子,导致电子传递效率减弱^[8];第三,BC 中的 Na、K、Mg 等矿质元素通常会以碱性形式存在,这种碱性特性可能会中

和部分 VFA^[9]。Du 等^[10]在 500 $^{\circ}\text{C}$ 下制备玉米秸秆 BC,发现投加 10 g/L 的 BC 对奶牛废水厌氧发酵系统中 VFA 的生成没有促进作用。由此可知,高温热解的 BC 对有机物发酵产酸没有促进作用,后续研究可以考虑低温热解 BC 和改性 BC 对有机物发酵产酸的影响。

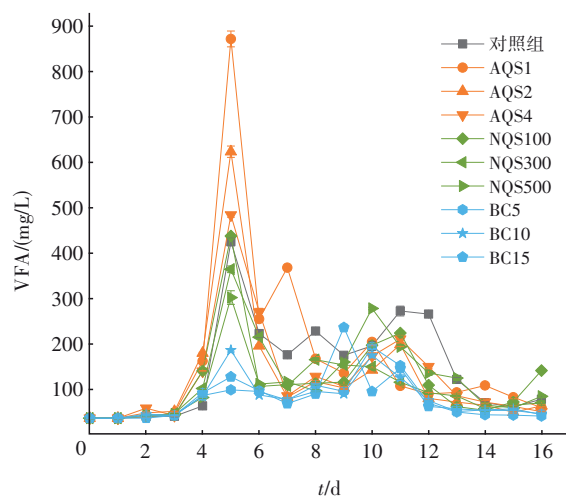


图1 各实验组 VFA 浓度的变化

Fig.1 Variation of VFA concentration in each experimental group

投加不同的 ROMs 会改变系统的发酵环境,引起 VFA 组分发生变化,VFA 组分包括 C2~C5(乙酸、丙酸、异丁酸、丁酸、异戊酸和戊酸)短链脂肪酸^[1]。各实验组产酸峰值日 VFA 组分情况如图 2 所示。

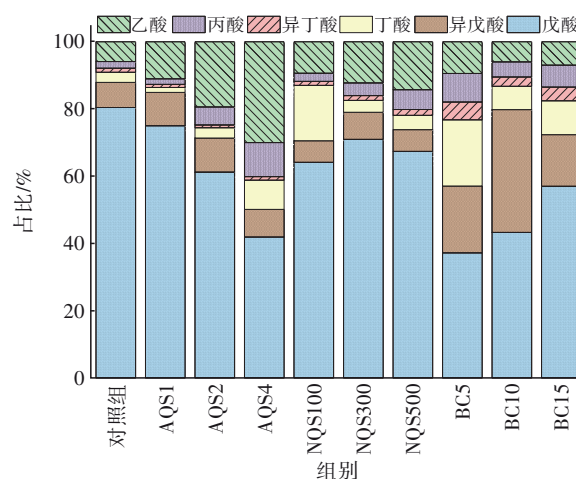


图2 各实验组产酸峰值日 VFA 组分情况

Fig.2 VFA component on peak acid-production day in each experimental group

由图 2 可知,不同 ROMs 对厌氧发酵过程中 VFA 组分有显著影响。对照组乙酸和丙酸总量占

比仅为7.84%, AQS组、NQS组和BC组的乙酸和丙酸总量占比分别为12.68%~40.10%、11.78%~20.16%和10.45%~17.90%, AQS1组、NQS100组、BC5组的乙酸和丙酸总量占比分别为对照组的5.11、2.57、2.28倍。3种ROMs均提升了乙酸和丙酸总量,增加了发酵液的碳源有效组分占比。其中, AQS组的乙酸和丙酸总量占比随着投加量的增加而增大,是对照组的1.62~5.11倍。这与Zhang等^[2]的研究结果一致, AQS有效促进了污泥发酵产酸过程中乙酸的产生。

2.2 氧化还原介体对有机物浓度的影响

剩余污泥厌氧发酵过程涉及复杂的有机物转化, SCOD、溶解性蛋白质和多糖等大分子有机物在胞外酶的催化作用下被转化为小分子物质,通过监测这些参数的变化可评估污泥的水解程度和发酵效率。各组SCOD浓度在发酵过程中的变化见图3。

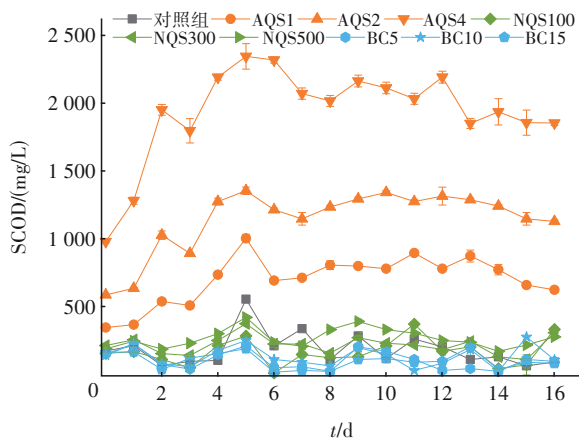


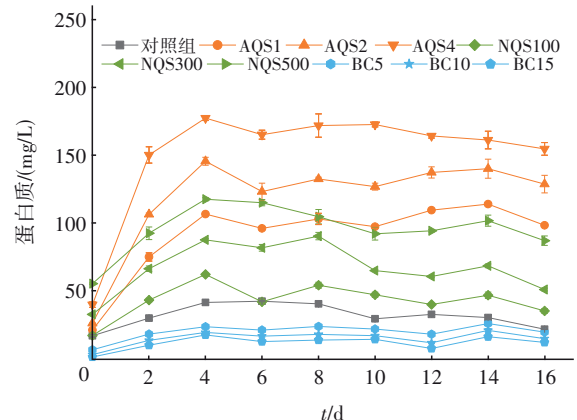
图3 各实验组SCOD的变化

Fig.3 Variation of SCOD in each experimental group

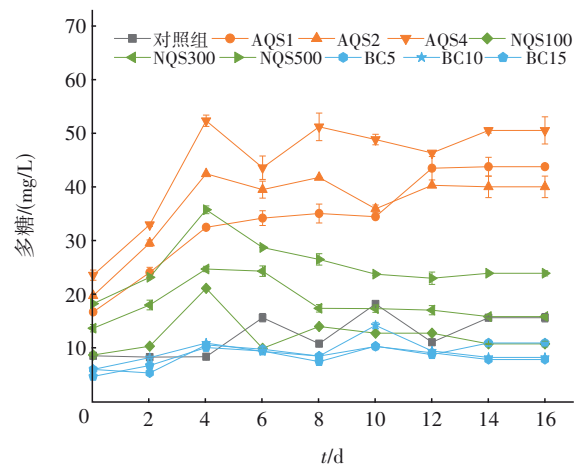
由图3可知, 0~5 d, SCOD浓度增加并达到最高值, 之后逐渐下降并趋于稳定。AQS4组的SCOD浓度显著高于其他各组, 在第5天达到2 344.96 mg/L, 分别为对照组、AQS1组和AQS2组的4.20、2.33和1.73倍。表明较大的AQS投加量能显著提升污泥水解程度, 这可能是在还原状态下AQS通过电子转移氧化污泥的细胞壁, 从而有效促进污泥水解, 释放有机物^[11]。与AQS相比, NQS对溶解性有机物的释放影响不大, 这归因于NQS含有的萘环和磺酸基团, 这些官能团可以与溶解性有机物中的酚羟基等基团发生反应, 形成盐类, 从而影响溶解性有机物含量^[12]。BC则会阻碍有机物的溶出, 这种阻碍作用可能缘于BC中有机金属阳离子的释放, 这些阳离

子可能增加了污泥水解的表现活化能, 并减少了水解酶的活性结合位点^[13], 从而抑制了污泥水解和酸化过程。

在污泥中, 溶解性蛋白质和多糖是关键有机组分, 作为产酸的主要底物在发酵过程中具有重要作用。各组蛋白质和多糖浓度的变化如图4所示。



a. 溶解性蛋白质



b. 溶解性多糖

图4 各实验组溶解性蛋白质和多糖浓度的变化

Fig.4 Variation of soluble protein and polysaccharide concentrations in each experimental group

由图4可知, 蛋白质和多糖浓度呈现先上升后稳定的趋势。在发酵第4~6天, 蛋白质和多糖浓度逐渐下降, 说明系统中的蛋白质和多糖被胞外酶水解成小分子有机物。厌氧发酵第4天, AQS4组蛋白质浓度最大, 达到177.99 mg/L, 为对照组的4.25倍, NQS组蛋白质浓度为对照组的1.49~2.82倍, BC组仅为对照组的43%~57%。上清液蛋白质浓度远大于多糖浓度, 这是由于与多糖相比, 蛋白质分子具有更复杂的空间结构, 不易被分解^[1]。

2.3 功能微生物群落结构分析

对厌氧发酵后(16 d)的污泥进行微生物群落结构分析。Alpha多样性分析可以深入了解产酸量多和乙酸占比高实验组的微生物群落结构变化。AQS1组、AQS4组、NQS100组及BC5组的OTUs和Chao1指数分别为2 139~2 483、2 144.58~2 489.95,均高于对照组(见表2),说明适量投加ROMs有助于提高系统中微生物的数量;AQS4组的OTUs和Chao1指数低于AQS1组,说明随着AQS投加量的增加,系统中物种数量减少,这也印证了AQS投加量对VFA浓度影响的分析结果。关于Shannon和Simpson多样性指数,AQS1组、NQS100组和BC5组高于对照组,提高了发酵系统的物种丰度和多样性;AQS4组Shannon指数与对照组相近,但Simpson指数却有所下降,说明某些物种的相对优势增强,结合图2中AQS4组的乙酸总量占比最高的数据,表明高浓度的AQS可能促进了产乙酸优势菌的富集^[2],导致微生物个体分布均匀度降低,进而使得物种多样性稍有下降。

表2 微生物Alpha多样性指标
Tab.2 Microbial Alpha diversity index

项 目	OTUs	Shannon	Simpson	Chao1	覆盖率
对照组	1 652	9.488 3	0.996 9	1 652.00	1.00
AQS1	2 483	9.845 4	0.997 3	2 489.95	1.00
AQS4	2 139	9.488 4	0.996 0	2 144.58	1.00
NQS100	2 376	9.833 6	0.997 0	2 376.95	1.00
BC5	2 162	9.784 6	0.997 2	2 162.12	1.00

门水平上的物种丰度如图5所示。可以看出,Proteobacteria(31.42%~40.46%)和Bacteroidota(15.46%~22.02%)的丰度相对较高,其次是Firmicutes(7.54%~12.92%)、Chloroflexi(6.77%~9.45%)、Planctomycetota(4.47%~7.08%)和Acidobacterota(4.01%~5.69%)。其中Proteobacteria、Bacteroidota、Firmicutes和Chloroflexi是水解酸化优势菌^[14]。Proteobacteria能破坏、缩短碳链,将C3酸和C4酸转化为C2酸,AQS4组Proteobacteria所占比例最高(40.46%),这可能是AQS4组乙酸比例较高的原因。Firmicutes能将碳水化合物降解为VFA,AQS4和AQS1组厌氧系统中Firmicutes的丰度较高。Chloroflexi是水解细菌,在降解有机物和驱动水解酸化过程中具有关键作用^[15]。AQS1组Chloroflexi占比较对照组增加8.88%,而在AQS4组则比对

照组减少了22.03%,这表明低浓度的AQS具有增加Chloroflexi丰度的效果。

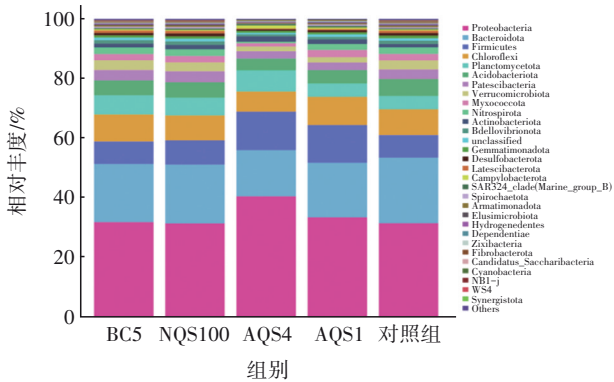


图5 门水平微生物相对丰度

Fig.5 Relative abundance of microorganisms at phylum level

纲水平的物种丰度如图6所示。可知,厌氧发酵系统中主要功能微生物包括Gammaproteobacteria、Bacteroidia、Anaerolineae、Bacilli、Alphaproteobacteria、Clostridia、Betaproteobacteria和Planctomycetes。

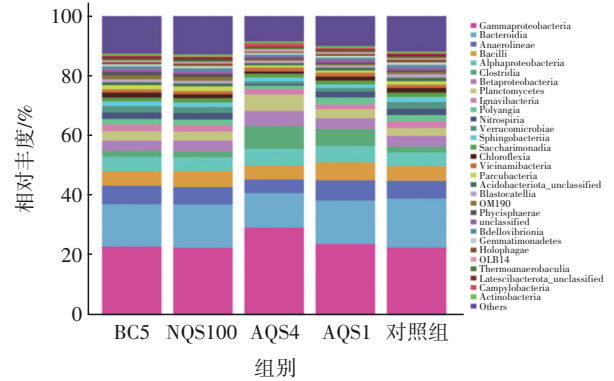


图6 纲水平微生物相对丰度

Fig.6 Relative abundance of microorganisms at class level

Gammaproteobacteria丰度范围为22.48%~29.26%,其在多种代谢途径中发挥作用,包括有机物的水解和VFA的产生。Bacteroidia丰度为11.51%~16.34%,其可以产生蛋白酶、纤维素酶等水解酶,促进复杂有机物的分解。Anaerolineae和Bacilli的丰度分别为4.56%~6.78%和4.82%~6.01%。Alphaproteobacteria和Clostridia的丰度分别为4.57%~5.74%和1.97%~7.58%,这些微生物能够通过新陈代谢利用碳水化合物生成VFA。Betaproteobacteria和Planctomycetes的丰度分别为3.38%~5.07%和2.61%~5.52%,这些微生物会参与有机物的分解和能量回收,进而影响污泥水解和

VFA的产生。投加AQS的产酸功能菌群数量占比变化明显,特别是AQS4组,说明AQS可以促进产酸功能微生物的富集,这与Zhang等^[2]获得的结果相似。而BC和NQS对优势菌富集的促进作用不明显,产酸效果不佳。

厌氧污泥中属水平的物种丰度热图如图7所示。可知,与对照组相比,各组属水平的丰度发生了显著变化,其中,变化较大的是 *Dechloromonas*、*Acinetobacter*、SJA-28(属于 *Chloroflexi*)、*Comamonas*、*Limosilactobacillus*、*Candidatus_Competibacter*、C10-SB1A(属于 *Anaerolineae*)、*Escherichia-Shigella* 和 *Betaproteobacteria_unclassified*。其中 SJA-28、*Comamonas*、*Limosilactobacillus* 和 C10-SB1A 的变化可能与厌氧条件下有机物的代谢有关,这些微生物有利于污泥水解或产酸,并且在有机物丰富的环境中可能会更加繁盛,从而促进有机物分解和VFA积累^[16]。

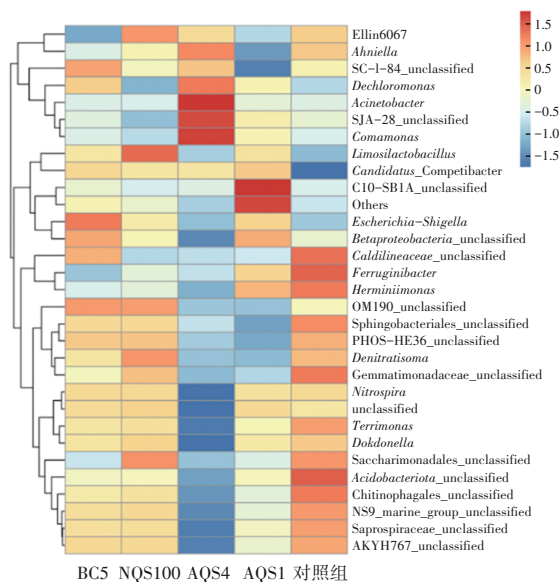


图7 属水平的物种丰度热图

Fig.7 Species abundance heat map at genus level

与对照组相比,AQS促进了水解或产酸优势菌种的富集,AQS投加量的增加会引起微生物分布不均,特别是AQS4组中 *Acinetobacter*、SJA-28、*Comamonas* 的富集,降低了物种的多样性。此外, *Betaproteobacteria_unclassified* 与脂肪酸和磷酸盐的摄取有关,是一种耗酸菌,BC5组中其相对丰度较高,这也导致了BC5组产酸效果较差。

3 结论

① ROMs的投加并没有导致产酸峰值日(第5

天)的改变,但是部分ROMs提高了产酸量,其中,AQS1组产酸量最大,为872.01 mg/L,是对照组的2.05倍。过量的ROMs会毒害微生物,抑制生命活动,不利于污泥发酵,导致产酸量随ROMs投加量的增加而减小。

② ROMs的投加可提高发酵液中乙酸与丙酸的占比,促进了戊酸向低碳链酸的转变,增加了发酵液作为碳源的有效成分。

③ 在厌氧发酵系统中,AQS通过电子转移氧化污泥的细胞壁,促进了有机物溶出,AQS4组的溶出效果最好。BC因有机金属离子的存在,水解效果受到抑制。

④ AQS、NQS和BC均能提升厌氧发酵系统中微生物的丰度。过量投加AQS有利于产乙酸菌的富集,但微生物多样性略有下降。

参考文献:

- [1] Huang J G, Chen S S, Wu W H, et al. Insights into redox mediator supplementation on enhanced volatile fatty acids production from waste activated sludge [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(26): 27052-27062.
- [2] Zhang L G, Ban Q Y, Li J Z, et al. An enhanced excess sludge fermentation process by anthraquinone-2-sulfonate as electron shuttles for the biorefinery of zero-carbon hydrogen [J]. Environmental Research, 2022, 210: 113005.
- [3] 苑宏英,李原玲,李华,等. 投加介体强化低温污水生物反硝化脱氮的研究 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(13): 110-114.
Yuan Hongying, Li Yuanling, Li Hua, et al. Enhanced biological denitrification of low-temperature sewage by adding redox mediator [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(13): 110-114(in Chinese).
- [4] Duan X, Chen Y Z, Yan Y Y, et al. New method for algae comprehensive utilization: algae-derived biochar enhances algae anaerobic fermentation for short-chain fatty acids production [J]. Bioresource Technology, 2019, 289: 121637.
- [5] 谢水波,张亚萍,刘金香,等. 腐殖质AQS存在条件下腐败希瓦氏菌还原U(VI)的特性[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(11): 3285-3291.
Xie Shuibao, Zhang Yaping, Liu Jinxiang, et al. Characteristics of reducing U(VI) by *Shewanella*

- putrefaciens* in presence of anthraquinone-2-sulfonate (AQS) [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(11): 3285-3291 (in Chinese).
- [6] Tang Z J, Chen L, Zhang Y, et al. Improved short-chain fatty acids production and protein degradation during the anaerobic fermentation of waste-activated sludge via alumina slag-modified biochar [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2024, 196(9): 6115-6133.
- [7] 王炯, 张品, 张舒晴, 等. 温度对秸秆生物炭理化特性和电化学特性的影响 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 399-404.
- Wang Jiong, Zhang Pin, Zhang Shuqing, et al. Effect of temperature on physicochemical properties of straw biochar: focus on surface appearance and electrochemical properties [J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43(5): 399-404 (in Chinese).
- [8] 赵星程, 贾方旭, 蒋伟斌, 等. 氧化还原介体介导厌氧氨氧化生物脱氮的研究进展 [J]. 化工进展, 2023, 42(3): 1606-1617.
- Zhao Xingcheng, Jia Fangxu, Jiang Weiyu, et al. Redox mediators-mediated anaerobic ammonium oxidation process for biological nitrogen removal: a review [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(3): 1606-1617 (in Chinese).
- [9] 叶协锋, 周涵君, 于晓娜, 等. 热解温度对玉米秸秆炭产率及理化特性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1268-1275.
- Ye Xiefeng, Zhou Hanjun, Yu Xiaona, et al. Physicochemical properties and yields of corn-stalk-biochar under different pyrolyzed temperatures [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(5): 1268-1275 (in Chinese).
- [10] Du X, Zhang Y, Ma Y W, et al. The synergistic effect of chemical oxidation and microbial activity on improving volatile fatty acids (VFAs) production during the animal wastewater anaerobic digestion process treated with persulfate/biochar [J]. Science of the Total Environment, 2023, 857: 159276.
- [11] Guo H X, Wang Y F, Tian L X, et al. Insight into the enhancing short-chain fatty acids (SCFAs) production from waste activated sludge via polyoxometalates pretreatment: mechanisms and implications [J]. Science of the Total Environment, 2021, 800: 149392.
- [12] Ozyildiz Z, Gezer D, Deniz N G, et al. Investigation of electrochemical and spectroelectrochemical properties of some amino-substituted naphthoquinones (NQs) [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2023, 946: 117715.
- [13] 于亚梅, 沈雁文, 朱南文, 等. 生物炭和石墨的电化学性质对剩余污泥厌氧消化产甲烷的影响 [J]. 环境工程学报, 2020, 14(3): 807-820.
- Yu Yamei, Shen Yanwen, Zhu Nanwen, et al. Effect of electrochemical properties of biochar and graphite on methane production in anaerobic digestion of excess activated sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(3): 807-820 (in Chinese).
- [14] Wan J J, Fang W, Zhang T, et al. Enhancement of fermentative volatile fatty acids production from waste activated sludge by combining sodium dodecylbenzene sulfonate and low-thermal pretreatment [J]. Bioresource Technology, 2020, 308: 123291.
- [15] Tian X M, Shen Z Q, Zhou Y X, et al. Inhibition on biological acidification and microbial community by high-strength acetaldehyde [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 143: 231-238.
- [16] 王文奇, 师辰艺, 刘明庆, 等. 厌氧颗粒污泥启动及菌群结构变化研究 [J]. 现代化工, 2021, 41(7): 219-224, 227.
- Wang Wenqi, Shi Chenyi, Liu Mingqing, et al. Start-up of anaerobic granular sludge and changes of microflora structure [J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(7): 219-224, 227 (in Chinese).

作者简介: 胡德秀(1973—), 女, 重庆人, 博士, 教授, 主要研究方向为污染控制与资源化。

E-mail: hudexiu@126.com

收稿日期: 2025-04-21

修回日期: 2025-06-19

(编辑: 任莹莹)